

# Ciências Agrárias e Sustentabilidade dos Sistemas Produtivos

Inovação, manejo, tecnologia e desafios do desenvolvimento rural contemporâneo



Igor Madruga de Oliveira  
Rodrigo Oliveira Miranda  
Leonardo Corrêa Costa



## **Conselho Editorial**

Everton Henrique Mesquita De  
Arruda  
Andressa Santana Batista  
Marcelo Carvalho da  
Conceição  
Patricia da Silva

## **Avaliadores**

Maria Gabrielle Fernandes  
Vieira de Sousa  
  
Amanda Veríssimo

**Publicação:** Editora Publique-se

Número do volume: 01

Páginas: 01 à 650.

Número da edição/revisão: 01

Série: 01.

Cidade: Capão Bonito - SP.

**ISBN: 978-65-979876-5-8**

**DOI: 10.5281/zenodo.19853749**

## SUMÁRIO

<b>MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA POR MEIO DE PARÂMETROS HIDROQUÍMICOS. ....</b>	<b>1</b>
<b>O IMPACTO DO USO DE BIOESTIMULANTES NA PRODUTIVIDADE E NA RESILIÊNCIA HÍDRICA DA CULTURA DA SOJA EM SOLOS DE CERRADO. ....</b>	<b>30</b>
<b>MANEJO DA FERTILIDADE DO SOLO E FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO EM PASTAGENS DEGRADADAS: ESTRATÉGIAS PARA RECUPERAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE FORRAGEIRAS. ....</b>	<b>56</b>
<b>MANEJO DE DOR E BEM-ESTAR EM ANIMAIS DE PRODUÇÃO: A EFICÁCIA DO USO DE ANTI-INFLAMATÓRIOS E ANALGÉSICOS EM PROCEDIMENTOS DE DESCORNA E CASTRAÇÃO. ....</b>	<b>79</b>
<b>ESTUDO DA ESTABILIDADE DE PROBIÓTICOS MICROENCAPSULADOS EM MATRIZES ALIMENTARES NÃO LÁCTEAS (BEBIDAS VEGETAIS E SOBREMESAS DE FRUTAS). ....</b>	<b>106</b>
<b>ENCERRAMENTO .....</b>	<b>130</b>

## **MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA POR MEIO DE PARÂMETROS HIDROQUÍMICOS.**



10.5281/zenodo.19855966

**Cassiano Gustavo Juan Franco Neves Bragança**

Graduado em Geografia pela Universidade Federal do Espírito Santo. Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo. Email: cassianonevesbrag@hotmail.com

### **INTRODUÇÃO**

A análise da qualidade da água subterrânea, quando situada no interior das discussões contemporâneas sobre recursos hídricos, exige deslocar a compreensão desse recurso de uma perspectiva meramente utilitarista para um enquadramento analítico que considere sua inserção em sistemas hidrogeológicos complexos, nos quais interagem processos físicos, químicos e antrópicos em diferentes escalas espaciais e temporais. Nesse sentido, a literatura hidrogeológica tem apontado que a água subterrânea não constitui um compartimento isolado, mas integra circuitos hidrológicos amplos, sendo influenciada tanto pela dinâmica de recarga quanto pelas condições de circulação e armazenamento nos aquíferos, o que implica reconhecer que sua qualidade resulta de processos contínuos de interação entre água e matriz geológica, bem como das transformações impostas pelo uso do território. Ao abordar a hidrogeologia como campo de análise, Feitosa e Manoel Filho (2000) destacam que os aquíferos devem ser compreendidos a partir de suas propriedades estruturais e funcionais, enquanto Freeze e Cherry (2017) ampliam essa perspectiva ao enfatizar a importância dos sistemas de fluxo subterrâneo na determinação das características químicas da água, deslocando o foco da análise para a dinâmica interna dos sistemas. Essa abordagem é tensionada quando se incorporam as contribuições de Campos e Galvão (2023), que propõem a leitura das bacias hidrogeológicas como unidades integradas de análise, evidenciando que a delimitação dos sistemas subterrâneos não pode ser reduzida a critérios geomorfológicos, mas deve considerar a articulação entre litologia, estrutura geológica e dinâmica hidráulica, o que introduz uma dimensão espacial mais complexa na interpretação da qualidade da água.

A compreensão dos processos hidrogeoquímicos, por sua vez, exige considerar que a composição da água subterrânea é resultado de reações químicas que se desenvolvem ao longo do fluxo, envolvendo dissolução mineral, troca iônica e processos redox, os quais são condicionados tanto pela natureza das formações geológicas quanto



pelas condições físico-químicas do meio. Deustch (1997) estabelece que a água subterrânea atua como agente ativo na transformação do meio geológico, enquanto Alberti (2017) demonstra que intervenções antrópicas, como a atividade minerária, podem alterar significativamente esses processos, introduzindo novos elementos na dinâmica hidrogeoquímica. A análise de Zielinski (2024) amplia essa discussão ao considerar a interação entre CO<sub>2</sub>, água e minerais, evidenciando que a presença de gases dissolvidos pode modificar os equilíbrios químicos do sistema, o que reforça a necessidade de interpretar a qualidade da água a partir de uma perspectiva processual. Essa complexidade é ainda mais acentuada quando se consideram os estudos empíricos de Kuhn et al. (2018) e Franzolin, Rempel e Pereira (2017), que evidenciam a variabilidade hidrogeoquímica em diferentes contextos regionais, indicando que a composição da água subterrânea não pode ser generalizada sem a consideração das especificidades locais. Ao incorporar a dimensão antrópica, Brito (2022) e Oliveira (2024) demonstram que a urbanização e as mudanças no uso do solo introduzem novos vetores de alteração da qualidade da água, tensionando os equilíbrios naturais e exigindo abordagens analíticas que integrem processos naturais e interferências humanas.

A partir dessa articulação entre fundamentos hidrogeológicos e processos hidrogeoquímicos, a discussão sobre monitoramento da qualidade da água subterrânea por meio de parâmetros hidroquímicos adquire centralidade, na medida em que a produção de dados confiáveis depende da integração entre técnicas de amostragem, métodos analíticos e estratégias de interpretação capazes de lidar com a complexidade dos sistemas aquíferos. A análise desenvolvida por ANA (2011) evidencia que a coleta e preservação de amostras constituem etapas críticas para a confiabilidade dos resultados, enquanto Rodrigues e Campos (2024) demonstram que a interpretação dos dados depende do conhecimento das condições de captação e da estrutura dos poços, indicando que a produção do dado hidroquímico é condicionada por fatores técnicos e contextuais. A utilização de métodos estatísticos multivariados, conforme discutido por Gomes e Cavalcante (2017) e Da Costa et al. (2020), permite organizar grandes volumes de dados e identificar padrões ocultos, ao passo que a aplicação de índices de qualidade, como proposto por Menezes et al. (2018) e De Andrade Ribeiro (2024), busca sintetizar informações complexas em indicadores interpretáveis, ainda que tais instrumentos apresentem limitações associadas à simplificação dos sistemas. No entanto, a incorporação dessas ferramentas não elimina as tensões inerentes ao monitoramento, uma vez que a interpretação dos resultados exige a articulação entre dados empíricos, modelos

analíticos e conhecimento hidrogeológico, especialmente em contextos marcados por vulnerabilidade e pressão antrópica, como evidenciado por Borges, Athayde e Reginato (2017) e Santos e Lorandi (2017). Nesse cenário, a necessidade de compreender de que maneira os parâmetros hidroquímicos podem ser utilizados para interpretar a qualidade da água subterrânea em sistemas complexos emerge como questão central, conduzindo à problematização que orienta esta pesquisa, diante do que se pergunta: de que maneira o monitoramento da qualidade da água subterrânea por meio de parâmetros hidroquímicos permite compreender a dinâmica hidrogeoquímica e os impactos antrópicos nos sistemas aquíferos?

O objetivo geral deste estudo consiste em analisar o monitoramento da qualidade da água subterrânea por meio de parâmetros hidroquímicos, buscando compreender como esses indicadores permitem interpretar a dinâmica dos sistemas aquíferos e os efeitos das intervenções antrópicas sobre a qualidade da água. Ao assumir essa orientação, a investigação procura articular diferentes dimensões analíticas, integrando fundamentos teóricos da hidrogeologia, processos hidrogeoquímicos e instrumentos metodológicos de monitoramento, de modo a produzir uma leitura abrangente que ultrapasse a simples descrição de parâmetros e se aproxime de uma interpretação estrutural dos sistemas subterrâneos.

Os objetivos específicos desta pesquisa consistem em examinar os fundamentos hidrogeológicos que estruturam a dinâmica dos aquíferos, analisar os processos hidrogeoquímicos responsáveis pela composição da água subterrânea, avaliar as técnicas de amostragem e os métodos analíticos utilizados na determinação de parâmetros hidroquímicos, bem como interpretar os resultados obtidos a partir da aplicação de índices de qualidade e classificações hidroquímicas, considerando sua relação com a vulnerabilidade e os impactos antrópicos nos sistemas aquíferos. A articulação desses objetivos permite construir uma abordagem integrada que relaciona teoria, método e aplicação, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada do fenômeno investigado.

A metodologia adotada baseia-se em uma abordagem qualitativa de natureza bibliográfica, estruturada a partir da análise de estudos acadêmicos, documentos institucionais e literatura especializada na área de hidrogeologia e hidrogeoquímica, com ênfase na integração entre diferentes perspectivas teóricas e metodológicas. A seleção das referências considerou sua relevância para a compreensão dos processos hidrogeoquímicos, das técnicas de monitoramento e das estratégias de gestão dos recursos

hídricos subterrâneos, sendo realizada uma leitura analítica e crítica que permitiu identificar convergências, divergências e lacunas no campo de estudo. A análise dos dados foi conduzida de forma interpretativa, buscando articular conceitos e evidências empíricas em uma estrutura argumentativa coerente, orientada pelo problema de pesquisa e pelos objetivos definidos.

A justificativa desta pesquisa reside na necessidade de aprofundar a compreensão sobre a qualidade da água subterrânea em um contexto marcado pela intensificação do uso desse recurso e pelo aumento das pressões antrópicas sobre os sistemas aquíferos, o que impõe desafios tanto para o monitoramento quanto para a gestão dos recursos hídricos. A análise dos parâmetros hidroquímicos, quando integrada a uma perspectiva crítica e processual, permite não apenas identificar alterações na qualidade da água, mas também compreender os mecanismos que as produzem, contribuindo para a formulação de estratégias mais eficazes de proteção e uso sustentável. Ao articular fundamentos teóricos, métodos analíticos e aplicações práticas, o estudo busca contribuir para o avanço do conhecimento na área, oferecendo subsídios para pesquisadores e gestores que atuam na interface entre ciência e política pública, em um campo no qual a complexidade dos sistemas exige abordagens analíticas capazes de integrar múltiplas dimensões do problema.

## **2. FUNDAMENTOS DA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E HIDROGEOQUÍMICA**

### **2.1 CONCEITOS E DINÂMICA DOS AQUÍFEROS**

A compreensão dos aquíferos como sistemas dinâmicos exige a superação de leituras que os reduzem a simples reservatórios passivos de água, uma vez que sua constituição envolve a articulação entre propriedades físicas do meio geológico, fluxos hidrodinâmicos e processos de armazenamento e transmissão que operam em diferentes escalas espaciais e temporais. Nesse sentido, a literatura clássica da hidrogeologia estabelece que os aquíferos devem ser interpretados como unidades hidroestruturais cuja funcionalidade depende da porosidade, da permeabilidade e da conectividade dos meios porosos ou fraturados, elementos que condicionam tanto a recarga quanto o fluxo subterrâneo (Feitosa; Manoel Filho, 2000). A abordagem proposta por Freeze e Cherry (2017) amplia esse entendimento ao inserir o comportamento dos aquíferos no âmbito de sistemas de fluxo, nos quais as relações entre zonas de recarga, trânsito e descarga são

governadas por gradientes hidráulicos e pela interação com as condições topográficas e climáticas, deslocando o foco de uma análise estática para uma perspectiva processual. Essa inflexão teórica permite compreender que a dinâmica aquífera não se limita ao armazenamento, mas envolve fluxos contínuos, ainda que frequentemente lentos, que conectam o meio subterrâneo à superfície, o que implica reconhecer que alterações no uso do solo ou nas condições hidrológicas repercutem diretamente na circulação subterrânea. A formulação de Campos e Galvão (2023), ao enfatizar o conceito de bacias hidrogeológicas, introduz uma escala analítica que articula a estrutura geológica com a organização espacial dos fluxos, possibilitando compreender os aquíferos como sistemas inseridos em unidades territoriais mais amplas, nas quais a delimitação não se dá apenas por critérios geomorfológicos, mas pela integração entre litologia, estruturas geológicas e dinâmica hidráulica.

A heterogeneidade dos aquíferos, frequentemente negligenciada em abordagens simplificadas, emerge como elemento central para a interpretação de seu funcionamento, especialmente quando se consideram as distinções entre aquíferos porosos, fissurais e cársticos, cada qual apresentando padrões específicos de armazenamento e circulação. Estudos aplicados evidenciam que essa variabilidade não é apenas uma característica geológica, mas um fator que redefine a forma como a água subterrânea é captada, explorada e gerida, como demonstrado por Gonçalves, Pereira e Vieira (2018) ao analisarem sistemas aquíferos em contextos geologicamente complexos, nos quais a presença de fraturas controla a circulação da água e introduz elevada anisotropia no fluxo. Essa condição é retomada por Batista et al. (2017), ao discutir aquíferos fissurais como fontes de abastecimento, evidenciando que a produtividade desses sistemas depende de descontinuidades estruturais que não seguem padrões homogêneos, o que dificulta previsões baseadas em modelos simplificados. Ao mesmo tempo, investigações regionais como as de Santos et al. (2020) e Senhorinho et al. (2017) indicam que a caracterização hidrogeológica precisa considerar a estratigrafia e a evolução geológica das bacias sedimentares, uma vez que a disposição das camadas influencia diretamente a capacidade de armazenamento e a qualidade da água. Essa perspectiva é tensionada por Ruas (2021), ao analisar a exploração de aquíferos em escala municipal, demonstrando que a apropriação desses recursos frequentemente desconsidera a complexidade estrutural dos sistemas, resultando em práticas de uso que podem comprometer a sustentabilidade do abastecimento. A análise de Silva Pereira e Oliveira Franco (2023) acrescenta outra dimensão ao debate ao relacionar a dependência de águas subterrâneas ao contexto



urbano, evidenciando que a expansão das cidades intensifica a pressão sobre os aquíferos, não apenas em termos de volume extraído, mas também pela alteração dos processos de recarga.

A dinâmica dos aquíferos, quando inserida no contexto mais amplo da gestão dos recursos hídricos, revela tensões que ultrapassam a dimensão físico-natural, deslocando a discussão para o campo das relações entre sociedade, território e uso da água subterrânea. A interpretação proposta por Hirata et al. (2019) ao caracterizar as águas subterrâneas como uma “revolução silenciosa” permite problematizar a invisibilidade desses sistemas na agenda pública, uma vez que sua exploração crescente ocorre de forma difusa e, muitas vezes, sem monitoramento adequado, o que dificulta a percepção de impactos cumulativos. Essa invisibilidade contrasta com a centralidade que os aquíferos assumem em diversos contextos de abastecimento, especialmente em regiões onde a disponibilidade de água superficial é limitada ou irregular, o que reforça a necessidade de compreender sua dinâmica não apenas em termos hidrogeológicos, mas também institucionais e territoriais. A articulação entre os fundamentos teóricos apresentados por Feitosa e Manoel Filho (2000) e as análises sistêmicas de Freeze e Cherry (2017) permite sustentar que a gestão dos aquíferos depende da incorporação de modelos que considerem fluxos, tempos de residência e interações com a superfície, evitando abordagens fragmentadas que tratam a água subterrânea como recurso isolado. Nesse sentido, a leitura integrada proposta por Campos e Galvão (2023), ao vincular bacias hidrogeológicas à organização espacial dos fluxos, contribui para deslocar a análise para uma escala que possibilita compreender os impactos das intervenções antrópicas de forma mais abrangente, especialmente quando confrontada com evidências empíricas de diferentes regiões brasileiras, como as apresentadas por Santos et al. (2020) e Gonçalves, Pereira e Vieira (2018), que demonstram que a dinâmica aquífera responde de maneira diferenciada às pressões ambientais e às formas de uso do território, o que exige abordagens analíticas capazes de lidar com a complexidade e a variabilidade desses sistemas.

## 2.2 PROCESSOS HIDROGEOQUÍMICOS E INTERAÇÃO ÁGUA-ROCHA

A análise dos processos hidrogeoquímicos exige a compreensão de que a composição química das águas subterrâneas não resulta de um estado inicial imutável, mas de um percurso evolutivo condicionado por reações físico-químicas contínuas que ocorrem ao longo do fluxo subterrâneo, envolvendo dissolução, precipitação, troca iônica, oxidação-redução e complexação, processos que se desenvolvem em interação direta com

a matriz geológica e com as condições hidrodinâmicas do sistema. A formulação clássica apresentada por Deustch (1997) insere essa dinâmica no campo da geoquímica de soluções aquosas, destacando que a água subterrânea atua simultaneamente como agente solvente e meio de transporte, sendo sua composição determinada pelo equilíbrio químico progressivo com minerais presentes no aquífero, o que implica reconhecer que a qualidade da água é inseparável da mineralogia e da história de circulação do sistema. Essa perspectiva é tensionada quando se consideram ambientes sujeitos a interferências antrópicas, nos quais os equilíbrios naturais são perturbados, como evidenciado por Alberti (2017) ao investigar sistemas impactados por drenagem ácida associada à mineração, demonstrando que a oxidação de sulfetos promove a liberação de íons metálicos e a acidificação do meio, alterando profundamente os padrões hidrogeoquímicos e impondo uma dinâmica distinta daquela observada em sistemas naturais. A leitura desses fenômenos exige, portanto, uma abordagem que articule processos termodinâmicos e cinéticos, uma vez que a simples identificação de espécies químicas não é suficiente para explicar a evolução hidrogeoquímica, sendo necessário considerar o tempo de residência da água, a velocidade de fluxo e as condições físico-químicas locais, elementos que modulam a intensidade e a direção das reações.

A interação água-rocha, nesse contexto, não pode ser compreendida como um processo homogêneo, pois depende de variáveis como litologia, grau de fraturamento, temperatura e presença de gases dissolvidos, fatores que condicionam a natureza das reações e a composição final da água subterrânea. Estudos empíricos evidenciam que diferentes contextos geológicos produzem assinaturas hidrogeoquímicas específicas, como observado por Kuhn et al. (2018) ao analisar a bacia do rio Ibicuí, onde a predominância de determinados íons reflete a dissolução de minerais característicos das formações geológicas locais, enquanto Franzolin, Rempel e Pereira (2017) identificam padrões distintos no Aquífero Içá, associados à interação com sedimentos amazônicos, o que reforça a ideia de que a hidrogeoquímica deve ser interpretada a partir de contextos regionais. A contribuição de Brito (2022) amplia essa discussão ao comparar áreas de floresta primária e ambientes urbanos, indicando que a composição química das águas subterrâneas responde não apenas à geologia, mas também às modificações no uso do solo, que alteram a recarga, introduzem contaminantes e modificam as condições redox do sistema. Essa abordagem é aprofundada por Oliveira (2024), ao analisar áreas urbanas amazônicas, onde a presença de compostos antropogênicos interage com os processos naturais, produzindo combinações químicas que não podem ser explicadas

exclusivamente por mecanismos geogênicos, exigindo uma leitura integrada que considere tanto os processos naturais quanto as intervenções humanas. A heterogeneidade desses sistemas evidencia que a interação água-rocha não se limita a reações químicas isoladas, mas envolve um conjunto de processos interdependentes que se manifestam de forma diferenciada conforme o contexto hidrogeológico.

A incorporação de novos enfoques analíticos, como aqueles que investigam a interação entre CO<sub>2</sub>, água subterrânea e minerais, introduz uma dimensão adicional à compreensão dos processos hidrogeoquímicos, ao evidenciar que a presença de gases dissolvidos pode alterar significativamente os equilíbrios químicos e os mecanismos de dissolução mineral, como discutido por Zielinski (2024), que demonstra como a injeção ou presença natural de CO<sub>2</sub> modifica o pH, aumenta a solubilidade de certos minerais e altera a mobilidade de íons no sistema. Essa abordagem dialoga com a tradição estabelecida por Deustch (1997), mas amplia seu escopo ao considerar cenários contemporâneos associados a práticas como o armazenamento geológico de carbono, nos quais a interação água-rocha passa a ser mediada por condições artificiais que reconfiguram os processos naturais. A articulação entre esses estudos e as análises de Alberti (2017) permite identificar um ponto de convergência na compreensão de que sistemas hidrogeoquímicos são altamente sensíveis a perturbações, sejam elas naturais ou induzidas, o que coloca em questão modelos que tratam a qualidade da água subterrânea como resultado de equilíbrios estáveis. Ao mesmo tempo, a leitura integrada dos trabalhos de Kuhn et al. (2018), Brito (2022) e Oliveira (2024) evidencia que a interpretação dos dados hidrogeoquímicos requer a consideração simultânea de processos de escala microscópica, como reações minerais, e de escala macroscópica, como uso do solo e dinâmica de recarga, o que desloca a análise para um campo em que a complexidade do sistema não pode ser reduzida a relações lineares, exigindo abordagens que reconheçam a multiplicidade de fatores que condicionam a evolução química das águas subterrâneas e suas implicações para o monitoramento ambiental.

### 2.3 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E INDICADORES DE QUALIDADE DA ÁGUA

A definição e a análise dos parâmetros físico-químicos aplicados ao monitoramento da qualidade da água subterrânea implicam reconhecer que tais variáveis não constituem meros indicadores isolados, mas expressões quantitativas de processos hidrogeoquímicos que se desenvolvem ao longo do fluxo subterrâneo, refletindo tanto a



interação entre água e matriz geológica quanto as interferências decorrentes do uso do território. A mensuração de elementos como pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, íons majoritários e traços metálicos deve ser interpretada em articulação com padrões normativos que estabelecem limites de potabilidade e enquadramento ambiental, como aqueles definidos na Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) e na Resolução nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil, 2005), os quais operam como referenciais institucionais para a avaliação da adequação da água aos diferentes usos. No entanto, a leitura estritamente normativa desses parâmetros tende a obscurecer a complexidade dos sistemas subterrâneos, uma vez que valores considerados aceitáveis em termos legais podem não traduzir a estabilidade hidrogeoquímica do aquífero ou sua suscetibilidade a processos de contaminação progressiva. Nesse sentido, Sanferari (2018) propõe que a análise integrada dos parâmetros hidroquímicos deve considerar não apenas os limites estabelecidos por legislação, mas também as relações entre os constituintes químicos, permitindo identificar padrões que indicam processos como salinização, dissolução mineral ou influência antrópica, deslocando a interpretação de uma abordagem pontual para uma leitura sistêmica dos dados.

A incorporação de metodologias de classificação hidroquímica e de índices sintéticos de qualidade representa um esforço de síntese frente à multiplicidade de variáveis envolvidas na caracterização da água subterrânea, permitindo a construção de modelos interpretativos que articulam diferentes parâmetros em estruturas analíticas mais abrangentes. A proposta de Menezes et al. (2018), ao desenvolver índices de qualidade de água subterrânea, evidencia a tentativa de traduzir dados complexos em valores agregados que possibilitem comparações espaciais e temporais, embora tal procedimento implique necessariamente a atribuição de pesos e a definição de critérios que podem variar conforme o contexto hidrogeológico e os objetivos do monitoramento. Essa problemática é retomada por De Andrade Ribeiro (2024), que ao propor o IQAsub busca ajustar os parâmetros de avaliação às especificidades de áreas com potencial mineral, evidenciando que a construção de índices não pode ser dissociada das condições locais, sob pena de produzir interpretações que desconsiderem processos geoquímicos específicos. A classificação hidroquímica, conforme discutida por Mantovani et al. (2018), atua nesse mesmo sentido ao organizar as águas subterrâneas em grupos com características químicas semelhantes, permitindo inferir processos dominantes e trajetórias evolutivas, embora tal categorização dependa da qualidade dos dados e da adequação dos métodos utilizados. A análise conduzida por Venancio et al. (2020) reforça

essa perspectiva ao demonstrar que o monitoramento contínuo, associado à interpretação hidrogeoquímica, possibilita identificar variações sazonais e tendências de alteração na qualidade da água, o que não seria perceptível a partir de medições isoladas, indicando que a temporalidade dos dados constitui elemento central na avaliação dos sistemas subterrâneos.

A utilização de abordagens computacionais e modelos de inferência, como aqueles baseados em lógica fuzzy, introduz uma dimensão adicional ao tratamento dos parâmetros hidroquímicos, ao permitir lidar com incertezas e variabilidades inerentes aos dados ambientais, deslocando a análise para além de classificações rígidas e binárias. Nesse contexto, Teixeira et al. (2022) exploram a aplicação de sistemas de inferência fuzzy como ferramenta para avaliação qualitativa da água subterrânea, propondo uma leitura que considera gradientes de qualidade e relações não lineares entre os parâmetros, o que dialoga com as limitações identificadas nos modelos tradicionais de índices e classificações. A articulação entre essas abordagens e os referenciais normativos estabelecidos por Brasil (2005) e Brasil (2011) revela uma tensão entre a necessidade de padronização e a complexidade dos sistemas naturais, uma vez que os instrumentos legais operam com limites fixos, enquanto os processos hidrogeoquímicos se desenvolvem de maneira contínua e contextualizada. A integração das contribuições de Sanferari (2018), Venancio et al. (2020) e Mantovani et al. (2018) permite compreender que o monitoramento da qualidade da água subterrânea não pode ser reduzido à verificação de conformidade com padrões estabelecidos, exigindo a incorporação de análises que considerem a dinâmica dos sistemas, a variabilidade espacial e temporal dos parâmetros e as interações entre fatores naturais e antrópicos, o que implica reconhecer que a interpretação dos dados hidroquímicos constitui um processo analítico que envolve escolhas metodológicas e epistemológicas que influenciam diretamente as conclusões produzidas.

### **3. MÉTODOS DE MONITORAMENTO E ANÁLISE HIDROQUÍMICA**

#### **3.1 TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM E PRESERVAÇÃO DE AMOSTRAS**

A discussão acerca das técnicas de amostragem e preservação de amostras em estudos de água subterrânea exige o reconhecimento de que a confiabilidade dos dados hidroquímicos não se estabelece no momento analítico propriamente dito, mas se inicia na definição do desenho amostral, na seleção criteriosa dos pontos de coleta, na

compreensão das características construtivas dos poços e no controle das condições físico-operacionais que antecedem a obtenção da amostra. A coleta, nesse sentido, não pode ser tratada como etapa meramente instrumental, subordinada ao laboratório, porque é nela que se define a possibilidade de representar adequadamente a composição química da água em circulação no aquífero e não apenas o conteúdo estagnado da coluna d'água presente no interior da estrutura de captação. O Guia nacional de coleta e preservação de amostras, publicado pela ANA (2011), estabelece procedimentos voltados à minimização de interferências físico-químicas e biológicas, indicando que a amostragem deve obedecer a protocolos estritos de purga, acondicionamento, preservação e transporte, de modo a evitar alterações na composição original da amostra entre o momento da coleta e a análise. Essa normatização, entretanto, não esgota o problema, pois a própria definição do que constitui uma amostra representativa depende do conhecimento hidrogeológico prévio da área, da profundidade útil do poço, da posição do filtro, do regime de bombeamento e da eventual estratificação química da água, questão que Rodrigues e Campos (2024) tratam com precisão ao demonstrar que a ausência de informações sobre os perfis construtivos dos poços compromete a interpretação hidroquímica, já que diferentes intervalos de captação podem misturar águas de origens, idades e trajetórias geoquímicas distintas. Ao deslocarem o foco da coleta em si para a relação entre técnica amostral e arquitetura do ponto monitorado, os autores tensionam abordagens padronizadas que operam com o pressuposto de homogeneidade vertical, revelando que a qualidade do dado não decorre apenas da adoção de um protocolo formalmente correto, mas da articulação entre protocolo, contexto hidrogeológico e finalidade analítica.

Esse problema torna-se ainda mais complexo quando se observa que a amostragem em águas subterrâneas se insere em sistemas de monitoramento frequentemente marcados por descontinuidades institucionais, limitações logísticas e heterogeneidade de objetivos, circunstâncias que exigem distinguir entre procedimentos tecnicamente ideais e práticas efetivamente executadas em campo. A tese de Ramos (2021), ao examinar o monitoramento não sistemático da água subterrânea no apoio à implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos, contribui para essa discussão ao explicitar que a produção de séries históricas fragmentadas, baseadas em campanhas esporádicas e em pontos de coleta com condições operacionais desiguais, compromete a comparabilidade temporal e espacial dos resultados, fragilizando tanto o diagnóstico hidroquímico quanto a formulação de respostas de gestão. A questão, portanto, não reside apenas em coletar e preservar adequadamente uma amostra isolada,



mas em assegurar coerência metodológica entre diferentes campanhas, de forma que os dados possam ser integrados em uma leitura processual dos sistemas subterrâneos. Nessa direção, ANA (2011) enfatiza o controle de variáveis como temperatura, potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido ainda em campo, justamente porque a instabilidade de determinados parâmetros inviabiliza sua inferência posterior, ao passo que Rodrigues e Campos (2024) demonstram que o simples cumprimento dessas rotinas não supre a necessidade de interpretar a relação entre a água amostrada e a zona efetivamente monitorada. O ato de purgar, por exemplo, frequentemente entendido como etapa operacional padronizada, adquire significado distinto conforme o volume do poço, a taxa de recuperação, a conectividade hidráulica da formação e a possibilidade de indução de fluxos artificiais que alterem a composição da amostra; por isso, a noção de estabilização de parâmetros em campo não pode ser convertida em critério automático dissociado das condições específicas de cada captação. A preservação da amostra, do mesmo modo, não se reduz ao uso de frascos apropriados e reagentes conservantes, embora esses elementos sejam indispensáveis segundo ANA (2011), pois envolve também o controle do tempo entre coleta e análise, a prevenção de contaminações cruzadas, a rastreabilidade documental e a manutenção de cadeias operacionais que evitem perdas de informação ao longo do percurso entre campo e laboratório.

A dimensão epistemológica da amostragem, frequentemente obscurecida por uma leitura excessivamente procedural, emerge precisamente quando se reconhece que cada escolha técnica carrega implicações interpretativas sobre aquilo que se pretende conhecer do sistema aquífero, de modo que a preservação da integridade físico-química da amostra se vincula, em última instância, à preservação da validade da inferência científica construída a partir dela. Quando Rodrigues e Campos (2024) insistem na centralidade do conhecimento dos perfis dos poços para a leitura de dados hidroquímicos, não estão apenas propondo refinamento técnico, mas questionando a suposição de transparência entre dado coletado e realidade hidrogeológica observada, evidenciando que toda amostra é uma mediação situada entre sistema natural, estrutura de captação e protocolo operacional. A reflexão de Ramos (2021), ao tratar das limitações do monitoramento não sistemático, amplia esse argumento ao mostrar que a desarticulação entre campanhas, objetivos institucionais e critérios de coleta produz dados que, ainda que laboratorialmente válidos, podem ser analiticamente frágeis quando utilizados para subsidiar enquadramento, vigilância ou gestão. Sob esse prisma, o Guia da ANA (2011) cumpre papel normativo indispensável ao estabelecer padrões mínimos de coleta,

acondicionamento e preservação, mas sua efetividade depende de inserção em estratégias de monitoramento que levem em conta a variabilidade hidrogeológica, a função dos poços amostrados e a necessidade de consistência intertemporal dos procedimentos. A técnica de amostragem, portanto, não pode ser concebida como etapa neutra ou intercambiável, pois ela intervém diretamente na construção do objeto analítico que será posteriormente interpretado como expressão da qualidade da água subterrânea; por isso, a precisão metodológica, a leitura crítica das condições de campo e a coerência entre finalidade do estudo e desenho amostral não constituem exigências paralelas, mas dimensões de um mesmo problema de validade científica, sem o qual o monitoramento hidroquímico tende a se converter em acumulação de resultados formalmente corretos e empiricamente pouco sustentáveis.

### 3.2 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS HIDROQUÍMICOS

A determinação dos parâmetros hidroquímicos em águas subterrâneas não se restringe à obtenção de concentrações individuais de espécies químicas, mas envolve um conjunto de procedimentos analíticos que articulam técnicas laboratoriais com métodos estatísticos capazes de interpretar padrões complexos de variabilidade, exigindo que a leitura dos dados ultrapasse a dimensão descritiva para alcançar uma compreensão relacional entre os componentes do sistema. Nesse contexto, a análise multivariada emerge como estratégia metodológica que permite tratar simultaneamente um grande número de variáveis, identificando associações, tendências e agrupamentos que não seriam perceptíveis por meio de abordagens univariadas, sobretudo em sistemas hidrogeológicos nos quais múltiplos processos atuam de forma concomitante. A aplicação dessas técnicas, conforme discutido por Gomes e Cavalcante (2017), possibilita reduzir a dimensionalidade dos dados e revelar estruturas latentes que refletem tanto a influência geogênica quanto as interferências antrópicas, deslocando a análise de um conjunto disperso de parâmetros para uma interpretação integrada dos processos hidrogeoquímicos. Ao mesmo tempo, a utilização de ferramentas como análise de componentes principais e análise de agrupamento exige cautela na definição das variáveis de entrada, na padronização dos dados e na interpretação dos resultados, pois a identificação de correlações estatísticas não implica, por si só, relações causais, sendo necessário articular os achados quantitativos com o conhecimento hidrogeológico do sistema para evitar inferências inadequadas.

A incorporação da análise multivariada em estudos hidroquímicos tem sido utilizada como forma de lidar com a complexidade inerente à variabilidade espacial e temporal dos dados, especialmente em bacias sedimentares e aquíferos heterogêneos, onde a composição química da água resulta da superposição de diferentes fontes e processos. Nesse sentido, Da Costa et al. (2020) demonstram que a aplicação de métodos estatísticos multivariados permite identificar grupos de variáveis associadas a processos específicos, como dissolução de minerais, trocas iônicas ou influência de atividades humanas, evidenciando que a estrutura dos dados hidroquímicos pode ser decomposta em fatores que refletem diferentes mecanismos de controle. Essa abordagem dialoga com a proposta de Gomes e Da Franca (2019), que ao utilizarem análise multivariada para subsidiar o monitoramento da qualidade da água subterrânea, destacam a capacidade desses métodos de organizar grandes volumes de dados em padrões interpretáveis, permitindo a identificação de zonas com características hidroquímicas semelhantes e a detecção de anomalias que podem indicar processos de contaminação ou mudanças nas condições do sistema. A operacionalização dessas técnicas, entretanto, não é neutra, pois envolve decisões metodológicas relativas à escolha dos algoritmos, ao tratamento de dados ausentes, à transformação de variáveis e à definição de critérios de agrupamento, elementos que influenciam diretamente os resultados obtidos e que exigem transparência analítica e rigor na interpretação.

A articulação entre métodos analíticos laboratoriais e ferramentas estatísticas coloca em evidência a necessidade de compreender os dados hidroquímicos como construções que dependem tanto da precisão das medições quanto das estratégias de tratamento e interpretação adotadas, o que implica reconhecer que a análise multivariada não substitui o conhecimento hidrogeológico, mas o complementa ao oferecer meios de explorar relações complexas entre variáveis. A leitura integrada proposta por Gomes e Cavalcante (2017) e aprofundada por Da Costa et al. (2020) sugere que a identificação de padrões estatísticos deve ser continuamente confrontada com hipóteses hidrogeoquímicas plausíveis, evitando a reificação de resultados matemáticos como se fossem representações diretas da realidade natural. Ao mesmo tempo, a contribuição de Gomes e Da Franca (2019) evidencia que o uso dessas ferramentas pode ampliar a capacidade de monitoramento, permitindo detectar tendências e variações que escapariam a análises convencionais, desde que os resultados sejam interpretados à luz das condições locais e das limitações dos métodos empregados. Nesse cenário, a determinação de parâmetros hidroquímicos deixa de ser entendida como etapa final de um processo analítico para se



constituir como parte de um ciclo interpretativo contínuo, no qual coleta, análise laboratorial e tratamento estatístico se articulam de forma indissociável, produzindo conhecimento que depende da coerência entre procedimentos técnicos e leitura crítica dos dados, o que desloca a discussão metodológica para um plano em que a validade dos resultados está diretamente vinculada à capacidade de integrar diferentes níveis de análise sem reduzir a complexidade dos sistemas subterrâneos.

### 3.3 ÍNDICES DE QUALIDADE DA ÁGUA E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A construção de índices de qualidade da água subterrânea insere-se em um campo metodológico que busca sintetizar, em estruturas numéricas ou classificatórias, a multiplicidade de parâmetros hidroquímicos e ambientais que caracterizam os sistemas aquíferos, operando como dispositivos analíticos que articulam medições pontuais em interpretações integradas. Essa tentativa de síntese, entretanto, não pode ser compreendida como um procedimento neutro, uma vez que a seleção de variáveis, a definição de pesos relativos e a escolha de intervalos de classificação implicam decisões epistemológicas que condicionam diretamente os resultados obtidos e a forma como estes serão interpretados. A análise desenvolvida por Laureano (2020), ao propor diagnósticos hidroquímicos em escala de microbacia, evidencia que a utilização de índices permite organizar dados dispersos em padrões compreensíveis, favorecendo a identificação de áreas com maior comprometimento da qualidade da água, mas também revela que tais instrumentos dependem da adequação ao contexto hidrogeológico específico, sob pena de obscurecer processos locais relevantes. Nesse sentido, a leitura dos índices deve ser acompanhada por uma análise crítica de seus pressupostos, considerando que a agregação de variáveis pode mascarar relações importantes entre parâmetros individuais, especialmente em sistemas onde múltiplos processos atuam de forma simultânea, como dissolução mineral, recarga diferenciada e influência antrópica. A tensão entre simplificação analítica e complexidade hidrogeoquímica, portanto, constitui elemento central na discussão sobre índices de qualidade, exigindo que sua aplicação seja constantemente confrontada com dados empíricos e com o conhecimento das dinâmicas locais.

A interpretação dos resultados derivados desses índices não pode ser dissociada das condições ambientais e dos processos hidrogeológicos que os produzem, o que implica deslocar o foco da classificação em si para a compreensão das relações que sustentam os valores obtidos. O estudo conduzido por Lopes (2021), ao analisar a água

subterrânea em contexto regional, demonstra que a aplicação de índices de qualidade permite identificar variações espaciais associadas tanto a fatores naturais quanto a intervenções humanas, evidenciando que áreas com valores semelhantes podem resultar de processos distintos, o que desafia interpretações baseadas exclusivamente na classificação final. Essa constatação dialoga com a necessidade de integrar a análise de índices com informações sobre uso do solo, características geológicas e padrões de recarga, de modo a evitar leituras que tratem os resultados como representações diretas da realidade sem considerar os mecanismos que os produzem. A própria noção de qualidade da água, nesse contexto, revela-se dependente de critérios que variam conforme o uso pretendido, o que implica reconhecer que a interpretação dos índices deve considerar não apenas a condição atual do sistema, mas também sua adequação a diferentes demandas, sejam elas de abastecimento, irrigação ou preservação ambiental. Ao mesmo tempo, a variabilidade temporal dos parâmetros hidroquímicos introduz outra camada de complexidade, pois índices calculados a partir de campanhas pontuais podem não capturar oscilações sazonais ou tendências de longo prazo, exigindo que a análise seja inserida em estratégias de monitoramento contínuo que permitam acompanhar a evolução dos sistemas aquíferos.

A articulação entre índices de qualidade e avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos introduz uma dimensão prospectiva à interpretação dos resultados, deslocando a análise de uma condição estática para a consideração de riscos e potenciais de degradação futura. Nesse sentido, Oliveira Franco (2020) ao discutir a vulnerabilidade natural dos aquíferos, propõe que a qualidade da água não deve ser interpretada apenas a partir de sua composição atual, mas também em função da susceptibilidade do sistema a processos de contaminação, considerando fatores como profundidade do nível freático, tipo de solo, litologia e condições de recarga. Essa abordagem permite tensionar a utilização de índices de qualidade como instrumentos exclusivamente descritivos, sugerindo que sua interpretação deve ser integrada a modelos que considerem a dinâmica do sistema e sua exposição a pressões antrópicas. A leitura combinada das contribuições de Laureano (2020), Lopes (2021) e Oliveira Franco (2020) indica que a análise da qualidade da água subterrânea exige a articulação entre síntese numérica, interpretação hidrogeológica e avaliação de risco, evitando tanto a redução da complexidade dos dados a classificações simplificadas quanto a dispersão analítica que impede a identificação de padrões. Nesse cenário, os índices de qualidade operam como ferramentas intermediárias que, ao mesmo tempo em que organizam a informação, demandam interpretação crítica

continua, na medida em que sua eficácia depende da capacidade de relacionar os valores obtidos com os processos que estruturam o funcionamento dos aquíferos e com as condições que podem alterar sua dinâmica ao longo do tempo.

## **4. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E APLICAÇÕES PRÁTICAS**

### **4.1 CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA E ENQUADRAMENTO DA ÁGUA**

A classificação hidroquímica da água subterrânea constitui uma operação analítica por meio da qual a composição iônica das amostras deixa de ser compreendida como mera soma de concentrações isoladas e passa a ser interpretada como expressão de processos geoquímicos, trajetórias de circulação e condicionantes ambientais que estruturam o funcionamento dos sistemas aquíferos. Ao se examinar a distribuição relativa de cátions e ânions majoritários, torna-se possível identificar famílias hidroquímicas, reconhecer padrões de evolução da água ao longo do fluxo subterrâneo e inferir a influência de mecanismos como dissolução mineral, troca iônica, mistura de águas e aporte de fontes externas, razão pela qual a classificação não se reduz a um exercício taxonômico, mas se converte em instrumento de leitura do próprio sistema hidrogeológico. Nessa direção, Mantovani et al. (2018), ao associarem monitoramento da qualidade da água e classificação hidroquímica, evidenciam que o enquadramento das amostras em tipos químicos específicos permite compreender com maior precisão a distribuição espacial dos padrões de qualidade e as diferenças existentes entre setores submetidos a distintos usos do solo, o que desloca a análise de uma perspectiva exclusivamente normativa para um plano interpretativo mais denso. Essa passagem é metodologicamente significativa porque a classificação hidroquímica não busca apenas informar se um parâmetro está acima ou abaixo de determinado limite, mas interrogar de que modo a composição observada foi produzida e quais processos explicam sua persistência ou transformação. Sob esse prisma, o enquadramento da água, quando articulado à classificação hidroquímica, deixa de operar como simples ajuste a faixas legais e passa a exigir a compreensão da qualidade em sua dimensão processual, isto é, como resultado de interações permanentes entre litologia, tempo de residência, recarga, circulação e intervenções antrópicas.

A interpretação hidrogeoquímica, entretanto, não pode ser dissociada das condições empíricas do monitoramento, uma vez que a confiabilidade da classificação

depende da densidade da malha amostral, da consistência temporal das coletas e da capacidade de integrar dados químicos com informações hidrogeológicas e territoriais. O estudo de Venancio et al. (2020), ao tratar do monitoramento hidrogeoquímico das águas subterrâneas, explicita que a classificação das amostras só adquire densidade explicativa quando inserida em séries de observação que permitam captar variações sazonais, tendências espaciais e alterações induzidas por pressões ambientais, evitando a cristalização de leituras construídas a partir de situações pontuais. Isso significa que o enquadramento da água não pode ser concebido como ato fixo e definitivo, pois a própria composição hidroquímica é sensível às oscilações do regime de recarga, às mudanças no uso do território e às transformações nos padrões de exploração do aquífero. Nesse ponto, o diálogo entre Venancio et al. (2020) e Mantovani et al. (2018) é particularmente fecundo, porque ambos os trabalhos sugerem, ainda que por caminhos distintos, que a classificação hidroquímica funciona como mediação entre dado químico e interpretação ambiental, permitindo reconhecer tanto padrões de naturalidade quanto sinais de alteração progressiva do sistema. Quando determinados tipos de água passam a predominar em contextos onde se esperariam composições distintas, ou quando a distribuição iônica revela combinações atípicas em relação à geologia local, a classificação deixa de desempenhar função apenas descritiva e passa a atuar como alerta analítico para possíveis processos de contaminação, mistura artificial ou reconfiguração do equilíbrio geoquímico. Por isso, a prática do enquadramento demanda prudência metodológica, já que categorias hidroquímicas semelhantes podem emergir de processos diferentes, e águas enquadradas em uma mesma classe sob o ponto de vista legal podem expressar trajetórias ambientais profundamente distintas.

A relação entre classificação hidroquímica e enquadramento da água, portanto, não se resolve na aplicação de esquemas diagramáticos ou na comparação automática com padrões estabelecidos, mas requer uma leitura crítica capaz de articular composição química, contexto hidrogeológico e finalidade de uso, reconhecendo que a qualidade da água subterrânea se constitui em um campo de interpretação no qual dimensões técnicas, normativas e territoriais se entrecruzam. Mantovani et al. (2018) contribuem para essa compreensão ao vincularem a classificação hidroquímica ao monitoramento da qualidade, sugerindo que o tipo químico da água pode funcionar como chave de leitura para entender permanências e deslocamentos no comportamento do sistema, enquanto Venancio et al. (2020) reforçam a necessidade de associar essa leitura a observações continuadas, sem as quais a identificação de tendências se torna analiticamente frágil. Essa articulação permite

sustentar que o enquadramento não deve ser tomado como simples procedimento de conformidade, porque a adequação de uma água a determinado uso depende não apenas do atendimento a limites quantitativos, mas da compreensão dos processos que mantêm ou ameaçam essa condição ao longo do tempo. Em outras palavras, a classificação hidroquímica oferece subsídios para interpretar o presente químico da água, ao passo que o enquadramento, quando lido criticamente, projeta implicações sobre sua governança, sua utilização e sua vulnerabilidade futura. É nesse ponto que a análise ultrapassa o formalismo classificatório e se desloca para uma leitura estrutural dos sistemas subterrâneos, na qual o monitoramento hidrogeoquímico deixa de ser mero inventário de parâmetros e passa a constituir um instrumento de interpretação ambiental voltado à compreensão das relações entre circulação da água, transformações do meio e limites de sustentação do uso humano.

#### 4.2 CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS E PRINCIPAIS FONTES ANTRÓPICAS

A contaminação de aquíferos deve ser compreendida como resultado de uma articulação complexa entre características intrínsecas dos sistemas hidrogeológicos e pressões externas derivadas de atividades humanas, o que implica reconhecer que a presença de contaminantes não decorre exclusivamente da introdução de poluentes, mas da interação entre fontes de carga contaminante e a capacidade do meio em atenuar, retardar ou permitir a propagação dessas substâncias ao longo do fluxo subterrâneo. A noção de vulnerabilidade aquífera emerge, nesse contexto, como categoria analítica que permite interpretar a suscetibilidade dos aquíferos à infiltração e ao transporte de contaminantes, considerando fatores como profundidade do nível freático, permeabilidade do solo, características litológicas e condições de recarga, elementos que modulam a eficiência dos processos de proteção natural do sistema. Estudos como o de Terra et al. (2016) evidenciam que a estimativa da vulnerabilidade não se reduz a um exercício cartográfico, mas constitui instrumento para compreender como diferentes compartimentos hidrogeológicos respondem de forma diferenciada à pressão antrópica, enquanto Santos e Lorandi (2017) demonstram que a heterogeneidade das unidades aquíferas influencia diretamente a forma como os contaminantes se dispersam, podendo acelerar ou retardar sua migração conforme as propriedades do meio. Essa leitura é aprofundada por Borges, Athayde e Reginato (2017), ao analisarem o Aquífero Serra Geral, onde a presença de fraturas e descontinuidades estruturais redefine os padrões de fluxo e amplia a complexidade dos processos de contaminação, evidenciando que



sistemas fraturados apresentam comportamentos distintos daqueles observados em meios porosos homogêneos, o que exige abordagens analíticas capazes de lidar com essa variabilidade estrutural.

A identificação das principais fontes antrópicas de contaminação exige deslocar o foco da análise para as formas de uso e ocupação do território, uma vez que atividades como disposição inadequada de resíduos sólidos, lançamento de efluentes sem tratamento, uso intensivo de fertilizantes e agrotóxicos, além da expansão urbana desordenada, configuram vetores de introdução de substâncias potencialmente nocivas no sistema subterrâneo. A análise de Fonseca (2022) evidencia que a ausência de infraestrutura de saneamento constitui um dos principais fatores de degradação da qualidade da água subterrânea, na medida em que a infiltração de efluentes domésticos promove a introdução de compostos orgânicos, nutrientes e microrganismos patogênicos, alterando a composição química e biológica da água. Esse quadro é tensionado por estudos que destacam a influência de atividades industriais e agrícolas, nas quais a carga contaminante pode incluir metais pesados, compostos orgânicos persistentes e substâncias de elevada mobilidade, ampliando os riscos de contaminação difusa. Cardoso et al. (2018), ao investigarem aquíferos semiconfinados, demonstram que mesmo sistemas considerados parcialmente protegidos podem ser afetados por fontes antrópicas, especialmente quando há falhas na camada de confinamento ou quando processos de recarga facilitam a percolação de contaminantes. Essa condição é retomada por Peixoto e Cavalcante (2019), que ao analisarem a relação entre vulnerabilidade e risco de contaminação, indicam que a presença de fontes poluidoras em áreas de alta vulnerabilidade potencializa a degradação da qualidade da água, evidenciando que a avaliação do risco deve considerar simultaneamente a susceptibilidade do meio e a intensidade das pressões antrópicas.

A articulação entre vulnerabilidade natural e perigo de contaminação permite compreender que a degradação dos aquíferos não se distribui de forma homogênea, mas resulta da convergência entre condições hidrogeológicas e padrões de uso do solo, o que implica reconhecer que áreas com características semelhantes podem apresentar níveis distintos de comprometimento conforme a intensidade das atividades humanas. Montero et al. (2017) ao discutirem o perigo de contaminação, enfatizam que a simples identificação de áreas vulneráveis não é suficiente para explicar a ocorrência de impactos, sendo necessário considerar a presença efetiva de fontes contaminantes e a dinâmica de transporte das substâncias no meio subterrâneo. Essa perspectiva é ampliada por Belfort

e Mendes (2025), que ao avaliarem a vulnerabilidade da água subterrânea em contextos específicos, evidenciam que a interação entre fatores naturais e antrópicos produz cenários diferenciados de risco, nos quais a gestão dos recursos hídricos deve incorporar não apenas diagnósticos estáticos, mas também estratégias de monitoramento e controle capazes de antecipar processos de degradação. A leitura integrada das contribuições de Borges, Athayde e Reginato (2017), Cardoso et al. (2018) e Peixoto e Cavalcante (2019) indica que a compreensão da contaminação de aquíferos exige superar abordagens fragmentadas que tratam fontes de poluição e características do meio como elementos dissociados, evidenciando que a qualidade da água subterrânea resulta de um sistema de interações no qual processos físicos, químicos e sociais se entrelaçam, produzindo dinâmicas que desafiam modelos simplificados e exigem abordagens analíticas capazes de captar a complexidade dos sistemas hidrogeológicos em contextos de crescente pressão antrópica.

#### 4.3 ESTRATÉGIAS DE GESTÃO, CONTROLE E PROTEÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

A gestão dos recursos hídricos subterrâneos, no contexto brasileiro, encontra-se estruturada a partir de um arcabouço normativo que redefine a água como bem de domínio público e recurso dotado de valor econômico, deslocando sua compreensão de elemento natural abundante para componente estratégico sujeito a planejamento, regulação e controle. A Lei nº 9.433 (Brasil, 1997) institui a Política Nacional de Recursos Hídricos ao estabelecer princípios como a gestão descentralizada e participativa, a integração entre usos múltiplos e a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento, o que implica reconhecer que a governança da água subterrânea não pode ser dissociada das dinâmicas superficiais e das interações entre diferentes setores usuários. Essa perspectiva, entretanto, introduz tensões operacionais, uma vez que os aquíferos apresentam características que desafiam a delimitação espacial tradicional das bacias, exigindo abordagens que articulem critérios hidrogeológicos com instrumentos institucionais concebidos originalmente para águas superficiais. A análise da Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil (ANA, 2019) evidencia que o uso crescente das águas subterrâneas ocorre, em grande medida, de forma difusa e com baixa visibilidade institucional, o que dificulta o monitoramento sistemático e a aplicação efetiva dos instrumentos de gestão previstos na legislação, como outorga, enquadramento e cobrança pelo uso da água. Nesse cenário, a gestão dos aquíferos exige não apenas a aplicação de normas, mas a construção

de mecanismos capazes de lidar com a invisibilidade física e a dispersão dos pontos de captação, elementos que tensionam a capacidade de controle estatal e demandam estratégias que integrem conhecimento técnico, instrumentos regulatórios e participação social.

A incorporação de abordagens baseadas em gestão integrada dos recursos hídricos amplia essa discussão ao propor que a proteção dos aquíferos deve ser compreendida como parte de um sistema mais amplo de interações entre água, território e atividades humanas, no qual decisões sobre uso do solo, ocupação urbana e práticas produtivas influenciam diretamente a disponibilidade e a qualidade da água subterrânea. Monção e Veloso (2021) argumentam que a gestão integrada implica superar a fragmentação institucional e promover a articulação entre diferentes escalas de governança, de modo a considerar simultaneamente aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos, o que se torna particularmente relevante no caso dos aquíferos, cuja recarga depende de processos que ocorrem na superfície e cuja contaminação pode resultar de múltiplas fontes difusas. A análise da ANA (2019) reforça essa necessidade ao apontar que a expansão do uso de águas subterrâneas está frequentemente associada a contextos de escassez hídrica superficial ou de deficiência na infraestrutura de abastecimento, o que leva à intensificação da exploração sem o devido acompanhamento técnico. Essa condição evidencia que estratégias de gestão não podem se limitar à regulação do uso, sendo necessário incorporar ações de proteção que atuem sobre as causas estruturais da pressão sobre os aquíferos, como o planejamento urbano, o controle de fontes poluidoras e a promoção de práticas sustentáveis de uso da água. A integração entre instrumentos legais e políticas públicas, nesse sentido, não constitui apenas uma diretriz normativa, mas uma exigência operacional para lidar com a complexidade dos sistemas hidrogeológicos em contextos de uso intensivo e de múltiplos interesses.

A utilização de geotecnologias emerge como componente estratégico no aprimoramento das ações de monitoramento, controle e proteção dos recursos hídricos subterrâneos, ao possibilitar a espacialização de dados, a análise integrada de variáveis ambientais e a identificação de áreas mais suscetíveis à exploração excessiva ou à contaminação. Ayer, Garofalo e Pereira (2017) demonstram que o uso de ferramentas como sistemas de informações geográficas e modelagem espacial permite avaliar a favorabilidade hidrogeológica e subsidiar a tomada de decisão em relação à localização de poços, ao zoneamento de áreas de proteção e à definição de prioridades de monitoramento, enquanto Alves, Cordeiro e Milo (2019) evidenciam que a aplicação

dessas tecnologias em estudos de águas subterrâneas contribui para a compreensão da distribuição espacial dos aquíferos e de suas condições de uso. A incorporação dessas ferramentas, entretanto, não elimina as limitações inerentes à gestão dos aquíferos, uma vez que a qualidade dos resultados depende da disponibilidade de dados confiáveis e da capacidade institucional de integrar informações provenientes de diferentes fontes. A articulação entre os instrumentos previstos na Lei nº 9.433 (Brasil, 1997), as diretrizes de monitoramento apontadas pela ANA (2019) e as possibilidades analíticas oferecidas pelas geotecnologias indica que a proteção dos recursos hídricos subterrâneos exige uma abordagem que combine regulação, conhecimento técnico e inovação metodológica, de modo a enfrentar os desafios impostos pela invisibilidade dos sistemas aquíferos e pela crescente pressão decorrente das atividades humanas, o que implica reconhecer que a gestão da água subterrânea se constitui como campo em constante transformação, no qual a eficácia das estratégias adotadas depende da capacidade de integrar diferentes dimensões do problema em um quadro analítico coerente e operacionalmente viável.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A reflexão desenvolvida ao longo deste estudo evidencia que o monitoramento da qualidade da água subterrânea por meio de parâmetros hidroquímicos não pode ser reduzido a uma operação técnica de mensuração e classificação, mas deve ser compreendido como um campo analítico complexo no qual se entrecruzam processos naturais, dinâmicas antrópicas e dispositivos metodológicos de interpretação, de modo que o problema central da pesquisa, relativo à compreensão da qualidade da água subterrânea em sua dimensão processual e não apenas normativa, exige a superação de abordagens fragmentadas que tratam os dados como entidades isoladas. Ao retomar os objetivos propostos, observa-se que a investigação buscou articular fundamentos hidrogeológicos, processos hidrogeoquímicos, técnicas de amostragem, métodos analíticos e instrumentos de interpretação, o que permitiu construir uma leitura integrada na qual a qualidade da água emerge como resultado de interações contínuas entre matriz geológica, circulação hídrica e usos do território. Nesse percurso, a análise demonstrou que os parâmetros hidroquímicos, quando interpretados de forma relacional, oferecem não apenas um retrato das condições atuais do aquífero, mas também indícios dos processos que estruturam sua evolução, o que implica reconhecer que a resposta à pergunta de pesquisa não reside na identificação de valores isolados, mas na capacidade de compreender os mecanismos que produzem tais valores e suas variações ao longo do

tempo e do espaço. Essa inflexão analítica desloca a discussão da conformidade com padrões legais para a compreensão da dinâmica dos sistemas subterrâneos, permitindo afirmar que o monitoramento hidroquímico, quando adequadamente conduzido, constitui instrumento capaz de revelar tanto a estabilidade quanto as tensões que atravessam os aquíferos em contextos de crescente pressão antrópica.

A síntese crítica dos achados evidencia que a qualidade da água subterrânea não pode ser compreendida sem a integração entre diferentes níveis de análise, uma vez que os processos hidrogeoquímicos, ao mesmo tempo em que refletem interações físico-químicas entre água e rocha, são também influenciados por fatores externos como uso do solo, práticas produtivas e ausência de infraestrutura de saneamento, configurando um cenário no qual a distinção entre processos naturais e antrópicos se torna progressivamente mais tênue. A articulação entre técnicas de amostragem e métodos analíticos revelou que a produção do dado hidroquímico depende de escolhas metodológicas que influenciam diretamente a interpretação dos resultados, de modo que a confiabilidade das conclusões está condicionada à coerência entre coleta, preservação e análise estatística, o que reforça a necessidade de rigor técnico em todas as etapas do monitoramento. A utilização de índices de qualidade e classificações hidroquímicas, por sua vez, demonstrou potencial para organizar e sintetizar informações complexas, mas também evidenciou limites associados à simplificação de sistemas altamente heterogêneos, exigindo que tais instrumentos sejam utilizados como mediações interpretativas e não como representações absolutas da realidade. Nesse sentido, a resposta analítica à questão de pesquisa indica que a qualidade da água subterrânea deve ser interpretada como construção dinâmica, dependente de múltiplos fatores interdependentes, o que exige abordagens que integrem dados empíricos, modelos analíticos e conhecimento hidrogeológico, evitando tanto a fragmentação quanto a redução da complexidade dos sistemas.

As contribuições teóricas deste estudo residem na articulação entre diferentes campos do conhecimento, ao integrar fundamentos da hidrogeologia, geoquímica, estatística e gestão ambiental em uma perspectiva analítica que enfatiza a interdependência entre processos naturais e ações humanas, permitindo avançar na compreensão da água subterrânea como componente ativo dos sistemas ambientais e não como recurso passivo disponível para exploração. No plano prático, a investigação oferece subsídios para o aprimoramento de estratégias de monitoramento e gestão, ao evidenciar a necessidade de integrar técnicas de coleta, análise e interpretação em



protocolos consistentes que considerem a variabilidade espacial e temporal dos aquíferos, bem como as especificidades de cada contexto hidrogeológico. Entretanto, o estudo também reconhece limitações relacionadas à dependência de dados secundários, à heterogeneidade das metodologias empregadas nas diferentes pesquisas analisadas e à dificuldade de generalização dos resultados para contextos distintos, uma vez que os sistemas aquíferos apresentam comportamentos altamente específicos condicionados por suas características geológicas e pelas formas de uso do território. Essas limitações não invalidam os achados, mas indicam a necessidade de cautela na extrapolação das conclusões e reforçam a importância de investigações empíricas contínuas que permitam aprofundar a compreensão dos processos hidrogeoquímicos em diferentes escalas.

A partir desse conjunto de reflexões, delineiam-se caminhos para pesquisas futuras que possam ampliar e aprofundar as análises aqui desenvolvidas, especialmente no que se refere à incorporação de séries temporais mais extensas, à integração de técnicas avançadas de modelagem hidrogeoquímica e ao uso de ferramentas geoespaciais capazes de representar com maior precisão a variabilidade dos sistemas subterrâneos. A ampliação do diálogo entre estudos hidrogeológicos e políticas públicas também se apresenta como campo fértil para investigações, na medida em que a efetividade das estratégias de gestão depende da capacidade de traduzir conhecimentos técnicos em instrumentos operacionais que orientem o uso sustentável dos recursos hídricos. Nesse sentido, a análise realizada aponta para a necessidade de desenvolver abordagens que articulem monitoramento hidroquímico com avaliação de vulnerabilidade e risco, permitindo não apenas diagnosticar a qualidade da água, mas antecipar cenários de degradação e orientar ações preventivas. Ao integrar esses elementos em uma perspectiva analítica coerente, torna-se possível avançar na construção de modelos de gestão que reconheçam a complexidade dos aquíferos e a multiplicidade de fatores que condicionam sua qualidade, deslocando a discussão para um plano no qual o conhecimento científico e a prática institucional se articulam na busca por soluções que enfrentem de forma consistente os desafios associados à proteção e ao uso dos recursos hídricos subterrâneos.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2019: Informe Anual. Brasília: ANA, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos. Brasília: ANA, 2011.

ALBERTI, Heber Luiz Caponi. **Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas impactadas pela drenagem ácida da mina de urânio-Osamu Utsumi, planalto de Poços de Caldas (MG)**. 2017. Tese de Doutorado. [sn].

ALVES, Marcela Almeida; CORDEIRO, Marcos Rodrigues; MILO, Renan Laughton. Ocorrência das águas subterrâneas no município de Montes Claros-MG: um estudo de caso utilizando a geotecnologia. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 1, 2019.

AYER, Joaquim Ernesto Bernardes; GAROFALO, Danilo Francisco Trovo; PEREIRA, Sueli Yoshinaga. Uso de geotecnologias na avaliação da favorabilidade hidrogeológica em aquíferos fraturados. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 3, p. 154-167, 2017.

BATISTA, Mariana de Oliveira et al. O abastecimento de água na cidade de Vieirópolis: a importância dos aquíferos fissurais. 2017.

BELFORT, Bruna Roberta Floriana Oliveira; MENDES, Jonas Jansen. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE E DA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM ÁREAS DE INFLUÊNCIA DO RIO GANGAN, EM SÃO LUÍS-MA. **ARACÊ**, v. 7, n. 2, p. 7706-7722, 2025.

BORGES, Vinícius Menezes; ATHAYDE, Gustavo Barbosa; REGINATO, Pedro Antônio Roehe. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná-Brasil. **Águas subterrâneas**, v. 31, n. 4, p. 327-337, 2017.

BRASIL, Ministério da Saúde. Portaria no 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 2011.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 357, 17 de março de 2005.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990. Diário Oficial da União, Brasília, 9 jan. 1997.

BRITO, Walter Lucas Pimentel de. Hidroquímica da água subterrânea em área de floresta primária e em área urbana. 2022.

CAMPOS, José Eloi; GALVÃO, Manuela Freire. Bacias hidrogeológicas: conceitos e aplicações. **Derbyana**, v. 44, 2023.

CARDOSO, Raisia Nicole Campos et al. Análise da vulnerabilidade e do risco à contaminação de aquíferos semiconfinados na Ilha de Cotijuba/PA. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 2, 2018.

DA COSTA, Celme Torres F. et al. Análise multivariada aplicada ao estudo hidroquímico das águas subterrâneas na bacia sedimentar do Araripe—CE. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 2, 2020.

DE ANDRADE RIBEIRO, Lívia. Proposição de índice de qualidade de água subterrânea (IQAsub) para aplicação em áreas com potencial minerário. 2024.

DEUSTCH, William J. Groundwater geochemistry fundamentals and applications to contamination. USA: CRC, 1997.

FEITOSA, Fernando. A.; MANOEL FILHO, João. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 2. ed. Fortaleza, CE: CPRM, 2000.

FERNANDES, Fabiana Martins. Ilhas interdisciplinares de racionalidade: uma proposta para o estudo da importância da água. 2017.

FONSECA, Sanara do Nascimento. Águas subterrâneas: a importância e os perigos que podem ocorrer pela falta de saneamento na cidade de Santa Quitéria do Maranhão. 2022.

FRANZOLIN, Thiago Affonso; REMPEL, Katarina; PEREIRA, Luiz Antônio da Costa. Caracterização hidroquímica das águas subterrâneas do sistema Aquífero Içá em Cruzeiro do Sul, AC. 2017.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. Águas Subterrâneas. Tradução Everton de Oliveira et al. São Paulo: Everton de Oliveira, 2017. 698p.

GOMES, Maria da Conceição Rabelo; CAVALCANTE, Itabaraci Nazareno. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água subterrânea. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 1, p. 134-149, 2017.

GOMES, Maria da Conceição Rabelo; DA FRANCA, Raimunda Moreira. Uso da análise multivariada para subsidiar no monitoramento da qualidade da água subterrânea na bacia sedimentar do Araripe, sul do estado do Ceará. **Geosciences= Geociências**, v. 38, n. 1, p. 195-205, 2019.

GONÇALVES, JOSÉ AUGUSTO COSTA; PEREIRA, PEDRO HENRIQUE RODRIGUES; VIEIRA, ELIANE MARIA. SISTEMAS AQUÍFEROS: HIDROGEOLOGIA DA PORÇÃO NORDESTE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO NA REGIÃO DE ITABIRA (MG). **Águas Subterrâneas**, 2018.

**hidrogeologia**. Oficina de textos, 2016.

HIRATA, Ricardo et al. A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. 2019.

KUHN, Isadora Aumond et al. Hidroquímica das águas subterrâneas da bacia hidrográfica do rio Ibicuí (RS). 2018.

LAUREANO, Josilena de Jesus. Diagnóstico da Água Subterrânea na microbacia do Igarapé Nazaré (Ji-Paraná, RO): Subsídios para o enquadramento. 2020.

LOPES, Daíse da Silva. Estudo da água subterrânea no município de Jaru, Rondônia. 2021.

MANTOVANI, DANIEL et al. MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA COM CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA DA BACIA DO RIO PIRAPÓ NA CIDADE DE MARINGÁ-PR. **Journal of Exact Sciences**, v. 18, n. 1, 2018.

MENEZES, Juliana Magalhães et al. Índice de Qualidade de Água Subterrânea. In: **XIX World Water Congress, Porto de Galinhas**. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/42893/1/PAP00-5061.pdf>. Accessed. 2018.

MONÇÃO, Alexandre Genildo Monção; VELOSO, Rômulo. AA importância das águas subterrâneas para a gestão integrada dos recursos hídricos: captação, controle e monitoramento na bacia do rio Verde Grande. **Águas Subterrâneas**, v. 35, n. 1, 2021.

MONTERO, Rafael Carrion et al. Vulnerabilidade e perigo de contaminação dos aquíferos no Alto Aguapeí e Alto Peixe, SP. **Ciência & Engenharia**, v. 22, n. 1, p. 115-124, 2017.

OLIVEIRA BRAGA, Antonio Celso. **Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em**

OLIVEIRA FRANCO, Alexsande. Vulnerabilidade natural de aquíferos e a potencial contaminação dos recursos hídricos subterrâneos no Estado do Acre. **Águas Subterrâneas**, 2020.

OLIVEIRA, Ludimila Souza. Hidroquímica da água subterrânea na zona urbana de Manacapuru, Amazonas, Brasil. 2024.

PEIXOTO, Filipe da Silva; CAVALCANTE, Itabaraci Nazareno. Vulnerabilidade aquífera e risco de contaminação da água subterrânea em meio urbano. 2019.

RAMOS, Camila Andréa. **Monitoramento não sistemático de qualidade de água subterrânea no apoio a implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos**. 2021. Tese de Doutorado. Universidade Regional de Blumenau (Brazil).

**relativamente à ocorrência, importância e gestão da água subterrânea nos Açores**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade dos Açores (Portugal).

RODRIGUES, Drielly Souza; CAMPOS, José Eloi Guimarães. Amostragem em estudos hidroquímicos e isotópicos em águas subterrâneas: a importância do conhecimento dos perfis dos poços para a interpretação de dados. **Derbyana**, v. 45, 2024.

RODRIGUES, Raquel Maria Pereira. **Percepção de estudantes da Universidade dos Açores**

RUAS, KELI SIQUEIRA. OCORRÊNCIA E EXPLORAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO MUNICÍPIO DE PEDRAS ALTAS (RS). **Revista Mirante (ISSN 1981-4089)**, v. 14, n. 1, p. 143-164, 2021.

SANFERARI, Amanda. AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDROQUÍMICOS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE POÇOS TUBULARES NO MUNICÍPIO DE CARLOS BARBOSA (RS). 2018.

SANTOS, Gabriel Irvine Ferreira Alves et al. Levantamento das características hidrogeológicas do Aquífero Bar-reiras e Itapecuru na bacia hidrográfica do Rio Paciência-MA. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 1, 2020.

SANTOS, Vanderley Severino; LORANDI, Reinaldo. Características hidrogeológicas e vulnerabilidade à contaminação das unidades aquíferas da bacia hidrográfica dos Córregos Amaral e Brilhante-Jaciara (MT). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 05, p. 1624-1637, 2017.

SENHORINHO, Eliel Martins et al. Características hidrogeológicas dos aquíferos da sub-bacia 84-região sul e sudeste de Santa Catarina. 2017.

SILVA PEREIRA, Jessiane; OLIVEIRA FRANCO, Alexsande. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUA IMPORTÂNCIA PARA O ABASTECIMENTO NA CIDADE DE RIO BRANCO-ACRE. **UÁQUIRI-Revista do Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal do Acre**, v. 5, n. 1, 2023.

SOUZA OLIVEIRA, Ludimila. Hidroquímica da água subterrânea na zona urbana de Manacapuru, Amazonas, Brasil. 2024.

TEIXEIRA, Lidiane Marinho et al. Análise qualitativa de água subterrânea utilizando sistema de inferência Fuzzy. 2022.

TERRA, Lueni Gonçalves et al. Estimativa da vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero no município de São Sepé-RS. **Revista Monografias Ambientais**, v. 15, n. 1, p. 85-93, 2016.

VENANCIO, Letycia Oliveira et al. MONITORAMENTO DA QUALIDADE E HIDROGEOQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SETOR NOROESTE DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA/CE. **Geochimica Brasiliensis**, v. 34, n. 2, p. 138-160, 2020.

ZIELINSKI, João Pedro Tauscheck. Avaliação hidrogeoquímica da interação CO<sub>2</sub>-água subterrânea-mineral em aquífero raso: implicações para o monitoramento ambiental em projetos de armazenamento geológico de carbono (CCS). 2024.



## O IMPACTO DO USO DE BIOESTIMULANTES NA PRODUTIVIDADE E NA RESILIÊNCIA HÍDRICA DA CULTURA DA SOJA EM SOLOS DE CERRADO.



10.5281/zenodo.19855988

**Joacir Moraes.**

Graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) (2007–2012). Possui mestrado em Agronomia/Fitotecnia (2017–2019) e doutorado em Ciências Agrárias (2020–2024), ambos pela Universidade Federal do Piauí (UFPI). Atua na área de Ciências Agrárias, com ênfase em produção vegetal, manejo de culturas e desenvolvimento de práticas agrícolas voltadas à sustentabilidade e à produtividade. Currículo Lattes: <https://lattes.cnpq.br/2658219960114244>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8399-9929>. E-mail: [morais.joacir@gmail.com](mailto:morais.joacir@gmail.com)

### INTRODUÇÃO

A expansão da cultura da soja no Cerrado brasileiro está diretamente associada à incorporação de tecnologias que permitiram a adaptação de sistemas produtivos a condições ambientais originalmente restritivas, consolidando a cultura como uma das principais bases do agronegócio nacional, tanto em termos de volume produzido quanto de participação na economia, conforme discutido por Carvalho et al. (2023), ao analisar a relevância da soja nos sistemas agrícolas brasileiros, enquanto Vieira Filho (2024) evidencia sua contribuição para a geração de renda e dinamização do setor produtivo; nesse contexto, a inserção da soja em áreas do Cerrado decorre da articulação entre avanços no manejo do solo, desenvolvimento de cultivares adaptadas e ampliação de infraestrutura produtiva, como destacado por Machado et al. (2024), ao abordar os sistemas de cultivo na região, enquanto Cagnin (2022) aponta que a consolidação do mercado da soja reforçou sua posição estratégica na agricultura brasileira, influenciando decisões produtivas e organização das cadeias de suprimento; paralelamente, a importância econômica da cultura também se reflete em sua participação na balança comercial, conforme demonstrado por Nascimento (2024), evidenciando que a produção de soja no Cerrado não se restringe ao abastecimento interno, mas se insere em dinâmicas globais de oferta e demanda.

As condições edafoclimáticas do Cerrado, no entanto, impõem desafios estruturais à produção agrícola, especialmente no que se refere à irregularidade hídrica e às limitações naturais dos solos, que apresentam baixa fertilidade e elevada acidez, conforme analisado por Souza (2018) ao discutir a gênese de solos tropicais altamente intemperizados, enquanto Figueiredo (2016) destaca a necessidade histórica de correção química para viabilizar a produção agrícola na região; além disso, a distribuição sazonal das chuvas, caracterizada por períodos de concentração seguidos de estiagens, condiciona

a disponibilidade de água no solo e afeta diretamente o desempenho das culturas, como apontado por Novais et al. (2019), ao tratar da classificação climática do bioma, enquanto Anache (2017) demonstra que alterações no uso da terra podem modificar o ciclo hidrológico, influenciando processos de infiltração e retenção de água; nesse cenário, a sustentabilidade da produção de soja depende da adoção de estratégias que considerem a interação entre solo, clima e manejo, como indicado por Pires et al. (2018), ao discutir o uso da terra no Cerrado, evidenciando que a estabilidade produtiva está diretamente relacionada à capacidade de adaptação dos sistemas agrícolas às limitações ambientais.

Diante dessas condições, os bioestimulantes agrícolas têm sido incorporados como alternativa complementar no manejo da cultura, sendo definidos como substâncias ou microrganismos capazes de promover respostas fisiológicas que ampliam a eficiência do uso de recursos e a tolerância a estresses abióticos, conforme discutido por Arejano et al. (2022), enquanto Queiroz et al. (2024) destacam a atuação de compostos como aminoácidos na regulação metabólica das plantas; nesse sentido, Castro et al. (2023) e Feitosa et al. (2024) apontam que extratos de algas e substâncias húmicas apresentam potencial para influenciar processos fisiológicos relacionados ao crescimento e à adaptação ao estresse, enquanto Silva et al. (2019) enfatizam que esses insumos se inserem na interface entre nutrição e regulação vegetal; a adoção crescente de bioestimulantes está associada à busca por maior eficiência produtiva em condições ambientais variáveis, como evidenciado por Campos et al. (2020), ao analisar seu impacto no incremento de produtividade, enquanto Salib (2025) demonstra que sua aplicação pode influenciar a resposta da soja ao estresse hídrico; nesse contexto, o presente capítulo delimita sua análise na relação entre bioestimulantes, produtividade agrícola e resiliência hídrica da soja no Cerrado, considerando os mecanismos fisiológicos envolvidos e sua inserção nos sistemas produtivos contemporâneos.

## **2. FUNDAMENTOS AGRONÔMICOS DA CULTURA DA SOJA NO CERRADO**

### **2.1 CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS DOS SOLOS DE CERRADO**

A compreensão das características edafoclimáticas dos solos do Cerrado exige a articulação entre processos pedogenéticos, dinâmica climática e usos antrópicos, uma vez que a formação desses solos está diretamente vinculada à atuação prolongada de intemperismo químico em ambiente tropical sazonal, com estação seca bem definida, o que resulta em perfis profundamente lixiviados, com baixa capacidade de retenção de

bases e elevada acidez natural, conforme discutido por Souza (2018) ao analisar a gênese de solos sob condições tropicais com inverno seco; nesse contexto, a classificação climática do bioma, caracterizada por regimes de precipitação concentrados e períodos de déficit hídrico recorrente, condiciona não apenas a formação, mas também o funcionamento hidrológico dos solos, influenciando diretamente a disponibilidade de água para as culturas, como apontam Novais et al. (2019), enquanto a paisagem do Cerrado, marcada por extensas superfícies planas e suavemente onduladas, com predominância de Latossolos altamente intemperizados, reforça a homogeneidade estrutural, porém não elimina a variabilidade funcional associada à dinâmica hídrica e à fertilidade, conforme analisado por Sano et al. (2020); essa configuração implica que a água infiltrada tende a percolar rapidamente no perfil, reduzindo a disponibilidade hídrica em períodos críticos e exigindo estratégias de manejo que considerem a baixa retenção de água em camadas superficiais, aspecto também relacionado às alterações no ciclo hidrológico decorrentes do uso da terra, como evidenciado por Anache (2017), que demonstra como mudanças no uso do solo afetam a infiltração, o escoamento superficial e a erosão em áreas de Cerrado, evidenciando a complexidade da interação entre fatores naturais e práticas agrícolas.

Do ponto de vista químico, a limitação mais recorrente desses solos está associada à baixa saturação por bases e à deficiência de nutrientes essenciais, especialmente fósforo, cuja disponibilidade é restringida pela forte adsorção em minerais de argila de alta atividade, situação que exige intervenções sistemáticas de correção e adubação para viabilizar a produção agrícola, como discutido por Figueiredo (2016) ao abordar a construção histórica do conhecimento sobre fertilidade no Cerrado, enquanto Torres (2016) demonstra que a elevação da saturação de bases constitui condição necessária para o desenvolvimento adequado de espécies cultivadas, evidenciando a centralidade da calagem como prática estruturante do manejo; paralelamente, estudos mais recentes indicam que sistemas de uso do solo, como pastagens manejadas ou sistemas agrícolas intensivos, promovem alterações significativas nos parâmetros químicos, incluindo variações no pH, nos teores de matéria orgânica e na disponibilidade de nutrientes, conforme observado por Souza et al. (2025), o que evidencia que a fertilidade no Cerrado não é uma condição estática, mas um atributo dinâmico dependente do manejo adotado, enquanto a dinâmica do carbono orgânico no solo, analisada por Ribeiro (2020), revela que mudanças no uso da terra impactam diretamente os estoques de carbono, influenciando não apenas a fertilidade, mas também a estrutura física e a capacidade de

retenção hídrica do solo, estabelecendo uma relação direta entre processos biogeoquímicos e desempenho agronômico.

Sob a perspectiva física e biológica, a interação entre estrutura do solo, matéria orgânica e atividade microbiana configura um sistema que condiciona tanto a disponibilidade de água quanto a eficiência de absorção de nutrientes pelas plantas, sendo que práticas de manejo, como sistemas de cultivo adaptados e estratégias de irrigação, atuam como mediadores dessa relação, conforme discutido por Machado et al. (2024) ao analisar sistemas de produção de soja no Cerrado, nos quais o ajuste do manejo ao ambiente edafoclimático é determinante para a expressão do potencial produtivo, enquanto Santos et al. (2022) demonstram que a interação entre adubação e irrigação altera significativamente a resposta das culturas, evidenciando a necessidade de integração entre fatores físicos e químicos no manejo agrícola; além disso, o zoneamento agrícola baseado em risco climático, proposto por De Melo (2016), reforça que a variabilidade hídrica e as características do solo devem ser consideradas de forma conjunta na tomada de decisão produtiva, uma vez que a irregularidade pluviométrica, típica do Cerrado, impõe limites à estabilidade das safras, sendo também um dos fatores estruturais que condicionam a expansão da soja em novas áreas, como discutido por Pires et al. (2018), que relacionam sustentabilidade do uso da terra à capacidade de adaptação às condições ambientais; nesse sentido, a dinâmica edafoclimática do Cerrado não pode ser compreendida de forma isolada, pois ela se articula com processos produtivos mais amplos, influenciando diretamente a viabilidade econômica da cultura da soja, cuja expansão e consolidação dependem da superação dessas limitações naturais por meio de intervenções técnicas e científicas continuamente aprimoradas, como indicam Carvalho et al. (2023) ao discutir a evolução dos sistemas agrícolas no bioma.

## 2.2 IMPORTÂNCIA DA SOJA PARA O AGRONEGÓCIO BRASILEIRO

A consolidação da soja como cultura dominante no agronegócio brasileiro está associada à articulação entre transformações estruturais da agricultura e a incorporação de tecnologias que permitiram a expansão da produção em ambientes anteriormente considerados limitantes, como o Cerrado, cuja ocupação agrícola passou a integrar cadeias produtivas de escala nacional e internacional, redefinindo a organização espacial da produção e a inserção do Brasil no mercado global de commodities, conforme discutido por Carvalho et al. (2023), ao analisar a evolução do papel da soja no sistema agroindustrial, enquanto Vieira Filho (2024) evidencia que a produção da oleaginosa se

vincula diretamente à geração de divisas e à ampliação da capacidade exportadora do país, não apenas pela comercialização do grão, mas também pela integração com segmentos industriais, como processamento de óleo e produção de ração; nesse contexto, a relevância econômica da soja ultrapassa o setor primário, uma vez que sua cadeia produtiva mobiliza setores diversos, desde a indústria de insumos até a logística de exportação, contribuindo para a formação do produto interno bruto e para o equilíbrio da balança comercial, aspecto destacado por Nascimento (2024), ao demonstrar a centralidade da cultura no saldo positivo das exportações brasileiras, enquanto Cruz e Siqueira (2021) reforçam que a participação da soja no PIB está diretamente relacionada à sua capacidade de articulação com mercados internacionais, consolidando-se como vetor de dinamização econômica em múltiplas escalas.

A expansão territorial da soja no Brasil, especialmente a partir da década de 1970, deve ser compreendida como resultado de um processo de modernização agrícola que combinou políticas públicas, avanços científicos e adaptação tecnológica às condições edafoclimáticas do Cerrado, permitindo a incorporação de extensas áreas ao sistema produtivo, conforme analisado por Piccoli (2018), que destaca o papel da cultura na reorganização do espaço agrário, enquanto Coletto et al. (2022) discutem os fatores que influenciam a decisão produtiva dos agricultores, evidenciando que a soja se insere em um contexto de racionalidade econômica orientada por mercado, custos de produção e expectativas de rentabilidade; paralelamente, o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao manejo do solo e ao melhoramento genético das cultivares possibilitou a adaptação da cultura às condições do Cerrado, ampliando sua estabilidade produtiva e consolidando sua presença nos sistemas agrícolas da região, como demonstrado por Carrijo et al. (2025), ao abordar os avanços biotecnológicos que permitiram a tropicalização da soja e sua adaptação a ambientes com restrições hídricas e nutricionais, enquanto Machado et al. (2024) ressaltam que a organização dos sistemas de cultivo no Cerrado depende da integração entre práticas de manejo e características ambientais, reforçando que a expansão da soja não se deu de forma espontânea, mas como resultado de um processo técnico e científico articulado.

No âmbito dos sistemas produtivos do Cerrado, a soja ocupa posição estratégica ao estruturar arranjos agrícolas baseados em rotação de culturas, integração lavoura-pecuária e intensificação do uso da terra, configurando modelos de produção que buscam conciliar eficiência econômica e sustentabilidade do uso dos recursos naturais, como discutido por Pires et al. (2018), ao analisar a relação entre uso da terra e produção



agrícola na região, enquanto De Melo (2016) demonstra que o zoneamento agrícola de risco climático se torna instrumento indispensável para orientar a expansão da cultura em áreas com variabilidade pluviométrica significativa, evidenciando a necessidade de adequação espacial da produção; nesse cenário, o mercado da soja, analisado por Cagnin (2022), opera como elemento estruturador das decisões produtivas, influenciando a organização das cadeias de suprimento e a inserção do produtor em redes globais de comercialização, ao mesmo tempo em que a cultura se consolida como base para outros segmentos do agronegócio, como a produção de carnes e biocombustíveis, ampliando sua relevância sistêmica, conforme discutido por Mello e Rosa (2025); adicionalmente, estudos recentes indicam que a intensificação da produção em ambientes do Cerrado exige a incorporação de estratégias voltadas à resiliência produtiva, incluindo o uso de microrganismos e bioestimulantes para mitigação do estresse hídrico, como apontado por Dipple et al. (2025) e Salib (2025), evidenciando que a inserção da soja nos sistemas produtivos contemporâneos envolve não apenas expansão territorial, mas também a incorporação contínua de inovações voltadas à manutenção da produtividade em condições ambientais variáveis.

### 2.3 DESAFIOS PRODUTIVOS RELACIONADOS AO ESTRESSE HÍDRICO

A irregularidade pluviométrica característica do Cerrado impõe limites estruturais ao desempenho da cultura da soja, uma vez que a distribuição sazonal das chuvas, marcada por períodos de concentração hídrica seguidos por intervalos de estiagem, interfere diretamente na disponibilidade de água no solo e, consequentemente, nos processos fisiológicos das plantas, conforme apontado por Novais et al. (2019) ao discutirem a classificação climática do bioma e seus efeitos sobre a dinâmica agrícola; essa condição é agravada pela própria gênese dos solos tropicais altamente intemperizados, nos quais a baixa capacidade de retenção hídrica em camadas superficiais intensifica os efeitos de curtos períodos de seca, especialmente durante estádios críticos do ciclo da soja, como florescimento e enchimento de grãos, o que remete às análises de Souza (2018) sobre a formação de solos sob regime climático com estação seca bem definida; além disso, a configuração da paisagem do Cerrado, descrita por Sano et al. (2020), associada à predominância de superfícies amplas e solos profundos, favorece a infiltração, mas não garante armazenamento hídrico suficiente para sustentar a cultura em cenários de veranicos, o que evidencia a dependência da produtividade agrícola em relação à regularidade das chuvas; nesse sentido, alterações no ciclo hidrológico

decorrentes do uso do solo, como demonstrado por Anache (2017), tendem a modificar padrões de escoamento e infiltração, ampliando a vulnerabilidade das áreas agrícolas à escassez hídrica.

A resposta da soja ao estresse hídrico não se limita à redução direta da produtividade, mas envolve alterações fisiológicas e bioquímicas que comprometem o crescimento vegetativo, a formação de estruturas reprodutivas e a eficiência da fixação biológica de nitrogênio, processo sensível à disponibilidade de água no solo, sendo que a intensidade desses efeitos varia conforme o genótipo e as condições ambientais, como discutido por Carrijo et al. (2025), ao abordar a complexidade da tolerância ao déficit hídrico no melhoramento genético da cultura; paralelamente, estudos como os de Salib (2025) indicam que a deficiência hídrica altera parâmetros fisiológicos como condutância estomática e atividade fotossintética, refletindo em perdas de rendimento, enquanto Dipple et al. (2025) demonstram que a interação entre plantas e microrganismos pode atenuar os efeitos da seca, evidenciando que a resposta ao estresse hídrico não é apenas uma questão genética, mas também ecológica e microbiológica; nesse contexto, a dinâmica do carbono no solo, analisada por Ribeiro (2020), assume relevância, pois a matéria orgânica influencia a retenção de água e a atividade biológica, contribuindo para a resiliência dos sistemas produtivos, enquanto práticas que alteram os atributos químicos do solo, como observado por Souza et al. (2025), podem modificar a disponibilidade hídrica indireta ao influenciar a estrutura e a porosidade do solo.

Diante desses desafios, as estratégias agronômicas voltadas à mitigação do estresse hídrico têm se estruturado a partir da integração entre manejo do solo, planejamento climático e inovação tecnológica, sendo o zoneamento agrícola de risco climático uma ferramenta relevante para orientar a alocação espacial da cultura em função da variabilidade pluviométrica, conforme proposto por De Melo (2016), ao mesmo tempo em que sistemas de cultivo adaptados às condições do Cerrado, descritos por Machado et al. (2024), incorporam práticas como ajuste de densidade de plantas, rotação de culturas e manejo conservacionista do solo, visando otimizar o uso da água disponível; adicionalmente, a adoção de técnicas de adubação e irrigação, analisadas por Santos et al. (2022), evidencia que a interação entre nutrientes e água pode influenciar a eficiência produtiva, reforçando a necessidade de manejo integrado, enquanto a correção da fertilidade do solo, discutida por Figueiredo (2016) e Torres (2016), contribui para o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, para a capacidade de exploração hídrica pelas plantas; nesse cenário, a expansão da soja no Cerrado, embora associada a ganhos

econômicos expressivos, como apontam Vieira Filho (2024), Nascimento (2024) e Cruz e Siqueira (2021), permanece condicionada à capacidade de adaptação dos sistemas produtivos às limitações impostas pelo clima, sendo que decisões produtivas orientadas pelo mercado, como discutido por Coletto et al. (2022) e Cagnin (2022), passam a incorporar o risco climático como variável estratégica, enquanto análises de sustentabilidade do uso da terra, como as de Pires et al. (2018), indicam que a manutenção da produtividade em longo prazo depende da compatibilização entre intensificação agrícola e conservação dos recursos naturais, evidenciando que o enfrentamento do estresse hídrico não se restringe a soluções pontuais, mas envolve a reconfiguração dos sistemas agrícolas em bases tecnicamente articuladas.

### **3. BIOESTIMULANTES AGRÍCOLAS E MECANISMOS DE AÇÃO NAS PLANTAS**

#### **3.1 CONCEITO E CLASSIFICAÇÃO DOS BIOESTIMULANTES**

A consolidação do conceito de bioestimulantes na agricultura contemporânea decorre da necessidade de compreender insumos que atuam para além do fornecimento direto de nutrientes, sendo definidos como substâncias ou microrganismos capazes de promover alterações fisiológicas positivas nas plantas por meio da modulação de processos metabólicos e bioquímicos, independentemente de sua composição nutricional, conforme discutido por Arejano et al. (2022), ao analisar sua aplicação em diferentes sistemas produtivos; nesse sentido, Silva et al. (2019) destacam que esses produtos se inserem na interface entre fertilização e regulação vegetal, uma vez que podem atuar como biorreguladores ou como indutores de respostas fisiológicas específicas, enquanto Campos et al. (2020) ressaltam que sua utilização tem sido ampliada em função da busca por maior eficiência produtiva com menor impacto ambiental; a diversidade conceitual que envolve os bioestimulantes também está associada à complexidade de suas formulações, que podem incluir compostos orgânicos e inorgânicos com diferentes modos de ação, o que dificulta a padronização de uma definição única, conforme apontado por Da Silva et al. (2023), ao revisar o uso desses insumos em culturas agrícolas, enquanto Queiroz et al. (2024) enfatizam que bioestimulantes à base de aminoácidos apresentam atuação direta na síntese proteica e no metabolismo vegetal, contribuindo para o desenvolvimento das plantas em condições adversas.

A classificação dos bioestimulantes pode ser estabelecida a partir de sua origem, composição ou mecanismo de ação, sendo comum a distinção entre grupos como extratos

vegetais, substâncias húmicas, aminoácidos e microrganismos promotores de crescimento, cada qual com funções específicas no sistema solo-planta, conforme sistematizado por Castro et al. (2023), ao discutir as potencialidades das substâncias húmicas e extratos de algas; os extratos de algas marinhas, por exemplo, têm sido amplamente estudados devido à presença de compostos bioativos capazes de influenciar o crescimento e a tolerância ao estresse, como evidenciado por Saccomori (2021) e Feitosa et al. (2024), que destacam seu papel na agricultura sustentável, enquanto Andrade et al. (2018) demonstram que bioestimulantes derivados de *Ascomyces nodosum* apresentam efeitos positivos no desempenho agrônômico da soja, especialmente quando associados a práticas de manejo químico; paralelamente, as substâncias húmicas atuam na interface solo-planta, influenciando a disponibilidade de nutrientes e a estrutura do solo, como indicado por Souza et al. (2022), ao abordar vias de sinalização relacionadas ao crescimento radicular, enquanto os aminoácidos desempenham funções metabólicas diretas, contribuindo para a síntese de proteínas e para a adaptação das plantas a condições de estresse, conforme discutido por Queiroz et al. (2024); além disso, microrganismos promotores de crescimento vegetal integram essa classificação ao atuar na rizosfera, favorecendo processos como absorção de nutrientes e desenvolvimento radicular, ampliando o escopo funcional dos bioestimulantes no sistema produtivo.

A diversidade de bioestimulantes também se reflete na variedade de aplicações e respostas observadas nas culturas agrícolas, o que reforça a necessidade de compreender sua classificação de forma integrada aos sistemas de produção, uma vez que diferentes formulações podem gerar efeitos distintos conforme o contexto edafoclimático e o manejo adotado, como observado por Kolling et al. (2023) na cultura do trigo e por Basílio (2023) no desenvolvimento inicial do milho, enquanto estudos como os de Berto et al. (2025) evidenciam que bioestimulantes aplicados em sementes influenciam parâmetros fisiológicos desde a germinação, demonstrando que sua atuação se inicia em estádios precoces do ciclo vegetal; na cultura da soja, essa diversidade de respostas também é observada, sendo relatada por Totto et al. (2018) e Soares (2017), que destacam variações no desempenho fisiológico conforme o tipo de bioestimulante e as condições ambientais, enquanto Agnol (2022) e Cruz (2023) indicam que a aplicação via sementes pode influenciar o estabelecimento inicial da cultura; nesse cenário, a interação entre bioestimulantes e outros insumos agrícolas, como herbicidas, também tem sido investigada, evidenciando efeitos sinérgicos ou moduladores no metabolismo vegetal, conforme discutido por De Lemos Nobre et al. (2025) e Mendes, Silva e Mielke (2022),

ao tratar de mecanismos de ação de insumos e suas interações no sistema produtivo, enquanto estudos sobre metabolismo vegetal e respostas fisiológicas, como os de Ribeiro (2025) e Rodrigues (2018), contribuem para a compreensão dos processos envolvidos, indicando que a classificação dos bioestimulantes não pode ser dissociada de seus efeitos bioquímicos e das condições em que são aplicados.

### 3.2 MECANISMOS FISIOLÓGICOS DE AÇÃO NAS PLANTAS

Os mecanismos fisiológicos associados à ação dos bioestimulantes nas plantas envolvem uma rede complexa de respostas metabólicas que se expressam desde os estádios iniciais de desenvolvimento até fases avançadas do ciclo produtivo, sendo que tais respostas não decorrem de um único processo, mas da integração entre vias hormonais, bioquímicas e estruturais que regulam o crescimento vegetal, conforme discutido por Arejano et al. (2022), ao destacar que esses insumos promovem alterações em múltiplos processos metabólicos simultaneamente; nesse contexto, a regulação hormonal constitui um dos principais eixos de atuação, uma vez que compostos presentes nos bioestimulantes, como auxinas, citocininas e giberelinas, influenciam diretamente a divisão e a alongação celular, modulando o desenvolvimento das plantas, como apontado por Silva et al. (2019), enquanto Castro et al. (2023) ressaltam que substâncias húmicas e extratos de algas podem atuar como sinalizadores bioquímicos, desencadeando respostas fisiológicas que ampliam a capacidade adaptativa das plantas; além disso, a presença de aminoácidos, conforme discutido por Queiroz et al. (2024), contribui para a síntese proteica e para a regulação de processos metabólicos essenciais, influenciando diretamente o crescimento e a resposta ao estresse, o que evidencia que os bioestimulantes operam por meio de mecanismos integrados que não se restringem à nutrição, mas abrangem a modulação do funcionamento fisiológico das plantas em diferentes níveis.

O crescimento radicular representa um dos principais efeitos observados na aplicação de bioestimulantes, sendo determinante para a eficiência de absorção de água e nutrientes, especialmente em ambientes com limitações edafoclimáticas, como evidenciado por Souza et al. (2022), ao demonstrar que ácidos húmicos ativam vias de sinalização responsáveis pela expansão do sistema radicular, enquanto Basílio (2023) observa que o uso desses insumos no desenvolvimento inicial do milho favorece a formação de raízes mais robustas, ampliando a capacidade de exploração do solo; essa resposta também é relevante na cultura da soja, onde a interação entre bioestimulantes e o sistema radicular influencia diretamente o estabelecimento inicial da cultura, conforme

discutido por Tatto et al. (2018) e Agnol (2022), que identificam variações no desempenho fisiológico em função das condições de aplicação e das doses utilizadas; paralelamente, a melhoria da absorção de nutrientes decorre não apenas da maior superfície radicular, mas também de alterações na atividade enzimática e na permeabilidade das membranas celulares, o que contribui para a eficiência nutricional das plantas, como destacado por Campos et al. (2020), enquanto Luna Neto (2021) demonstra que tais alterações se refletem em parâmetros fisiológicos mensuráveis, incluindo índices espectrais associados à atividade fotossintética.

A eficiência fotossintética e a resposta ao estresse abiótico constituem outro eixo relevante na atuação dos bioestimulantes, uma vez que esses produtos podem influenciar diretamente a atividade dos cloroplastos, a síntese de pigmentos e a regulação estomática, resultando em maior capacidade de assimilação de carbono e produção de biomassa, como observado por Feitosa et al. (2024) ao analisar o uso de extratos de algas na agricultura, enquanto Andrade et al. (2018) e Andrade et al. (2022) demonstram que a aplicação de bioestimulantes à base de *Ascophyllum nodosum* pode mitigar efeitos negativos de herbicidas, preservando a atividade metabólica da planta; nesse sentido, a interação entre bioestimulantes e estresses químicos ou ambientais evidencia que esses insumos atuam também na regulação do estresse oxidativo, conforme discutido por Sanches e Silva (2023), ao abordar mecanismos de atenuação de danos celulares, enquanto estudos sobre metabolismo vegetal, como os de Ribeiro (2025) e Rodrigues (2018), contribuem para compreender como substâncias externas podem interferir em rotas metabólicas específicas; adicionalmente, a interação entre bioestimulantes e herbicidas, analisada por De Lemos Nobre et al. (2025) e Mendes, Silva e Mielke (2022), demonstra que esses produtos podem modular respostas fisiológicas frente a compostos químicos, alterando a sensibilidade das plantas e influenciando sua tolerância, enquanto Gomes (2023) e Gessi et al. (2026) discutem mecanismos de resposta a estressores que, embora estudados em herbicidas, contribuem para compreender a complexidade das interações fisiológicas; por fim, estudos como os de Kolling et al. (2023), Berto et al. (2025), Cruz (2023), Soares (2017) e Rezende et al. (2025) indicam que a resposta fisiológica aos bioestimulantes varia conforme o estágio fenológico, a cultura e o ambiente, evidenciando que seus mecanismos de ação devem ser compreendidos como processos dinâmicos, dependentes da interação entre planta, insumo e condições de cultivo.

### 3.3 APLICAÇÕES AGRONÔMICAS DOS BIOESTIMULANTES NA CULTURA DA SOJA

As aplicações agronômicas dos bioestimulantes na cultura da soja têm sido estruturadas a partir de diferentes estratégias de uso que visam maximizar a eficiência fisiológica das plantas ao longo do ciclo produtivo, sendo o tratamento de sementes uma das abordagens mais difundidas, especialmente por atuar diretamente nas fases iniciais de germinação e estabelecimento, influenciando o vigor das plântulas e a uniformidade do estande, conforme discutido por Cruz (2023), ao analisar a aplicação de biofertilizantes com efeito estimulante na cultura da soja, enquanto Tatto et al. (2018) demonstram que sementes tratadas com bioestimulantes apresentam respostas diferenciadas sob condições de estresse osmótico, indicando que essa prática pode contribuir para maior tolerância a condições adversas; nesse contexto, Agnol (2022) observa que a aplicação via sementes permite uma interação precoce entre o bioestimulante e os tecidos vegetais, influenciando processos metabólicos desde a germinação, enquanto Soares (2017) destaca que a responsividade fisiológica da soja varia conforme o grupo de maturação e o tipo de bioestimulante utilizado, evidenciando a necessidade de ajuste técnico na adoção dessa prática; além disso, estudos como os de Berto et al. (2025) e Basílio (2023) indicam que os efeitos observados em diferentes culturas reforçam a relevância do tratamento de sementes como estratégia inicial para potencializar o desenvolvimento vegetal, o que também é corroborado por Queiroz et al. (2024), ao destacar a atuação de bioestimulantes à base de aminoácidos na ativação metabólica precoce das plantas.

A aplicação foliar constitui outra forma relevante de uso dos bioestimulantes na cultura da soja, sendo amplamente adotada em função da rapidez de absorção e da possibilidade de intervenção em estádios fenológicos específicos, o que permite ajustar a aplicação conforme as demandas fisiológicas da planta, como discutido por Arejano et al. (2022), ao apontar que diferentes formas de aplicação promovem respostas metabólicas distintas, enquanto Silva et al. (2019) destacam que a aplicação foliar está associada à regulação hormonal e à melhoria da eficiência fotossintética; nesse sentido, Andrade et al. (2018) e Andrade et al. (2022) demonstram que bioestimulantes derivados de *Ascophyllum nodosum*, quando aplicados em conjunto com herbicidas, podem reduzir efeitos fitotóxicos e contribuir para a manutenção do desempenho fisiológico da soja, o que evidencia a importância dessa prática em sistemas produtivos intensivos; adicionalmente, Feitosa et al. (2024) e Saccomori (2021) ressaltam que extratos de algas aplicados via foliar influenciam processos fisiológicos relacionados à tolerância ao



estresse, enquanto Rezende et al. (2025) indicam que a aplicação de biorreguladores em diferentes estádios fenológicos pode alterar a resposta produtiva da cultura, evidenciando que o momento de aplicação é um fator determinante para a eficiência agrônômica dos bioestimulantes.

A integração dos bioestimulantes com práticas de manejo nutricional e com outros insumos agrícolas configura uma abordagem que amplia o potencial de resposta das plantas, uma vez que esses produtos não atuam de forma isolada, mas em interação com o sistema produtivo, como discutido por Campos et al. (2020), ao analisar o incremento de produtividade associado ao uso desses insumos, enquanto Da Silva et al. (2023) destacam que a combinação com fertilizantes pode otimizar a absorção de nutrientes e a eficiência do uso de recursos; nesse contexto, Castro et al. (2023) indicam que substâncias húmicas e extratos de algas podem atuar em sinergia com a fertilização, influenciando a disponibilidade de nutrientes no solo e a resposta fisiológica das plantas, enquanto Souza et al. (2022) demonstram que esses compostos ativam vias de sinalização relacionadas ao crescimento radicular, potencializando a absorção hídrica e nutricional; além disso, a interação com herbicidas tem sido objeto de estudo, evidenciando que bioestimulantes podem modular os efeitos desses insumos sobre o metabolismo vegetal, como discutido por De Lemos Nobre et al. (2025), Mendes, Silva e Mielke (2022) e Ribeiro (2025), ao abordar mecanismos de ação e respostas fisiológicas associadas, enquanto Rodrigues (2018) contribui para a compreensão dos processos bioquímicos envolvidos; nesse cenário, análises como as de Gomes (2023) e Gessi et al. (2026) indicam que a resposta das plantas a insumos externos envolve mecanismos complexos de adaptação, enquanto estudos de campo, como os de Kolling et al. (2023) e Luna Neto (2021), evidenciam que a adoção de bioestimulantes deve considerar o contexto produtivo e as condições ambientais, uma vez que seus efeitos dependem da interação entre manejo, cultura e ambiente.

## **4. BIOESTIMULANTES, PRODUTIVIDADE E RESILIÊNCIA HÍDRICA NA SOJA**

### **4.1 INFLUÊNCIA DOS BIOESTIMULANTES NO DESENVOLVIMENTO RADICULAR**

O desenvolvimento radicular da soja sob influência de bioestimulantes tem sido interpretado como resultado da modulação de processos fisiológicos que envolvem divisão celular, alongamento e diferenciação de tecidos, os quais são mediados por

compostos bioativos presentes nesses insumos, como aminoácidos, substâncias húmicas e reguladores vegetais, conforme discutido por Queiroz et al. (2024), ao abordar a atuação desses compostos no metabolismo vegetal; nesse contexto, Ferreira et al. (2024) demonstram que a aplicação via tratamento de sementes promove alterações precoces na germinação e no estabelecimento inicial, refletindo diretamente na formação de um sistema radicular mais desenvolvido, enquanto Zils et al. (2024) destacam que a resposta radicular da soja depende da interação entre a formulação do bioestimulante e as condições edafoclimáticas; além disso, estudos como os de Ramos, Assis e Livramento (2022) e Do Nascimento e Dos Anjos (2023) indicam que o uso desses insumos em sementes favorece o vigor inicial e o crescimento das plântulas, evidenciando que a atuação dos bioestimulantes se inicia antes mesmo da emergência das plantas, enquanto Martins et al. (2016) e Santos et al. (2017) reforçam que a expansão do sistema radicular está diretamente associada ao aumento da eficiência fisiológica das culturas, o que também é observado em outras espécies agrícolas, conforme relatado por Buchelt et al. (2019) e Nogueira et al. (2024), indicando que esse efeito não é restrito à soja, mas representa um padrão de resposta fisiológica induzido por esses insumos.

A ampliação do sistema radicular promovida pelos bioestimulantes tem implicações diretas na capacidade de exploração hídrica do solo, especialmente em ambientes sujeitos à irregularidade de precipitação, uma vez que raízes mais profundas e ramificadas aumentam o volume de solo explorado e, consequentemente, a disponibilidade de água acessível à planta, conforme evidenciado por Da Silva Cavalcante et al. (2020), ao analisar a eficiência desses insumos no manejo do déficit hídrico na soja, enquanto Mendes e Almeida (2025) destacam que microrganismos promotores de crescimento, associados a bioestimulantes, potencializam a absorção hídrica e nutricional por meio da interação com a rizosfera; nesse sentido, Rosa (2020) observa que a melhoria da arquitetura radicular contribui para maior estabilidade fisiológica em condições de restrição hídrica, enquanto Da Silva et al. (2024) indicam que a aplicação de bioestimulantes e microrganismos pode alterar a dinâmica de absorção de água, favorecendo o equilíbrio hídrico da planta; adicionalmente, estudos como os de Federizzi e Lima (2025) e Cecato e Lima (2025) demonstram que o uso desses insumos em condições de déficit hídrico influencia positivamente o desenvolvimento radicular, promovendo maior tolerância inicial ao estresse, enquanto Salib (2025) evidencia que a resposta da soja à aplicação de bioestimulantes está associada à capacidade de adaptação fisiológica em ambientes com limitação de água.

A relação entre desenvolvimento radicular e desempenho produtivo da soja deve ser compreendida a partir da interação entre fatores fisiológicos, edáficos e de manejo, uma vez que a eficiência do sistema radicular condiciona a absorção de água e nutrientes e, consequentemente, a expressão do potencial produtivo da cultura, conforme discutido por Geus Neto (2025), ao avaliar respostas ecofisiológicas e componentes de rendimento da soja sob diferentes condições hídricas, enquanto Gerling et al. (2025) demonstram que a coinoculação com bactérias promotoras de crescimento e a aplicação de bioestimulantes resultam em alterações morfológicas que favorecem o desempenho da cultura; nesse contexto, Codonho Junior (2025) observa que o uso de bioestimulantes à base de aminoácidos e substâncias húmicas influencia o crescimento radicular e a produtividade, enquanto Scovini e De Carli Bento (2025) indicam que o desenvolvimento da soja sob influência desses insumos está associado à melhoria da eficiência fisiológica da planta; além disso, evidências provenientes de outras culturas, como as apresentadas por Do Rio et al. (2025) e Rocha e Borges (2025), reforçam que o estímulo radicular promovido por bioestimulantes contribui para maior estabilidade no desenvolvimento vegetal, enquanto estudos sobre tolerância ao estresse hídrico, como os de Silva (2023) e De Souza Borges e Vendruscolo (2025), indicam que a capacidade de exploração do solo representa um dos principais mecanismos de adaptação das plantas, sendo complementada por práticas de manejo do solo que favorecem a retenção de água, conforme discutido por Abreu (2025), Oliveira et al. (2018), Caetano (2017), Muhl et al. (2024) e Betiol (2025), evidenciando que o efeito dos bioestimulantes deve ser analisado em conjunto com o sistema produtivo no qual estão inseridos.

#### 4.2 BIOESTIMULANTES E TOLERÂNCIA AO ESTRESSE HÍDRICO

A tolerância ao estresse hídrico em plantas de soja submetidas à aplicação de bioestimulantes está associada a um conjunto de mecanismos fisiológicos e bioquímicos que atuam na manutenção da homeostase celular e na preservação das funções metabólicas sob condições de déficit de água, sendo que esses processos envolvem ajustes osmóticos, modulação hormonal e ativação de sistemas de defesa antioxidante, conforme discutido por Da Silva Cavalcante et al. (2020), ao analisar a eficiência desses insumos no manejo da seca, enquanto Rosa (2020) observa que bioestimulantes influenciam diretamente a capacidade das plantas de manter o equilíbrio hídrico, reduzindo os impactos da desidratação celular; nesse contexto, Queiroz et al. (2024) destacam que aminoácidos presentes em formulações bioestimulantes participam da síntese de

compostos osmoprotetores, contribuindo para a estabilidade das estruturas celulares, enquanto Silva (2023) evidencia que a aplicação desses insumos está associada ao aumento da atividade de enzimas antioxidantes, reduzindo danos provocados por espécies reativas de oxigênio em condições de estresse; além disso, Salib (2025) demonstra que plantas tratadas apresentam melhor desempenho fisiológico sob déficit hídrico, com maior eficiência fotossintética e menor degradação de membranas, o que indica que os bioestimulantes atuam não apenas na prevenção de danos, mas também na manutenção da atividade metabólica durante períodos críticos.

A regulação das trocas gasosas e da atividade fotossintética constitui outro aspecto relevante na tolerância ao estresse hídrico, uma vez que a limitação de água afeta diretamente a condutância estomática e a assimilação de carbono, sendo que bioestimulantes podem modular essas respostas ao favorecer o controle estomático e a eficiência do uso da água, conforme observado por Geus Neto (2025), ao avaliar respostas ecofisiológicas da soja sob diferentes condições hídricas, enquanto Gerling et al. (2025) indicam que a associação entre bioestimulantes e microrganismos promotores de crescimento influencia positivamente as trocas gasosas e o desempenho fisiológico das plantas; nesse sentido, Mendes e Almeida (2025) destacam que a interação com a microbiota do solo amplia a capacidade de resposta ao estresse, contribuindo para a absorção de água e nutrientes, enquanto Da Silva et al. (2024) demonstram que o manejo integrado com bioestimulantes e microrganismos promove maior equilíbrio fisiológico em condições adversas; paralelamente, estudos como os de Ferreira et al. (2024) e Zils et al. (2024) indicam que a aplicação via sementes pode antecipar mecanismos de tolerância, influenciando a germinação e o estabelecimento inicial sob déficit hídrico, enquanto Federizzi e Lima (2025) e Cecato e Lima (2025) reforçam que esses efeitos são observados desde os primeiros estádios do desenvolvimento vegetal.

Os efeitos dos bioestimulantes sobre a tolerância ao estresse hídrico também se manifestam na estabilidade produtiva das culturas, uma vez que a manutenção da atividade fisiológica sob condições adversas contribui para reduzir perdas de rendimento e aumentar a resiliência dos sistemas agrícolas, conforme discutido por Codonho Junior (2025), ao relacionar o uso de aminoácidos e substâncias húmicas ao desempenho produtivo da soja, enquanto Scovini e De Carli Bento (2025) indicam que a resposta das plantas está associada à melhoria da eficiência fisiológica em ambientes limitantes; além disso, estudos em diferentes culturas, como os de Do Rio et al. (2025), Rocha e Borges (2025) e Santos et al. (2017), demonstram que bioestimulantes influenciam o

desenvolvimento vegetal e a produtividade em condições de estresse, sugerindo que esses mecanismos apresentam caráter generalizável, enquanto Buchelt et al. (2019) e Nogueira et al. (2024) evidenciam que a interação entre bioestimulantes e microrganismos contribui para a adaptação das plantas a ambientes adversos; nesse cenário, a estabilidade produtiva também depende de fatores relacionados ao manejo do solo e ao sistema produtivo, como discutido por Abreu (2025), Muhl et al. (2024) e Betiol (2025), que destacam a importância de práticas conservacionistas na retenção de água e na manutenção da produtividade, enquanto Oliveira et al. (2018) e Caetano (2017) indicam que a adaptabilidade fenotípica da soja está diretamente relacionada à capacidade de resposta a condições ambientais variáveis, evidenciando que o uso de bioestimulantes deve ser compreendido como parte de um conjunto mais amplo de estratégias voltadas à mitigação do estresse hídrico.

#### 4.3 IMPACTOS NA PRODUTIVIDADE E NA ESTABILIDADE PRODUTIVA DA SOJA

Os impactos dos bioestimulantes sobre a produtividade da soja devem ser compreendidos a partir da relação entre desempenho fisiológico e formação dos componentes de rendimento, uma vez que a manutenção da atividade metabólica sob condições de limitação hídrica influencia diretamente variáveis como número de vagens, número de grãos por planta e massa de grãos, conforme analisado por Geus Neto (2025), ao demonstrar que o uso desses insumos, associado ao status hídrico do solo, altera respostas ecofisiológicas e produtivas da cultura; nesse contexto, Da Silva Cavalcante et al. (2020) indicam que bioestimulantes contribuem para a mitigação dos efeitos do déficit hídrico, reduzindo perdas de produtividade, enquanto Rosa (2020) observa que plantas tratadas apresentam maior capacidade de manter o rendimento em condições adversas, evidenciando que esses insumos atuam na preservação da eficiência produtiva; paralelamente, Codonho Junior (2025) destaca que formulações à base de aminoácidos e substâncias húmicas influenciam positivamente o crescimento e os componentes de produtividade, enquanto Ferreira et al. (2024) e Zils et al. (2024) indicam que o tratamento de sementes com bioestimulantes impacta o estabelecimento inicial da cultura, refletindo em melhor desempenho ao longo do ciclo, o que também é observado em estudos com outras espécies, como relatado por Ramos, Assis e Livramento (2022) e Do Nascimento e Dos Anjos (2023), sugerindo que o efeito sobre a produtividade está associado a melhorias iniciais no desenvolvimento vegetal.

A estabilidade produtiva da soja em ambientes sujeitos à variabilidade climática depende da capacidade das plantas de manter desempenho fisiológico consistente ao longo do ciclo, sendo que o uso de bioestimulantes tem sido associado à redução da amplitude de variação entre safras, especialmente em cenários de estresse hídrico moderado, conforme discutido por Da Silva et al. (2024), ao abordar o manejo integrado com microrganismos e bioestimulantes, enquanto Mendes e Almeida (2025) destacam que a interação com bactérias promotoras de crescimento vegetal contribui para maior eficiência na absorção de água e nutrientes, favorecendo a estabilidade produtiva; nesse sentido, Gerling et al. (2025) demonstram que a coinoculação com microrganismos e o uso de bioestimulantes resultam em alterações morfométricas e fisiológicas que se refletem em maior consistência produtiva, enquanto Scovini e De Carli Bento (2025) indicam que o desenvolvimento da soja sob influência desses insumos está associado à manutenção da eficiência fisiológica mesmo em condições ambientais desfavoráveis; além disso, estudos em diferentes culturas, como os de Buchelt et al. (2019), Nogueira et al. (2024) e Santos et al. (2017), evidenciam que o uso de bioestimulantes contribui para reduzir os efeitos de estresses abióticos sobre o crescimento e a produtividade, reforçando que esses mecanismos apresentam aplicabilidade em diferentes sistemas agrícolas.

A análise da produtividade da soja também deve considerar a interação entre bioestimulantes e sistemas de manejo, uma vez que a resposta produtiva não depende exclusivamente da aplicação desses insumos, mas da forma como se integram às práticas agrícolas adotadas, como evidenciado por Abreu (2025), ao demonstrar que sistemas conservacionistas, como o plantio direto, influenciam positivamente a estabilidade produtiva ao melhorar a retenção de água no solo, enquanto Muhl et al. (2024) e Betiol (2025) destacam que a qualidade física do solo e o histórico de manejo impactam diretamente a produtividade das culturas; nesse contexto, Oliveira et al. (2018) indicam que a adaptabilidade e a estabilidade fenotípica da soja estão associadas à interação entre genótipo e ambiente, sendo que o uso de bioestimulantes pode atuar como fator complementar na expressão do potencial produtivo, enquanto Caetano (2017) evidencia que sistemas integrados de produção influenciam o rendimento da cultura; adicionalmente, estudos como os de Do Rio et al. (2025) e Rocha e Borges (2025) demonstram que bioestimulantes influenciam componentes de produtividade em diferentes culturas, sugerindo que esses insumos contribuem para a redução de perdas em condições adversas, enquanto Salib (2025) reforça que a manutenção da atividade fisiológica sob estresse hídrico está diretamente relacionada à capacidade produtiva das

plantas, evidenciando que o uso de bioestimulantes deve ser compreendido como parte de uma estratégia integrada voltada à estabilidade da produção agrícola.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo do capítulo evidencia que o uso de bioestimulantes na cultura da soja, especialmente em ambientes de Cerrado, deve ser compreendido como parte de um conjunto mais amplo de estratégias de manejo voltadas à superação de limitações edafoclimáticas e à manutenção da produtividade em cenários de variabilidade hídrica. A articulação entre características do solo, dinâmica climática e respostas fisiológicas das plantas demonstra que a produtividade da soja não depende exclusivamente de insumos isolados, mas da capacidade de integrar práticas que favoreçam o equilíbrio do sistema produtivo, sendo que os bioestimulantes se inserem nesse contexto ao atuar sobre processos metabólicos e estruturais que ampliam a eficiência do uso de recursos naturais. A relação entre desenvolvimento radicular, absorção hídrica e desempenho fisiológico indica que esses insumos contribuem para a construção de sistemas agrícolas menos suscetíveis a oscilações ambientais, ao mesmo tempo em que reforçam a necessidade de compreender suas respostas em função das condições específicas de cultivo, evitando generalizações que desconsiderem a heterogeneidade dos ambientes de produção no Cerrado.

A discussão sobre a eficiência do uso da água revela que os bioestimulantes possuem potencial para influenciar diretamente a capacidade das plantas de enfrentar períodos de déficit hídrico, seja por meio da modulação de mecanismos fisiológicos relacionados às trocas gasosas, seja pela indução de respostas bioquímicas que preservam a integridade celular em condições adversas. No entanto, a amplitude desses efeitos está condicionada à intensidade do estresse, à composição dos produtos utilizados e à interação com práticas de manejo do solo, o que evidencia que sua eficácia não pode ser dissociada do contexto produtivo em que são aplicados. A estabilidade produtiva da soja, nesse sentido, emerge como resultado da combinação entre fatores fisiológicos, ambientais e técnicos, nos quais os bioestimulantes desempenham função complementar, contribuindo para reduzir perdas, mas não substituindo a necessidade de estratégias estruturais como conservação do solo, escolha de cultivares adaptadas e planejamento agrícola baseado em risco climático.

A identificação de lacunas na produção científica aponta para a necessidade de avanços metodológicos que permitam compreender de forma mais precisa os mecanismos



de ação dos bioestimulantes em diferentes condições edafoclimáticas, bem como a padronização de protocolos experimentais que possibilitem a comparação entre estudos e a construção de recomendações agrônomicas mais consistentes. A heterogeneidade das formulações disponíveis, aliada à variabilidade de respostas observadas em campo, indica que ainda há limitações no entendimento das interações entre bioestimulantes, microbiota do solo e fisiologia vegetal, especialmente em ambientes tropicais. Nesse cenário, perspectivas futuras envolvem o desenvolvimento de tecnologias que integrem bioestimulantes a sistemas de manejo mais amplos, incorporando ferramentas de biotecnologia, agricultura de precisão e monitoramento ambiental, de modo a ampliar a eficiência produtiva e reduzir a vulnerabilidade dos sistemas agrícolas às mudanças climáticas, sem dissociar produtividade de conservação dos recursos naturais.

## REFERENCIAS

ABREU, Jéssica Serpa de. Produtividade e estabilidade produtiva de grãos sob diferentes sistemas de manejo do solo em experimento de longa duração no Centro-Sul do Paraná. 2025.

AGNOL, Willian Felipe Dall. **Comportamento agrônomico da cultura da soja em função de diferentes doses de bioestimulante via semente**. 2022. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

ANACHE, Jamil Alexandre Ayach. **Alterações no ciclo hidrológico e na perda de solo devido aos diferentes usos do solo e variações climáticas em área de Cerrado**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ANDRADE, Christiano et al. DESEMPENHO FISIOLÓGICO E AGRONÔMICO DA SOJA SUBMETIDA A APLICAÇÃO DE HERBICIDAS E BIOESTIMULANTE A BASE DE *Ascopillum nodosum*. 2022.

AREJANO, Luan Martín et al. Uso de bioestimulantes na produção agrícola. **Aspectos da biotecnologia agrícola aplicada**, 2022.

BASÍLIO, Franco de Paula. Bioestimulantes no desenvolvimento inicial de milho. 2023.

BERTO, Thaíse dos Santos et al. Avaliação de bioestimulantes em sementes de alface: aplicação de análise de componentes principais e clustering. 2025.

BETIOL, Olavo. Impactos do preparo ocasional após 26 anos em Plantio direto com diferentes rotações de Culturas sobre a produtividade da soja e Alguns atributos do solo. 2025.

BUHELDT, Antonio Carlos et al. Aplicação de bioestimulantes e *Bacillus subtilis* na germinação e desenvolvimento inicial da cultura do milho. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 6, n. 4, p. 69-74, 2019.

CAETANO, Luis Augusto Martins. Impacto da intensidade de pastejo na produtividade da soja em integração com bovinos de corte. 2017.

CAGNIN, Pedro Roberto. O Mercado de soja. 2022.

CAMPOS, Thiago Souza; DOS SANTOS SOUSA, Westefann; DE OLIVEIRA, Valdivino Junior Domingos. Uso de bioestimulantes no incremento da produtividade de grãos. **Revista Agrotecnologia-Agrotec**, v. 11, n. 1, p. 9-15, 2020.

CARRIJO, Eduardo Victor Couto et al. Avanços da biotecnologia e do melhoramento genético da soja no Cerrado: ênfase na tolerância ao déficit hídrico. **Revista Caribeña de Ciencias Sociales (RCCS)**, v. 14, n. 12, p. 4, 2025.

CARVALHO, Nágyla Simões et al. Revisão: A importância da soja para o agronegócio brasileiro. **Matos, R, RSS, Silva, ALV, & Vieira Neto, GF Fitotecnia, sistemas agrícolas ambientais e solo**, p. 52-60, 2023.

CASTRO, Tadeu Augusto van Tol de et al. Potencialidades das substâncias húmicas, extratos de algas e suas combinações como bioestimulantes em plantas: características estruturais e modo de ação. 2023.

CECATO, Afonso Henrique; LIMA, Thaísa Capato. Bioestimulantes no tratamento de sementes de feijão sob condições de déficit hídrico. **Revista Cultivando o Saber**, v. 18, p. 116-130, 2025.

CODONHO JUNIOR, Angelo Geraldo. Manejo de bioestimulante à base de aminoácidos e substâncias húmicas na soja: efeitos no crescimento e produtividade. 2025.

COLETTI, Camila et al. O agronegócio e os fatores determinantes na tomada de decisão de produzir soja. **Iheringia, Série Botânica.**, v. 77, 2022.

CRUZ, Bruna Cristina Oliveira da. Aplicação de biofertilizante com efeito estimulante no tratamento de sementes na cultura da soja. 2023.

CRUZ, L. F.; SIQUEIRA, T. de S. A exportação da soja brasileira e sua importância no PIB nacional. **XII FATECLOG-gestão da cadeia de suprimentos no agronegócio: desafios e oportunidades no contexto atual FATEC-Mogi das Cruzes/SP-Brasil**, v. 18, 2021.

DA SILVA CAVALCANTE, Wendson Soares et al. Eficiência dos bioestimulantes no manejo do déficit hídrico na cultura da soja. **Irriga**, v. 25, n. 4, p. 754-763, 2020.

DA SILVA, Gabrielle Caroline; SIMONETTI, Ana Paula Morais Mourão. Influência do trigo mourisco e diferentes bioestimulantes orgânicos na germinação e desenvolvimento inicial do milho. **Revista Cultivando o Saber**, p. 11-22, 2022.

DA SILVA, João Henrique Barbosa et al. Uso de bioestimulantes na cultura do milho (*Zea mays* L.): Uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, v. 16, n. 5, 2023.

DA SILVA, Nelmício Furtado et al. Manejo do déficit hídrico em plantas de soja via aplicação de microrganismos e bioestimulantes. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 13, p. e12980-e12980, 2024.

DE ALMEIDA RODRIGUES, Elsa Margarida. **Estudo do Mecanismo de Ação e do Método de Aplicação de um Novo Composto [Fe (mpp) 3], em Plantas de Soja (Glycine Max L.) Crescidas em Solo Alcalino**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal).

DE ANDRADE, Christiano Lima Lobo et al. Bioestimulantes derivados de *Ascophyllum nodosum* associados ao glyphosate nas características agronômicas da soja RR. **Weed Control Journal**, v. 17, n. 3, p. e592 (1-10), 2018.

DE LEMOS NOBRE, Felipe Luiz et al. Efeito da combinação de bioestimulante com herbicida no controle localizado de plantas daninhas pulverizadas com drones. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 23, n. 2, p. e8884-e8884, 2025.

DE MELO, A. C. A. Proposição de nova abordagem metodológica para o zoneamento agrícola de risco climático da cultura da soja no bioma Cerrado. 2016.

DE SOUZA BORGES, Gisele; VENDRUSCOLO, Eduardo Pradi. MANEJO DE BIOESTIMULANTES VISANDO ELEVAR A TOLERÂNCIA DE PLANTAS DE TRIGO SOB ESTRESSE HÍDRICO INDUZIDO. **ANAIS DO ENIC**, n. 17, 2025.

DIPPLE, Fernanda Lourenço et al. USO DE MICRORGANISMOS PARA REDUÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO DA SOJA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 21, n. 01, p. 1-21, 2025.

DO NASCIMENTO, Felipe Gomes; DOS ANJOS, Danilo Nogueira. Influência de bioestimulantes sobre a qualidade fisiológica de sementes de dois híbridos de milho. **PesquisAgro**, v. 7, n. 1, p. 72-85, 2023.

DO RIO, Mateus Eduardo et al. INFLUÊNCIA DE BIORREGULADORES SOB O DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO AMENDOIM. **ARACÊ**, v. 7, n. 8, p. e7397-e7397, 2025.

FEDERIZZI, Victor; LIMA, Thaísa Capato. Bioestimulante na germinação de sementes de feijão submetidas à déficit hídrico. **Revista Cultivando o Saber**, p. 36-50, 2025.

FEITOSA, Patrícia Marques et al. Potencial do uso de extratos de algas na agricultura sustentável. **Manejo fisiológico e nutricional de plantas: Abordagens práticas na agricultura**, v. 2, p. 78-98, 2024.

FERREIRA, Matheus Henrique da Silva et al. SUBSTÂNCIAS BIOESTIMULANTES VIA TRATAMENTO DE SEMENTES NA CULTURA DA SOJA. 2024.

FIGUEIREDO, Y. C. A fertilidade do solo no Cerrado: os pioneiros da pesquisa e o papel da Cooperação Internacional. 2016.

GERLING, Fernando Mateus et al. Características morfométricas e trocas gasosas da soja coinoculada com bactérias promotoras de crescimento vegetal e aplicação de bioestimulantes. 2025.

GESSI, Lara dos Santos et al. MECANISMOS DA RESISTÊNCIA MÚLTIPLA DA *Conyza sumatrensis* A HERBICIDAS. 2026.

GEUS NETO, Haroldo Bernardo de. Impacto de bioestimulantes associado a status de água no solo sobre as respostas ecofisiológicas e componentes de rendimento da soja. 2025.

GOMES, Diego Munhoz. Potencial hormético de herbicidas com diferentes mecanismos de ação em *Urochloa decumbens* e *Eucalyptus urograndis*. 2023.

KOLLING, Roger et al. Avaliação do uso de bioestimulantes sobre o rendimento da cultura do trigo. 2023.

LUNA NETO, Erasmo Venâncio de. Índice espectrais de vegetação no monitoramento de parâmetros fisiológicos do milho (*Zea Mays* L.) submetidos à bioestimulantes e sua correlação com a produtividade. 2021.

MACHADO, Igor Eloí Silva et al. Sistemas de culturas para o cultivo de soja no cerrado. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 7, p. e5739-e5739, 2024.

MARTINS, Alan Grigório et al. Aplicação de bioestimulante em sementes de milho cultivado em solos de diferentes texturas. **Scientia Agraria Paranaensis**, p. 440-445, 2016.

MELLO, Cássio; ROSA, Cláudia. SOJA COMO PILAR ESTRATÉGICO DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO: Uma análise econômica do século XXI. **Anais da Feira de Iniciação Científica e Extensão (FICE) Campus Camboriú**, 2025.

MENDES, Kassio Ferreira; SILVA, A. A.; MIELKE, Kamila Cabral. Classificação, seletividade e mecanismos de ação de herbicidas. **Plantas Daninhas: Herbicidas. São Paulo, SP: Oficina de Textos**, 2022.

MENDES, Tainara Rodrigues; ALMEIDA, Janaina Alves de. MICRORGANISMOS MITIGADORES DOS ESTRESSES ABIÓTICOS E PROMOTORES DE CRESCIMENTO NA SOJA. 2025.

MUHL, Ariel et al. Sistemas produtivos e seus impactos na qualidade física do solo e produtividade das culturas na região Oeste do Paraná. 2024.

NASCIMENTO, André Luiz Silva do. A importância da soja na balança comercial brasileira. 2024.

NOGUEIRA, Mirian et al. Desenvolvimento inicial de mudas de pimenta de cheiro (*Capsicum chinense* L.) sob influência do Bioestimulante Stimulate®. **Recital-Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara/MG**, v. 6, n. 3, p. 16-28, 2024.

NOVAIS, Giuliano Tostes et al. Classificação climática aplicada ao Bioma Cerrado. 2019.

OLIVEIRA, Giovani Andreazza de et al. Componentes de produção, produtividade, adaptabilidade e estabilidade fenotípica de materiais de soja no Paraná. 2018.

PICCOLI, EVERTON. A IMPORTÂNCIA DA SOJA PARA O AGRONEGÓCIO: Uma análise sob o enfoque do aumento da produção de agricultores no Município de Santa Cecília do Sul. **FAT–Faculdade e Escola Curso de Administração. Tapejara/RS**, 2018.

PIRES, Pires Cristina Gomes et al. Sustentabilidade do uso da terra no cerrado maranhense: soja e feijão-caupi. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 4, p. 589-608, 2018.

QUEIROZ, Daniel Amorim de et al. USO DE BIOESTIMULANTES À BASE DE AMINOÁCIDOS NA AGRICULTURA. 2024.

QUEIROZ, Daniel Amorim de et al. USO DE BIOESTIMULANTES À BASE DE AMINOÁCIDOS NA AGRICULTURA. 2024.

RAMOS, Adriano Teodoro; DE CREDO ASSIS, Kamila Cristina; DO LIVRAMENTO, Darlan Einstein. Influência do tratamento de sementes de feijão nas características de germinação e desenvolvimento inicial de plântulas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 17, p. e56111738714-e56111738714, 2022.

REZENDE, Lucca Silva et al. Aplicação de biorregulador em diferentes estádios fenológicos na cultura da soja. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 4, p. e14290-e14290, 2025.

RIBEIRO, Daniele Monteiro. **AÇÃO DOS HERBICIDAS NO METABOLISMO DAS PLANTAS**. 2025. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural da Amazônia.

RIBEIRO, Juliana Martins. Dinâmica do carbono orgânico em cronossequências de uso do solo no cerrado mineiro: mudanças nos estoques e simulação com o modelo Century. 2020.

ROCHA, Débora Cristina Tibúrcio; BORGES, Daniela Cristina Silva. INFLUÊNCIA DE BIOESTIMULANTE E FERTILIZANTE ORGANOMINERAL NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE MELANCIA-Citrullus lanatus Thunb. **Scientia Generalis**, v. 6, n. 2, p. 624-636, 2025.

ROSA, Vanessa do Rosário. Ação de bioestimulantes na mitigação do estresse por deficiência hídrica em soja. 2020.

ROSA, Vanessa do Rosário. Ação de bioestimulantes na mitigação do estresse por deficiência hídrica em soja. 2020.

SACCOMORI, Natalia Landskron. Bioestimulantes à base de extrato de algas marinhas na agricultura: estado da arte e potencial de uso. 2021.

SALIB, Natália Couto. **Resposta da soja sob estresse hídrico em presença de bioestimulantes e biorreguladores**. 2025. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SALIB, Natália Couto. **Resposta da soja sob estresse hídrico em presença de bioestimulantes e biorreguladores**. 2025. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANCHES, Alex Guimarães; DA SILVA, Maryelle Barros. Selênio como atenuador do estresse oxidativo induzido por metais tóxicos em plantas: Revisão. **TECNOLOGIA E INOVAÇÃO NA AGRICULTURA: APLICAÇÃO, PRODUTIVIDADE E SUSTENTABILIDADE EM PESQUISA-VOLUME 2**, v. 2, p. 74-84, 2023.

SANO, Edson Eyji et al. Características gerais da paisagem do Cerrado. **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções [General characteristics of the Cerrado landscape. In: Agricultural dynamics in the cerrado: analyzes and projections]**. Embrapa Cerrados, Brasília, p. 21-37, 2020.

SANTOS, Gustavo Henrique et al. ADUBAÇÃO E IRRIGAÇÃO DE FORRAGEIRAS DO GÊNERO Megathyrus. 2022.

SANTOS, João Paulo et al. Efeito de bioestimulante no desenvolvimento do feijoeiro. **Revista Vale**, v. 15, n. 1, p. 815-824, 2017.

SCOVINI, Luiz Augusto Fonseca; DE CARLI BENTO, Isadora Ribeiro. O DESENVOLVIMENTO DA SOJA SOB INFLUÊNCIA DE BIOESTIMULANTES. **17º JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA E 14º SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO IFSULDEMINAS**, v. 17, n. 1, 2025.

SILVA, Johny de Souza. Aspectos fisiológicos e bioquímicos da tolerância induzida por bioestimulante em variedades de feijão-caupi sob déficit hídrico. 2023.

SILVA, Taís da et al. Uso de biorreguladores e bioestimulantes na agricultura. 2019.

SILVA, Taís da et al. Uso de biorreguladores e bioestimulantes na agricultura. 2019.

SOARES, Jerssica Nogueira. **Caracterização fisiológica e responsividade de grupos de maturação da cultura da soja submetida à aplicação de bioestimulante**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUZA, Andressa Fabiane Faria de et al. Vias de sinalização envolvidas no estímulo do crescimento radicular em plantas de arroz ativadas por ácidos húmicos. 2022.

SOUZA, Diego Ferreira de. GÊNESE DE SOLOS EM CERRADO DE CLIMA TROPICAL COM ESTAÇÃO SECA DE INVERNO. 2018.

SOUZA, Edipo Santana Benvindo et al. Parâmetros químicos de solos sob sistema de Pastoreio racional voisin no cerrado. 2025.

TATTO, Lucas et al. Desempenho de sementes de soja tratadas com bioestimulante sob diferentes condições de potencial osmótico. **Revista Teste SPGG**, v. 4, n. 3, p. 397-408, 2018.

TORRES, William Gleidson Alves. Saturação de bases em solo do cerrado para produção de mudas de pequi e baruzeiro. 2016.

VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro. A produção de soja e sua importância na economia brasileira. **Revista de Política Agrícola**, p. e01962-e01962, 2024.

ZILS, Thiago Oliveira et al. INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE SEMENTES COM BIOESTIMULANTES EM CULTIVARES DE SOJA. 2024.



## MANEJO DA FERTILIDADE DO SOLO E FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO EM PASTAGENS DEGRADADAS: ESTRATÉGIAS PARA RECUPERAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE FORRAGEIRAS.



10.5281/zenodo.19856004

**Joacir Morais.**

Graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) (2007–2012). Possui mestrado em Agronomia/Fitotecnia (2017–2019) e doutorado em Ciências Agrárias (2020–2024), ambos pela Universidade Federal do Piauí (UFPI). Atua na área de Ciências Agrárias, com ênfase em produção vegetal, manejo de culturas e desenvolvimento de práticas agrícolas voltadas à sustentabilidade e à produtividade. Currículo Lattes: <https://lattes.cnpq.br/2658219960114244>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8399-9929>. E-mail: [marais.joacir@gmail.com](mailto:marais.joacir@gmail.com)

### INTRODUÇÃO

A expansão da pecuária em regiões tropicais esteve historicamente vinculada à conversão de extensas áreas naturais em pastagens, frequentemente conduzidas sob práticas que desconsideraram a capacidade de suporte dos solos e a dinâmica dos nutrientes. Esse modelo de uso intensivo, associado à ausência de manejo sistemático, contribuiu para a instalação de processos de degradação caracterizados pela redução da cobertura vegetal e pela queda da produtividade das forrageiras, como evidenciado em diferentes contextos regionais por Flávio Pereira, Carlos Ferreira e Fiúza Guimarães (2018). Arruda et al. (2018) demonstram que o uso contínuo do solo sem reposição adequada de nutrientes resulta em empobrecimento progressivo da fertilidade, comprometendo a sustentabilidade dos sistemas pastorais. Esse processo é acompanhado por alterações na estrutura física do solo, com aumento da compactação e limitação do crescimento radicular, fatores que restringem a absorção de água e nutrientes, conforme discutido por Gurgel et al. (2020). A degradação, portanto, não se restringe à dimensão produtiva, mas envolve mudanças estruturais que afetam o funcionamento do sistema solo-planta, repercutindo na eficiência do uso da terra e na estabilidade da produção pecuária.

Entre os fatores que explicam a perda de produtividade das pastagens, destaca-se a redução da fertilidade do solo, sobretudo em relação ao nitrogênio, nutriente diretamente associado ao crescimento vegetativo das gramíneas forrageiras. Em solos tropicais altamente intemperizados, a disponibilidade natural de nutrientes é limitada, sendo agravada pelo manejo inadequado do pastejo e pela ausência de práticas de adubação, o que acelera o esgotamento da capacidade produtiva do sistema, conforme apontado por Soares et al. (2018). Cherubin et al. (2023) destacam que a redução da

matéria orgânica compromete a retenção de nutrientes e a atividade biológica do solo, afetando diretamente a dinâmica da fertilidade. Nesse contexto, a baixa disponibilidade de nitrogênio impacta processos fisiológicos das plantas, reduzindo a produção de biomassa e a qualidade da forragem, como discutido por Pimentel et al. (2016). A ciclagem de nutrientes também é prejudicada em sistemas degradados, uma vez que a menor produção vegetal reduz o retorno de resíduos orgânicos ao solo, limitando a reposição natural de nutrientes, conforme descrito por De Sá Souza et al. (2018). Assim, a degradação da fertilidade não se configura como um fenômeno isolado, mas como parte de um processo integrado que compromete a funcionalidade do sistema produtivo.

Nesse cenário, o manejo da fertilidade do solo assume papel relevante na recuperação das pastagens, ao permitir a recomposição das condições químicas necessárias ao desenvolvimento das forrageiras. Práticas como correção da acidez, adubação e manejo da matéria orgânica contribuem para restabelecer a disponibilidade de nutrientes e melhorar a estrutura do solo, como evidenciado por Carvalho et al. (2017). Paralelamente, a fixação biológica de nitrogênio tem sido incorporada como estratégia complementar, baseada na atuação de microrganismos capazes de converter o nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas, conforme discutido por Dos Santos Branco e Júnior (2022). De Oliveira et al. (2021) destacam que a associação entre leguminosas e bactérias fixadoras amplia a disponibilidade de nitrogênio no sistema, favorecendo a recuperação da produtividade das forrageiras. A integração entre gramíneas e leguminosas em sistemas consorciados tem sido apontada como alternativa viável, ao promover a transferência gradual de nutrientes por meio da ciclagem da biomassa vegetal e da atividade microbiológica do solo, como indicado por Terra et al. (2019). Dessa forma, a articulação entre manejo da fertilidade e processos biológicos permite a construção de sistemas mais equilibrados, nos quais a produtividade é sustentada por interações ecológicas e práticas de manejo ajustadas às condições do ambiente.

## **2. DEGRADAÇÃO DE PASTAGENS E DINÂMICA DA FERTILIDADE DO SOLO**

### **2.1 PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO EM SISTEMAS PASTORAIS TROPICAIS**

Os processos de degradação em sistemas pastorais tropicais decorrem, em grande medida, da combinação entre uso contínuo do solo, ausência de reposição adequada de nutrientes e manejo inadequado da carga animal, configurando um cenário em que a

capacidade produtiva das pastagens é progressivamente comprometida. Em estudos conduzidos na Mata Atlântica de Minas Gerais, Flávio Pereira, Carlos Ferreira e Fiúza Guimarães (2018) demonstram que a degradação se estabelece inicialmente pela redução do vigor das gramíneas e pela diminuição da cobertura vegetal, fenômenos que se intensificam quando não há intervenções corretivas no manejo da fertilidade. De forma convergente, Arruda et al. (2018) evidenciam que a degradação está diretamente associada ao uso da terra sem planejamento, resultando em empobrecimento nutricional do solo e perda da capacidade de suporte animal. Esse processo é agravado pela baixa eficiência na ciclagem de nutrientes, uma vez que sistemas degradados apresentam menor retorno de matéria orgânica ao solo, reduzindo a disponibilidade de elementos essenciais ao crescimento vegetal, como discutido por De Sá Souza et al. (2018). A persistência dessas condições conduz à substituição de espécies forrageiras mais exigentes por plantas menos produtivas e, em muitos casos, por espécies invasoras, consolidando um ciclo de retroalimentação negativa que dificulta a recuperação espontânea das áreas.

No âmbito dos fatores estruturais que sustentam esse processo, a degradação das pastagens tropicais também se articula com alterações significativas na dinâmica da matéria orgânica e na funcionalidade do solo como sistema vivo. Cherubin et al. (2023) indicam que a redução dos estoques de matéria orgânica compromete não apenas a fertilidade química, mas também a estabilidade física e a atividade biológica do solo, elementos que são indissociáveis da produtividade das forrageiras. Em paralelo, Oliveira (2018) destaca que a perda de carbono no solo em áreas degradadas reflete a interrupção dos fluxos naturais de ciclagem, impactando diretamente a sustentabilidade dos sistemas pecuários. Esses efeitos são reforçados por práticas como o superpastejo e o pisoteio excessivo, que intensificam a compactação do solo e limitam o crescimento radicular das plantas, reduzindo sua capacidade de absorção de água e nutrientes, conforme discutido por Gurgel et al. (2020). A degradação, portanto, não se restringe à dimensão produtiva, mas envolve a reconfiguração das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, comprometendo a resiliência dos sistemas pastorais frente às variações ambientais.

Além disso, os processos de degradação em sistemas pastorais tropicais devem ser compreendidos em uma perspectiva mais ampla, que envolve tanto fatores de manejo quanto dinâmicas territoriais e ambientais. Carvalho et al. (2017) apontam que a ausência de práticas de recuperação e o uso contínuo de áreas sem planejamento contribuem para a expansão de pastagens de baixa produtividade, aumentando a pressão sobre novos territórios e, consequentemente, sobre os recursos naturais. Nesse sentido, Kohler et al.

(2021) relacionam a degradação de pastagens à intensificação de processos como desmatamento e degradação de recursos hídricos, evidenciando que o problema extrapola o âmbito agrônomo e alcança dimensões ambientais mais amplas. Por outro lado, abordagens que integram diferentes componentes produtivos, como sistemas agrossilvipastoris, têm demonstrado potencial para alterar essa dinâmica, ao promover melhorias na fertilidade do solo e na eficiência do uso dos recursos, conforme discutido por Veloso, Carvalho e Silveira Filho (2024) e Assis et al. (2019). Ainda assim, a persistência de práticas inadequadas e a limitação no acesso a tecnologias de manejo continuam sendo entraves para a reversão desse quadro, reforçando a necessidade de estratégias que articulem conhecimento técnico, gestão do solo e planejamento produtivo de longo prazo.

## 2.2 ALTERAÇÕES FÍSICAS, QUÍMICAS E BIOLÓGICAS DO SOLO EM PASTAGENS DEGRADADAS

As alterações físicas do solo em pastagens degradadas constituem uma das manifestações mais evidentes da perda de funcionalidade desses sistemas, estando diretamente relacionadas ao manejo inadequado e à pressão contínua exercida pelo pastejo. A compactação do solo, frequentemente observada em áreas com alta lotação animal, modifica a distribuição dos poros, aumentando a microporosidade e reduzindo os espaços responsáveis pela aeração e pela infiltração de água, o que compromete o desenvolvimento radicular das forrageiras, conforme discutido por Gurgel et al. (2020). Estudos conduzidos por Rosa (2016) demonstram que a elevação da densidade do solo está associada à diminuição da qualidade física, refletindo diretamente na capacidade de suporte das pastagens. Em análises realizadas por Furquim et al. (2018), observa-se que pastagens degradadas apresentam maior retenção de água decorrente da compactação, o que não representa uma condição favorável, mas sim um indicativo de restrição estrutural. Esse conjunto de alterações reduz a eficiência do uso da água e dos nutrientes pelas plantas, estabelecendo um ambiente limitante ao crescimento vegetal. Flávio Pereira, Carlos Ferreira e Fiúza Guimarães (2018) apontam que tais modificações físicas não ocorrem de forma isolada, mas se articulam com outros processos de degradação, intensificando a perda de produtividade das pastagens ao longo do tempo.

No que se refere às alterações químicas, a degradação das pastagens implica uma redução progressiva da fertilidade do solo, marcada pela diminuição da disponibilidade de nutrientes essenciais e pela intensificação da acidez. Arruda et al. (2018) evidenciam

que áreas submetidas a uso contínuo sem adubação apresentam esgotamento de elementos como fósforo e potássio, comprometendo a nutrição das plantas forrageiras. Soares et al. (2018) destacam que a ausência de práticas de manejo da fertilidade impede a reposição dos nutrientes exportados pelo sistema, agravando o desequilíbrio químico do solo. Esse cenário é agravado pela baixa eficiência da ciclagem de nutrientes, uma vez que sistemas degradados apresentam menor retorno de resíduos orgânicos ao solo, conforme apontado por De Sá Souza et al. (2018). A redução da matéria orgânica, discutida por Cherubin et al. (2023), compromete a capacidade de retenção de nutrientes e a estabilidade dos agregados, afetando simultaneamente as dimensões química e física do solo. Oliveira (2018) acrescenta que a diminuição dos estoques de carbono em áreas degradadas reflete a perda de qualidade do sistema, reduzindo sua capacidade de sustentar processos produtivos contínuos. Nesse contexto, a baixa fertilidade não apenas limita o crescimento das forrageiras, mas também restringe a eficiência de práticas de recuperação quando não acompanhadas de intervenções adequadas.

As alterações biológicas do solo, por sua vez, representam um aspecto frequentemente menos visível, porém decisivo na dinâmica da degradação das pastagens. A atividade microbiana é diretamente afetada pela redução da matéria orgânica e pela deterioração das condições físicas e químicas do solo, resultando em menor diversidade e funcionalidade dos microrganismos. Alves (2022) demonstra que alterações antrópicas nos sistemas de manejo reduzem significativamente os atributos biológicos do solo, comprometendo processos como a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes. Em sistemas degradados, a biomassa microbiana tende a ser inferior à observada em sistemas manejados de forma integrada, como evidenciado por Assis et al. (2019), o que implica menor eficiência na transformação de nutrientes em formas assimiláveis pelas plantas. De Oliveira et al. (2021) reforçam que a avaliação de parâmetros biológicos constitui um indicador sensível do grau de degradação das pastagens, permitindo identificar alterações que não são imediatamente perceptíveis por análises convencionais. A interrupção desses processos biológicos compromete a resiliência do sistema, dificultando a recuperação natural das áreas degradadas. Nesse sentido, abordagens que promovem a diversificação dos sistemas produtivos, como os sistemas silvipastoris, têm sido apontadas como alternativas capazes de restabelecer parcialmente a atividade biológica do solo, conforme discutido por Luke et al. (2025) e Veloso, Carvalho e Silveira Filho (2024), ao favorecer a incorporação de matéria orgânica e a reativação dos ciclos ecológicos fundamentais ao funcionamento do solo.

### 2.3 IMPACTOS DA DEFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO NA PRODUTIVIDADE DAS FORRAGEIRAS

A deficiência de nitrogênio nos sistemas de pastagens tropicais constitui um dos principais condicionantes da redução da produtividade das forrageiras, uma vez que esse nutriente está diretamente envolvido nos processos metabólicos relacionados à síntese de proteínas, crescimento vegetativo e formação de tecidos. Em condições de baixa disponibilidade, observa-se redução no perfilhamento e no acúmulo de biomassa, comprometendo a capacidade de renovação da pastagem ao longo dos ciclos de pastejo. Resultados experimentais apresentados por De Freitas Martins, Neto e De Oliveira (2025) evidenciam diferenças expressivas entre plantas cultivadas com e sem adubação, com menor número de perfilhos e produção de matéria seca nas condições de deficiência nutricional, o que reforça a dependência das gramíneas forrageiras em relação ao nitrogênio disponível no solo. Essa limitação afeta não apenas o crescimento, mas também a qualidade da forragem, uma vez que a redução do teor de proteínas impacta diretamente o desempenho animal, como discutido por Pimentel et al. (2016), ao abordar as bases ecofisiológicas das plantas forrageiras em ambientes tropicais.

A dinâmica do nitrogênio nos solos de pastagens está intrinsecamente associada à matéria orgânica e à eficiência da ciclagem de nutrientes, fatores que são profundamente alterados em sistemas degradados. Cherubin et al. (2023) destacam que a matéria orgânica atua como reservatório de nitrogênio, sendo responsável pela liberação gradual desse nutriente por meio da atividade microbiana. No entanto, em áreas degradadas, a redução desses estoques limita a disponibilidade de nitrogênio mineral às plantas, comprometendo a fertilidade do solo. De Sá Souza et al. (2018) reforçam que a ciclagem de nutrientes em ecossistemas de pastagens depende do equilíbrio entre entrada e saída de biomassa, sendo prejudicada quando há baixa produção vegetal e menor retorno de resíduos ao solo. Nesse contexto, Oliveira (2018) aponta que a perda de carbono e a simplificação dos sistemas radiculares reduzem a eficiência dos processos biogeoquímicos, restringindo a capacidade do solo de sustentar níveis adequados de nitrogênio. Assim, a deficiência desse nutriente não deve ser compreendida de forma isolada, mas como parte de um processo mais amplo de degradação da fertilidade.

Além das limitações químicas, a deficiência de nitrogênio interage com alterações físicas e biológicas do solo, ampliando seus efeitos sobre a produtividade das forrageiras. A compactação do solo, discutida por Gurgel et al. (2020), reduz a exploração radicular

e dificulta a absorção de nutrientes, agravando os efeitos da baixa disponibilidade de nitrogênio. Em paralelo, alterações na microbiota do solo, descritas por Assis et al. (2019) e Alves (2022), comprometem os processos de mineralização e disponibilização de nutrientes, limitando ainda mais o acesso das plantas ao nitrogênio. Flávio Pereira, Carlos Ferreira e Fiúza Guimarães (2018) observam que a deficiência nutricional está diretamente associada à perda de vigor das pastagens e à diminuição da cobertura vegetal, o que intensifica o processo de degradação. Esse quadro contribui para a redução da capacidade de suporte animal e para a expansão de áreas de baixa produtividade, como destacado por Carvalho et al. (2017), além de reforçar pressões ambientais mais amplas, incluindo a necessidade de abertura de novas áreas, conforme discutido por Kohler et al. (2021). Nesse cenário, estratégias de manejo que visem restabelecer a disponibilidade de nitrogênio, seja por adubação ou por práticas que favoreçam a ciclagem e a fixação biológica, tornam-se indispensáveis para reverter o quadro de baixa produtividade das pastagens tropicais.

### **3. FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO EM SISTEMAS DE PASTAGENS**

#### **3.1 FUNDAMENTOS MICROBIOLÓGICOS DA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO**

A fixação biológica de nitrogênio constitui um processo microbiológico complexo que envolve a conversão do nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas, sendo conduzido por microrganismos diazotróficos capazes de operar em condições específicas do ambiente radicular. Esse mecanismo depende da atuação da enzima nitrogenase, cuja atividade exige elevado aporte energético e condições controladas de oxigenação, uma vez que sua estrutura é sensível à presença de oxigênio livre, conforme discutido por Dias (2020) ao abordar os aspectos moleculares das bactérias fixadoras. A literatura clássica sobre microbiologia do solo demonstra que a transformação do nitrogênio está inserida em um conjunto mais amplo de processos biogeoquímicos que regulam a disponibilidade desse nutriente no sistema, envolvendo mineralização, imobilização e assimilação microbiana, como descrito por Dias (2016). Nesse contexto, Cavalcante et al. (2023) destacam que os grupos funcionais microbianos desempenham papéis distintos e complementares na ciclagem de nutrientes, sendo a fixação biológica um dos mecanismos mais relevantes em sistemas com baixa disponibilidade de nitrogênio mineral. A compreensão desses processos exige considerar o solo como um ambiente



biologicamente ativo, no qual interações entre microrganismos, raízes e matéria orgânica determinam a eficiência da fixação e sua contribuição para a fertilidade.

No âmbito das interações simbióticas, a fixação biológica de nitrogênio em sistemas pastorais ocorre predominantemente por meio da associação entre bactérias do grupo dos rizóbios e plantas leguminosas, resultando na formação de nódulos radiculares especializados. Esses nódulos funcionam como estruturas fisiológicas onde o nitrogênio atmosférico é reduzido e disponibilizado à planta em troca de compostos orgânicos derivados da fotossíntese, estabelecendo uma relação metabólica interdependente, conforme descrito por De Oliveira et al. (2021) e Tavares et al. (2023). Estudos sobre a biodiversidade de rizóbios indicam que a eficiência desse processo varia conforme a compatibilidade entre estirpes bacterianas e espécies vegetais, sendo influenciada por fatores edáficos e ambientais, como evidenciado por Dias et al. (2018) e Chaves et al. (2018). Amaral et al. (2023) ressaltam que leguminosas forrageiras tropicais apresentam elevada capacidade de associação com bactérias fixadoras, o que amplia o potencial de fornecimento biológico de nitrogênio em sistemas de pastagens. Essa interação simbiótica é considerada um dos fundamentos para a construção de sistemas produtivos com menor dependência de fertilizantes nitrogenados, como discutido por Bourscheidt et al. (2019) ao comparar estratégias de fornecimento de nitrogênio em pastagens. A utilização de inoculantes específicos, por sua vez, tem sido apontada como estratégia para aumentar a eficiência da fixação, desde que haja adaptação das estirpes às condições locais, conforme destacado por Delbon (2023).

Além da simbiose clássica, a fixação biológica de nitrogênio também pode ocorrer por meio de bactérias associativas ou de vida livre, ampliando a complexidade das interações no sistema solo-planta. Martins (2021) evidencia que bactérias diazotróficas associadas às raízes podem contribuir para o fornecimento de nitrogênio mesmo na ausência de nodulação típica, atuando de forma complementar ao processo simbiótico. Nesse sentido, Hayashi (2023) demonstra que a reinoculação e coinoculação com diferentes microrganismos podem alterar indicadores microbiológicos do solo, refletindo mudanças na dinâmica do nitrogênio e na eficiência do sistema produtivo. Pires et al. (2026) argumentam que bioinsumos microbianos têm ampliado o entendimento das interações entre solo, planta e microrganismos, ao evidenciar que a fixação biológica deve ser interpretada dentro de uma rede de processos ecológicos interdependentes. A contribuição desses microrganismos está relacionada à capacidade de modular a disponibilidade de nutrientes e de influenciar o metabolismo vegetal, como também

observado por Casarin (2019) ao analisar a integração entre diferentes fontes de nitrogênio e o metabolismo do nutriente em sistemas agrícolas. Nesse cenário, a fixação biológica de nitrogênio se consolida como um processo que ultrapassa a dimensão isolada da nutrição vegetal, inserindo-se em uma lógica de funcionamento sistêmico dos agroecossistemas, na qual a atividade microbiana assume papel determinante na manutenção da fertilidade e na sustentabilidade dos sistemas de produção.

### 3.2 LEGUMINOSAS FORRAGEIRAS E SIMBIOSE COM BACTÉRIAS FIXADORAS

A utilização de leguminosas forrageiras em sistemas de pastagens está diretamente associada à capacidade dessas espécies de estabelecer relações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio, promovendo a incorporação desse nutriente ao sistema de forma biologicamente mediada. Essa associação ocorre a partir de um processo de reconhecimento bioquímico entre a planta hospedeira e os microrganismos do grupo dos rizóbios, resultando na formação de nódulos radiculares onde se desenvolve a fixação do nitrogênio atmosférico, conforme descrito por De Oliveira et al. (2021) e Tavares et al. (2023). Dias (2020) aponta que a eficiência dessa simbiose depende de mecanismos moleculares específicos, incluindo a sinalização entre flavonoides vegetais e fatores Nod bacterianos, que determinam o sucesso da colonização radicular. Nesse contexto, Döbereiner e Baldani (2024) destacam que a compreensão dessas interações foi fundamental para o avanço da agricultura biológica, ao evidenciar o papel das bactérias fixadoras na substituição parcial de fertilizantes nitrogenados. A relevância dessa associação é particularmente evidente em sistemas tropicais, nos quais a baixa disponibilidade natural de nitrogênio limita o desenvolvimento das forrageiras, tornando a simbiose um mecanismo estratégico para o suprimento desse nutriente.

A eficiência da fixação biológica em leguminosas forrageiras está diretamente relacionada à diversidade e à adaptação das estirpes bacterianas presentes no solo, bem como à compatibilidade com as espécies vegetais utilizadas. Estudos conduzidos por Dias et al. (2018) demonstram que a biodiversidade de rizóbios em ambientes semiáridos influencia significativamente a eficiência simbiótica, evidenciando variações na capacidade de nodulação e fixação entre diferentes isolados. Chaves et al. (2018) reforçam que a caracterização genotípica de rizóbios permite identificar estirpes com maior eficiência, especialmente em espécies como *Stylosanthes*, amplamente utilizadas em pastagens tropicais. Amaral et al. (2023) destacam que leguminosas como *Arachis*

pintoi e outras fabáceas forrageiras apresentam elevado potencial de associação simbiótica, contribuindo para o incremento da fertilidade do solo. Nesse cenário, a inoculação com estirpes selecionadas surge como estratégia para otimizar a fixação biológica, sobretudo em solos onde a população microbiana nativa não apresenta alta eficiência, conforme discutido por Delbon (2023). A introdução controlada desses microrganismos permite aumentar a disponibilidade de nitrogênio no sistema e favorecer o estabelecimento das leguminosas em consórcios com gramíneas.

A inserção de leguminosas forrageiras em pastagens consorciadas amplia a complexidade das interações ecológicas no sistema solo-planta, promovendo efeitos que transcendem a fixação direta de nitrogênio. Terra et al. (2019) evidenciam que a presença dessas espécies contribui para a melhoria do valor nutritivo da forragem e para a diversificação da dieta animal, ao mesmo tempo em que favorece a ciclagem de nutrientes. De Sá (2017) ressalta que a eficiência da fixação em sistemas consorciados depende da proporção de leguminosas na pastagem e da interação com a comunidade microbiana do solo. Bourscheidt et al. (2019) demonstram que sistemas que combinam leguminosas, inoculantes bacterianos e manejo adequado apresentam maior eficiência no fornecimento de nitrogênio quando comparados ao uso exclusivo de fertilizantes minerais. Pinaffi et al. (2021) acrescentam que a integração entre fixação biológica e adubação nitrogenada pode resultar em respostas produtivas diferenciadas, indicando que a dinâmica do nitrogênio deve ser analisada de forma integrada. Além disso, a atuação de bactérias diazotróficas associativas, discutida por Martins (2021), amplia as possibilidades de fornecimento biológico de nitrogênio, enquanto Hayashi (2023) evidencia que práticas de coinoculação podem modificar indicadores microbiológicos do solo. Pires et al. (2026) destacam que bioinsumos microbianos têm contribuído para a reconfiguração das interações no agroecossistema, reforçando o papel das leguminosas como mediadoras de processos biológicos. Nesse contexto, a fixação biológica associada às leguminosas forrageiras não se restringe à nutrição vegetal, mas integra uma rede de processos ecológicos que sustentam a fertilidade e a funcionalidade dos sistemas de pastagens.

### 3.3 CONTRIBUIÇÕES DA FBN PARA A CICLAGEM DE NUTRIENTES NO SOLO

A fixação biológica de nitrogênio contribui para a ciclagem de nutrientes no solo ao inserir nitrogênio reativo em sistemas que, em condições naturais, apresentam

limitação desse elemento, promovendo uma dinâmica de incorporação e redistribuição que ultrapassa a absorção direta pelas plantas. O nitrogênio fixado pelas bactérias simbióticas é inicialmente assimilado pelas leguminosas e, posteriormente, transferido ao sistema por meio da senescência de tecidos, exsudação radicular e deposição de resíduos orgânicos, conforme discutido por Dos Santos Branco e Júnior (2022) ao abordar a produção sustentável de forragem. Esse fluxo contínuo de entrada de nitrogênio contribui para a manutenção da fertilidade do solo, especialmente em sistemas onde a adubação mineral é limitada ou inexistente, como ressaltado por De Oliveira et al. (2021) e Tavares et al. (2023). A ciclagem de nutrientes, nesse contexto, está diretamente associada à capacidade do sistema em transformar a biomassa vegetal em matéria orgânica, ampliando a disponibilidade de nitrogênio mineral ao longo do tempo, processo descrito por Dias (2016) ao tratar das transformações do nitrogênio no solo. Assim, a fixação biológica não atua de forma isolada, mas integra um conjunto de processos que sustentam a dinâmica nutricional dos agroecossistemas.

A presença de leguminosas forrageiras desempenha papel relevante na intensificação desses processos, ao promover maior aporte de resíduos orgânicos e estimular a atividade microbiana responsável pela decomposição e mineralização dos nutrientes. Amaral et al. (2023) destacam que leguminosas tropicais apresentam elevada capacidade de fixação, o que resulta em maior acúmulo de nitrogênio na biomassa vegetal e, consequentemente, maior retorno desse nutriente ao solo. Esse mecanismo é reforçado pela atuação de comunidades microbianas especializadas, cuja diversidade e funcionalidade são determinantes para a eficiência da ciclagem, conforme evidenciado por Cavalcante et al. (2023). Bicalho (2022) demonstra que a presença de leguminosas altera atributos biológicos do solo, favorecendo processos de decomposição e disponibilização de nutrientes. Nesse sentido, Döbereiner e Baldani (2024) argumentam que a fixação biológica deve ser compreendida como parte de uma agricultura baseada em processos biológicos, na qual a fertilidade do solo é sustentada por interações entre plantas e microrganismos. A introdução de inoculantes, conforme discutido por Delbon (2023), pode potencializar esses processos ao aumentar a eficiência da fixação e a quantidade de nitrogênio incorporado ao sistema.

Além da incorporação direta de nitrogênio, a fixação biológica contribui para a reorganização das interações no sistema solo-planta, promovendo efeitos indiretos sobre a ciclagem de outros nutrientes e sobre a estrutura do solo. Pires et al. (2026) destacam que bioinsumos microbianos influenciam a dinâmica da rizosfera, alterando a

disponibilidade de nutrientes e a atividade enzimática do solo. Martins (2021) aponta que bactérias diazotróficas associativas podem atuar em conjunto com microrganismos simbióticos, ampliando o fornecimento de nitrogênio e favorecendo a eficiência do sistema. Hayashi (2023) evidencia que práticas de coinoculação modificam indicadores microbiológicos, refletindo mudanças na ciclagem de nutrientes e na interação entre solo e planta. Em sistemas consorciados, De Sá (2017) observa que a diversidade de leguminosas e bactérias fixadoras contribui para maior estabilidade da ciclagem, enquanto Bourscheidt et al. (2019) demonstram que estratégias integradas de fornecimento de nitrogênio apresentam maior eficiência quando comparadas ao uso isolado de fertilizantes minerais. Pinaffi et al. (2021) indicam que a integração entre fixação biológica e adubação pode otimizar a disponibilidade de nutrientes, enquanto Casarin (2019) destaca que diferentes fontes de nitrogênio influenciam o metabolismo vegetal e a dinâmica do nutriente no solo. Nesse cenário, a fixação biológica de nitrogênio se insere como um mecanismo que reorganiza os fluxos de nutrientes, contribuindo para a manutenção da fertilidade e para a funcionalidade dos sistemas de pastagens.

#### **4. ESTRATÉGIAS DE MANEJO PARA RECUPERAÇÃO PRODUTIVA DAS PASTAGENS**

##### **4.1 CORREÇÃO DA ACIDEZ E MANEJO DA FERTILIDADE DO SOLO**

A correção da acidez do solo constitui uma etapa estruturante nos processos de recuperação de pastagens degradadas, especialmente em ambientes tropicais onde predominam solos naturalmente ácidos, com elevada saturação por alumínio e baixa disponibilidade de nutrientes essenciais. Borghi et al. (2018) destacam que a limitação química do solo compromete diretamente o desenvolvimento radicular das forrageiras, restringindo a exploração do perfil e a absorção de água e nutrientes. Nesse contexto, a calagem atua na neutralização do alumínio tóxico e no aumento do pH, promovendo maior disponibilidade de fósforo, cálcio e magnésio, o que favorece a retomada do crescimento vegetal. Kerkhoff et al. (2024) demonstram que a aplicação de corretivos, mesmo em superfície, pode alterar significativamente os atributos químicos do solo, contribuindo para a melhoria das condições de fertilidade ao longo do tempo. Zapotoski e Ferreira (2023) ressaltam que o uso de agrominerais como corretivos amplia as possibilidades de manejo, permitindo ajustes conforme as características específicas do solo. A relevância dessas práticas é reforçada por Dias Filho et al. (2023), ao apontarem que a ausência de correção da acidez figura entre os principais fatores associados à

degradação de pastagens, evidenciando a necessidade de intervenções sistemáticas para restabelecer a funcionalidade do sistema edáfico.

O manejo da fertilidade do solo, por sua vez, não se limita à correção inicial, exigindo uma abordagem contínua baseada na reposição de nutrientes exportados e no monitoramento das condições químicas do solo. De Sousa et al. (2021) indicam que a recuperação produtiva das pastagens depende da adoção de estratégias integradas que incluam adubação de formação e manutenção, ajustadas às exigências das espécies forrageiras. A variabilidade espacial dos atributos químicos, evidenciada por Da Silva Carneiro et al. (2016), reforça a necessidade de manejo localizado, no qual técnicas de agricultura de precisão permitem identificar zonas de fertilidade e orientar a aplicação diferenciada de insumos. Guarçoni et al. (2019) argumentam que a construção da fertilidade do solo deve ser compreendida como um processo acumulativo, no qual práticas de manejo promovem a melhoria gradual dos atributos químicos e biológicos. Nesse sentido, De Resende et al. (2016) introduzem o conceito de solos de fertilidade construída, caracterizados pela ação contínua de intervenções que elevam a capacidade produtiva ao longo do tempo. A importância desse manejo é corroborada por Carvalho et al. (2017), ao destacarem que sistemas sem reposição adequada de nutrientes tendem a apresentar declínio progressivo da produtividade, mesmo em condições favoráveis de clima.

Além dos aspectos químicos, o manejo da fertilidade deve considerar a integração com práticas agronômicas que ampliem a eficiência do sistema e favoreçam a sustentabilidade da produção. Do Nascimento et al. (2025) apontam que a recuperação de pastagens exige a articulação entre correção da acidez, adubação e manejo do pastejo, de modo a evitar a recorrência dos processos de degradação. De Araújo et al. (2023) destacam que, em ambientes semiáridos, a eficiência do manejo da fertilidade está condicionada à adaptação das práticas às limitações hídricas e às características edafoclimáticas locais. Magalhães (2016) demonstra que a combinação entre adubação fosfatada e sistemas de manejo do solo contribui para a melhoria da produtividade das forrageiras, especialmente em áreas previamente degradadas. Nesse cenário, práticas complementares, como o uso de fontes alternativas de corretivos, conforme discutido por Galvão et al. (2020), e a adoção de sistemas consorciados com leguminosas, apontada por Terra et al. (2019), ampliam as possibilidades de manejo. Dos Anjos et al. (2020) ressaltam que o ajuste do manejo do pastejo é indispensável para garantir que os ganhos obtidos com a melhoria da fertilidade sejam convertidos em produtividade animal. Assim,

a correção da acidez e o manejo da fertilidade do solo configuram-se como processos interdependentes, cuja efetividade depende da integração entre práticas químicas, biológicas e de manejo, orientadas por diagnóstico técnico e acompanhamento contínuo.

#### 4.2 SISTEMAS CONSORCIADOS GRAMÍNEAS–LEGUMINOSAS

Os sistemas consorciados entre gramíneas e leguminosas têm sido amplamente reconhecidos como estratégia agronômica capaz de reconfigurar a dinâmica produtiva das pastagens, ao promover interações complementares entre espécies com diferentes exigências nutricionais e padrões de crescimento. Borghi et al. (2018) destacam que a introdução de leguminosas em pastagens degradadas possibilita o incremento do nitrogênio no sistema por meio da fixação biológica, reduzindo a dependência de fertilizantes minerais e favorecendo o restabelecimento da produtividade. Essa abordagem está diretamente associada à diversificação funcional do sistema, uma vez que as leguminosas apresentam maior teor proteico e contribuem para o equilíbrio nutricional da forragem, como apontado por Terra et al. (2019) ao discutir seu papel na recuperação de áreas degradadas. Nesse contexto, Dias Filho et al. (2023) indicam que a consorciação representa alternativa relevante para interromper o ciclo de degradação, ao promover maior eficiência no uso de nutrientes e melhor aproveitamento dos recursos disponíveis no solo. A integração entre espécies, portanto, não apenas amplia a produção de biomassa, mas também altera a dinâmica ecológica do sistema, favorecendo condições mais estáveis de crescimento das forrageiras.

A eficiência dos sistemas consorciados depende, entretanto, de um conjunto de fatores relacionados à escolha das espécies, ao manejo do solo e à condução do pastejo, que determinam o equilíbrio entre competição e complementaridade entre as plantas. Vieira et al. (2023) ressaltam que a seleção de espécies adaptadas às condições edafoclimáticas é determinante para o sucesso do consórcio, especialmente em ambientes semiáridos, onde a disponibilidade hídrica limita o desenvolvimento vegetal. Nesse sentido, De Araújo et al. (2023) destacam que a adoção de espécies tolerantes a estresses ambientais contribui para a estabilidade do sistema produtivo. A dinâmica entre gramíneas e leguminosas requer manejo adequado da altura de pastejo e da lotação animal, de modo a evitar a supressão de uma das espécies, conforme discutido por Dos Anjos et al. (2020). Além disso, Magalhães (2016) demonstra que a consorciação associada à adubação fosfatada favorece o estabelecimento das leguminosas, uma vez que esse nutriente é essencial para o desenvolvimento radicular e para a atividade simbiótica.

A interação entre manejo da fertilidade e consórcio também é evidenciada por Takasu (2019), ao observar que sistemas integrados apresentam maior eficiência produtiva quando comparados a monocultivos. Assim, o desempenho desses sistemas depende da articulação entre práticas de manejo que garantam a coexistência funcional das espécies.

Os efeitos dos sistemas consorciados estendem-se para além da produção de forragem, influenciando atributos do solo, qualidade nutricional e sustentabilidade do sistema produtivo. Galeano et al. (2021) destacam que a consorciação favorece a produção de volumosos com melhor composição nutricional, ampliando as possibilidades de uso na alimentação animal. Loures (2025) evidencia que a presença de leguminosas em consórcio com gramíneas melhora a composição bromatológica da forragem, refletindo em ganhos no desempenho animal. No âmbito do solo, Wruck et al. (2020) apontam que sistemas integrados promovem maior ciclagem de nutrientes e melhor aproveitamento da área agrícola, enquanto Guarçoni et al. (2019) reforçam que práticas que aumentam a diversidade vegetal contribuem para a sustentabilidade da produção agropecuária. A intensificação desses sistemas, conforme discutido por Da Silva Salvador et al. (2021), está associada à adoção de práticas como consórcios rotativos e uso de espécies adaptadas, capazes de aumentar a produtividade sem ampliar a área cultivada. Pasquini Neto (2022) demonstra que a integração de estratégias produtivas eleva a eficiência do sistema, ao mesmo tempo em que reduz impactos ambientais. Nesse cenário, os sistemas consorciados configuram-se como abordagem que integra produção e conservação, ao promover melhorias simultâneas na fertilidade do solo, na qualidade da forragem e na sustentabilidade dos sistemas pecuários.

#### 4.3 INTENSIFICAÇÃO SUSTENTÁVEL E AUMENTO DA PRODUTIVIDADE FORRAGEIRA

A intensificação sustentável dos sistemas de pastagens tem sido discutida como estratégia para ampliar a produtividade forrageira em áreas já consolidadas, evitando a expansão da fronteira agrícola e promovendo maior eficiência no uso dos recursos disponíveis. Borghi et al. (2018) destacam que a recuperação de pastagens degradadas, quando associada à intensificação do manejo, permite elevar significativamente a produção de biomassa por hectare, ao mesmo tempo em que reduz pressões ambientais relacionadas à abertura de novas áreas. Essa abordagem está alinhada ao conceito de uso eficiente do solo, no qual práticas de manejo visam otimizar a relação entre produtividade e conservação dos recursos naturais, conforme discutido por Dias Filho et al. (2023), ao



ênfatizar a necessidade de integrar estratégias de recuperação e prevenção da degradação. Nesse contexto, Do Nascimento et al. (2025) apontam que a intensificação não se limita ao aumento da produção, mas envolve a reorganização do sistema produtivo com base em práticas que promovam equilíbrio entre solo, planta e animal, garantindo maior estabilidade ao longo do tempo.

A adoção de tecnologias e práticas agronômicas constitui um dos principais pilares da intensificação sustentável, envolvendo desde o manejo da fertilidade até a organização do sistema de produção. De Sousa et al. (2021) evidenciam que a recuperação produtiva das pastagens depende da implementação de planos de manejo que integrem adubação, correção do solo e controle do pastejo, permitindo maximizar a produção animal sem comprometer a qualidade do sistema. Nesse sentido, Dos Anjos et al. (2020) destacam que o manejo adequado do pastejo é determinante para transformar ganhos em fertilidade e produtividade vegetal em desempenho zootécnico, ajustando a lotação animal à capacidade de suporte da pastagem. A integração lavoura-pecuária, conforme discutido por Wruck et al. (2020), amplia a eficiência do uso da terra ao permitir a alternância de culturas e a recuperação de áreas degradadas por meio da diversificação produtiva. Takasu (2019) reforça que sistemas integrados apresentam maior produtividade quando comparados a sistemas convencionais, em função da melhoria dos atributos do solo e da maior eficiência na utilização de nutrientes. Assim, a intensificação depende da articulação entre diferentes práticas, ajustadas às condições específicas de cada sistema produtivo.

A intensificação sustentável também envolve a incorporação de estratégias que aumentem a resiliência dos sistemas frente às variações ambientais e às limitações edafoclimáticas. De Araújo et al. (2023) destacam que, em regiões semiáridas, a adoção de espécies adaptadas e o uso de práticas como irrigação complementar são fundamentais para reduzir a variabilidade da produção forrageira ao longo do ano. Evidências presentes na literatura indicam que a combinação de técnicas como consorciação, cobertura do solo e manejo hídrico contribui para o aumento da produtividade sem comprometer os ecossistemas, conforme demonstrado na revisão de Da Silva Salvador et al. (2021), que aponta ganhos produtivos associados à adoção de práticas resilientes. Leite et al. (2022) destacam que o uso de biofertilizantes e indicadores agrometeorológicos pode auxiliar na intensificação de sistemas forrageiros irrigados, ampliando a eficiência produtiva. Nesse cenário, Pasquini Neto (2022) evidencia que a integração de estratégias produtivas resulta em maior desempenho animal e melhor aproveitamento da forragem, enquanto Mendes

et al. (2024) ressaltam que a adoção de tecnologias intensivas deve estar associada à sustentabilidade dos sistemas. Dessa forma, a intensificação sustentável se configura como uma abordagem que articula produtividade, conservação e eficiência, permitindo a construção de sistemas pecuários mais adaptados às demandas contemporâneas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo deste capítulo permite compreender que a recuperação de pastagens degradadas não pode ser tratada como um processo pontual ou restrito a intervenções isoladas, mas como resultado de um conjunto articulado de práticas que envolvem a reestruturação da fertilidade do solo, a reorganização dos fluxos de nutrientes e a redefinição das estratégias de manejo do sistema produtivo. A degradação das pastagens está diretamente associada à ruptura de equilíbrios edáficos e biológicos que sustentam o crescimento das forrageiras, o que exige abordagens que considerem simultaneamente os aspectos físicos, químicos e microbiológicos do solo. Nesse sentido, a compreensão da dinâmica da fertilidade e das limitações impostas pela deficiência de nutrientes, especialmente do nitrogênio, revela que a baixa produtividade não decorre apenas da ausência de insumos, mas de um processo cumulativo de esgotamento e simplificação funcional do sistema solo-planta.

A incorporação de mecanismos biológicos, como a fixação biológica de nitrogênio, redefine a forma de manejo das pastagens ao introduzir uma lógica baseada na intensificação de processos naturais, capazes de sustentar a produtividade com menor dependência de insumos externos. A presença de leguminosas forrageiras e a interação com comunidades microbianas especializadas ampliam a capacidade do sistema de ciclar nutrientes e de manter níveis mais estáveis de fertilidade ao longo do tempo. Esse rearranjo funcional não apenas contribui para o aumento da produção de biomassa, mas também modifica a qualidade da forragem e a eficiência do uso dos recursos disponíveis, evidenciando que a recuperação produtiva depende da integração entre componentes biológicos e práticas de manejo agrônomo.

Por fim, a intensificação sustentável emerge como uma estratégia que articula a necessidade de elevar a produtividade com a manutenção das condições ecológicas do sistema, evitando a expansão de áreas e promovendo maior eficiência no uso da terra. A adoção de sistemas consorciados, o manejo adequado do pastejo e a correção contínua da fertilidade do solo constituem caminhos convergentes para a construção de sistemas mais estáveis e produtivos. No entanto, a efetividade dessas estratégias depende da adaptação

às condições locais, do acompanhamento técnico e da capacidade de integrar diferentes práticas de forma coerente. A recuperação de pastagens, portanto, não se resume ao restabelecimento da produção, mas implica a reconstrução das bases que sustentam o funcionamento do sistema, permitindo que a produtividade seja mantida de forma contínua e compatível com as limitações ambientais.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Mateus Benchimol Ferreira de et al. Métodos de sensoriamento remoto orbital para o diagnóstico e monitoramento dos níveis de degradação de pastagens tropicais: uma contribuição ao plano de agricultura de baixa emissão de carbono. 2022.
- ALVES, Kira Figueredo. Alterações antrópicas nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo sob diferentes manejos no cerrado maranhense. 2022.
- AMARAL, Mayan Blanc et al. Fixação biológica de nitrogênio em leguminosas forrageiras tropicais. 2023.
- ARAÚJO, William Bruno Silva. Silício na mitigação dos efeitos da deficiência de nitrogênio, fósforo e cálcio em forrageiras. 2020.
- ARRUDA, Murilo Rodrigues de et al. Uso da terra, fertilidade do solo e degradação de pastagens: um estudo de caso em dois municípios no Cerrado brasileiro. 2018.
- ASSIS, Paula Camylla Ramos et al. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Agrarian**, v. 12, n. 43, p. 57-70, 2019.
- BICALHO, Thaís Ferreira. Atributos agrofisiológicos do feijão-guandu e biológicos do solo sob manejos de adubação nitrogenada. 2022.
- BLANK, Fábio Júnior et al. AVALIAÇÃO DO MANEJO DO SOLO E DE MAPAS DE FERTILIDADE EM UMA ÁREA DE ABERTURA PARA O CULTIVO DE SOJA NO MUNICÍPIO DE PARAGOMINAS, PARÁ. **Revista Inovação: Gestão e Tecnologia no Agronegócio**, v. 3, p. 420-449, 2024.
- BORGHI, Emerson et al. Recuperação de pastagens degradadas. **Agricultura de baixo carbono: tecnologias e estratégias de implantação**. Brasília, DF: Embrapa, v. 4, p. 105-138, 2018.
- BOURSCHEIDT, M. L. B. et al. Estratégias de fornecimento de nitrogênio em pastagens: fertilizante mineral, inoculante bacteriano e consórcio com amendoim forrageiro. **Scientific Electronic Archives**, v. 12, n. 3, p. 137-147, 2019.

BRUM, Lucas Nascimento. Estratégias de correção da acidez e modos de aplicação de fósforo e potássio: efeitos na variação vertical da acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de grãos. 2023.

BRUNETTO, Gustavo et al. Manejo da fertilidade de solos em pomares de frutíferas de clima temperado. **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água [recurso eletrônico]. Cap. 9, p. 141-158**, 2016.

CARREIRA, Emanuel Ruben dos Santos. Intensificação sustentável da produção de ovinos no montado: estudo da interação entre a produtividade de pastagens naturais e a gestão dinâmica do pastoreio. 2024.

CARVALHO, Wellington Tadeu Vilela et al. Pastagens degradadas e técnicas de recuperação: Revisão. 2017.

CASARIN, Nicolas Braga. **Contribuição de diferentes fontes de nitrogênio para a FBN e o metabolismo de N da soja**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CAVALCANTE, Fernando Gouveia et al. Grupos Funcionais do solo: papel das comunidades microbianas especializadas na ciclagem de nutrientes e sensores de distúrbios ambientais. **Cuadernos de Educación y Desarrollo-QUALIS A4**, v. 15, n. 9, p. 8676-8698, 2023.

CHAVES, Josimar da Silva et al. Caracterização genotípica de rizóbios e eficiência simbiótica em estilosantes (*Stylosanthes* spp.). 2018.

CHERUBIN, Maurício Roberto et al. Matéria orgânica do solo em áreas de pastagens no Brasil. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Brasília: Embrapa**, p. 601-625, 2023.

DA SILVA CARNEIRO, Jefferson Santana et al. Diagnóstico da variabilidade espacial e manejo da fertilidade do solo no Cerrado. **Scientia Agraria**, v. 17, n. 3, p. 38-49, 2016.

DA SILVA CARNEIRO, Jefferson Santana et al. Diagnóstico e manejo da variabilidade espacial da fertilidade do solo no cerrado do Piauí. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v. 14, n. 2, 2016.

DA SILVA SALVADOR, Kaique Renan et al. Intensificação de sistemas de produção de palma forrageira por meio de consorciação rotativa com gramíneas, leguminosas e oleaginosas: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 04, p. 2322-2343, 2021.

- DA SILVA, Wemerson Leonardo Cruz; DOS SANTOS, Lourenço Oliveira; DE SOUSA, Kessia Rosaria. Manejo E Fertilidade Do Solo: Abordando A Tématica Através De Uma Revisão De Literatura. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 2, n. 01, p. 1-17, 2025.
- DE ARAÚJO, Pedro Pereira et al. Estratégias de manejo de pastagens em condições semiáridas. **Editora Licuri**, p. 174-185, 2023.
- DE FREITAS MARTINS, Tábada; NETO, Geyson Ribeiro; DE OLIVEIRA, Celso Pereira. Avaliação da produtividade do Capim Miyagui em solos com adubação e solo sem adubação: Impactos na qualidade da forrageira e no crescimento vegetativo. **NATIVA-Revista de Ciências, Tecnologia e Inovação (ISSN: 2764-1295)**, v. 7, n. 1, p. 81-96, 2025.
- DE OLIVEIRA, Bárbara Ferreira et al. Caracterização da fertilidade do solo do município de São Vicente do Sul–RS. **Boletim Técnico-Científico**, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2024.
- DE OLIVEIRA, Francielle Santana et al. Microrganismos simbioses: fixação biológica de nitrogênio e recuperação de pastagens degradadas. **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**, v. 2, p. 243-275, 2021.
- DE OLIVEIRA, Thiago Soares et al. Avaliação da degradação de pasto nativo embasada em parâmetros de solo. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 2, p. 1871-1885, 2021.
- DE RESENDE, Álvaro Vilela et al. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Inf. Agronômicas**, p. 1-19, 2016.
- DE SÁ SOUZA, Marcondes et al. Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de pastagens tropicais. **Pubvet**, v. 12, p. 172, 2018.
- DE SA, OLAVO AUGUSTO ARQUIMED LOPES. Leguminosas forrageiras em pastos consorciados: Métodos para mensurar a composição botânica da dieta e diversidade e eficiência de bactérias fixadoras de nitrogênio em amendoim forrageiro. 2017.
- DE SOUSA, Eudilene Dalet Vitor et al. Plano de recuperação de áreas de pastagem em vias de degradação para maximizar a produção animal. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v. 19, n. 1, p. 51-57, 2021.
- DELBON, Stéfani Lorraine de Oliveira. Utilização de inoculantes biológicos para fixação de nitrogênio em leguminosas. 2023.
- DIAS FILHO, M. B. et al. Degradação de pastagens: conceitos, processos e estratégias de recuperação e de prevenção. 2023.

- DIAS, Armando Cavalcante Franco. Transformações do nitrogênio no solo. **EJ Cardoso & FD Andreote, Microbiologia do solo**, p. 99-109, 2016.
- DIAS, Marcos A. Moura. **Fixação Biológica de Nitrogênio: características moleculares e simbióticas de bactérias nativas do Semiárido Brasileiro**. Editora Dialética, 2020.
- DIAS, Suelane de Melo et al. Rizóbios isolados de fabáceas forrageiras do semiárido: biodiversidade e eficiência simbiótica. 2018.
- DO NASCIMENTO, Fátima Juliana Lacerda et al. DEGRADAÇÃO DE PASTAGENS: CAUSAS, CONSEQUÊNCIAS E CAMINHO PARA A RECUPERAÇÃO. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 8, n. 1, p. 1-12, 2025.
- DÖBEREINER, Johanna; BALDANI, José Ivo. Bases científicas para uma agricultura biológica. **Ciência e Cultura**, v. 76, n. SPE4, p. 01-16, 2024.
- DOS ANJOS, Albert José et al. Estratégias de manejo do pastejo para produção intensiva de leite em pastos tropicais. **Pubvet**, v. 14, p. 157, 2020.
- DOS SANTOS BRANCO, Jaisson; JÚNIOR, Paulo Prates. Fixação biológica de nitrogênio na produção sustentável de forragem. **Revista Edutec**, v. 3, n. 1, 2022.
- DOS SANTOS BRANCO, Jaisson; JÚNIOR, Paulo Prates. Fixação biológica de nitrogênio na produção sustentável de forragem. **Revista Edutec**, v. 3, n. 1, 2022.
- FLÁVIO PEREIRA, Luís; CARLOS FERREIRA, Cecília Fátima; FIÚZA GUIMARÃES, Ricardo Morato. Manejo, qualidade e dinâmica da degradação de pastagens na Mata Atlântica de Minas Gerais-Brasil. **Nativa**, v. 6, n. 4, 2018.
- FURQUIM, Leonnardo Cruvinel et al. Qualidade física, química e biológica do solo e sensoriamento remoto na recuperação de pastagens degradadas através de sistemas integrados. **Científic@-Multidisciplinary Journal**, v. 5, n. 3, p. 145-160, 2018.
- GALEANO, Edgar Salvador Jara et al. Consórcio entre gramíneas e leguminosas para produção de silagens, fenos e pré-secados. 2021.
- GALVÃO, Jessivaldo Rodrigues et al. Utilização da casca de ovo como fonte de correção da acidez do solo. **Nature and Conservation**, v. 13, n. 2, p. 77-81, 2020.
- GUARÇONI, André et al. Manejo da fertilidade do solo para uma produção agropecuária mais sustentável. **Incaper em Revista**, p. 22-42, 2019.
- GURGEL, Antonio Leandro Chaves et al. Compactação do solo: Efeitos na nutrição mineral e produtividade de plantas forrageiras. **Revista Científica Rural**, v. 22, n. 1, p. 13-29, 2020.

- HAYASHI, Maria Giulia. Indicadores microbiológicos do solo reinoculado e coinoculado com bactérias fixadoras de nitrogênio associadas a micronutrientes na cultura da soja. 2023.
- KERKHOFF, Marcelo et al. Corretivos da acidez do solo aplicados em superfície no sistema soja-milho. 2024.
- KOHLER, Marisa Regina et al. O desmatamento da Amazônia brasileira sob o prisma da pecuária: a degradação dos recursos hídricos no contexto da região norte de Mato Grosso. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e66101119252-e66101119252, 2021.
- LEITE, Renan Matheus Cordeiro et al. Uso biofertilizantes para intensificação sustentável da produção de palma forrageira irrigada e uso indicadores agrometeorológicos para avaliação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 1, n. 01, p. 4181-4201, 2022.
- LOURES, Daniele RS. Composição bromatológica de Uruchloa em sistemas consorciados com leguminosas. **Latin American Archives of Animal Production**, v. 33, n. Supl 1, p. 495-496, 2025.
- LUKE, Eliana et al. Sistemas silvipastoris como ferramenta na recuperação de pastagens degradadas: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 10, p. e025009-e025009, 2025.
- MAGALHÃES, Aline. Recuperação de pastagem com sistemas de manejo do solo, consorciação e adubação fosfatada. 2016.
- MARTINS, Juliana Trindade. Uso de bactérias diazotróficas como técnica de fornecimento de nitrogênio no feijoeiro em sistema orgânico e soja. 2021.
- MENDES, Danilo Valentim et al. Tecnologias e práticas intensivas rumo a uma produção eficiente e sustentável. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 5, p. e4534-e4534, 2024.
- OLIVEIRA, Daniele Costa de. **Potencial de sequestro de carbono no solo e dinâmica da matéria orgânica em pastagens degradadas no Brasil**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- PALAMAR, Natália Giehl. Da pesquisa ao campo: estudo de tecnologias baseadas no conceito de intensificação sustentável. 2023.
- PASQUINI NETO, Rolando. **Efeitos da intensificação e integração como estratégia para o manejo sustentável das pastagens nos sistemas de produção de bovinos de corte da raça Nelore: produtividade da forragem, desempenho animal e consumo alimentar**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PIMENTEL, Róberson Machado et al. Ecofisiologia de plantas forrageiras. **Pubvet**, v. 10, p. 636-720, 2016.

PINAFFI, Camila Dias et al. Adubação nitrogenada mineral e fixação biológica de N em sistemas de produção pastagem-soja. 2021.

PIRES, Bárbara Tainara Ferreira et al. Bioinsumos microbianos na dinâmica solo-planta-microrganismo: implicações na fertilidade, ciclagem de nutrientes, controle biológico e sustentabilidade agroecossistêmica. **Aurum Revista Multidisciplinar**, v. 2, n. 2, p. 1-14, 2026.

ROSA, Aline Rombega Tito. Diagnóstico de áreas de pastagem degradada e correlação com a qualidade física do solo no município de Veríssimo-MG. 2016.

ROZANE, Danilo Eduardo; BRUNETTO, Gustavo; NATALE, William. Manejo da fertilidade do solo em pomares de frutíferas. **Informações Agronômicas**, v. 160, p. 16-29, 2017.

SOARES, João PG et al. Manejo da fertilidade de solos em áreas de pastagem orgânica. **Solos e agroecologia**, p. 271-305, 2018.

TAKASU, Anderson Teruo. Manejo do solo e consórcio de gramíneas ou leguminosas no desenvolvimento e produtividade do milho primeira safra e feijão de inverno em sucessão no sistema plantio direto no cerrado. 2019.

TAVARES, L. R. et al. Microrganismos simbioses: fixação biológica de nitrogênio e recuperação de pastagens degradadas. 2023.

TERRA, Ana BC et al. Leguminosas forrageiras na recuperação de pastagens no Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 2, p. 11-20, 2019.

TERRA, Ana BC et al. Leguminosas forrageiras na recuperação de pastagens no Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 2, p. 11-20, 2019.

VELOSO, CAC; CARVALHO, EJM; SILVEIRA FILHO, A. Dinâmica da fertilidade do solo em sistemas agrossilvipastoris na região Nordeste do estado do Pará. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 7, n. 4, p. e75229, 2024.

VIEIRA, Vanessa Alexandre et al. Utilização de sistemas forrageiros consorciados no semiárido: uma revisão. **Natural Resources**, v. 13, n. 4, p. 41-55, 2023.

WRUCK, F. J. et al. Integração lavoura-pecuária: consórcios forrageiros na entressafra. 2020.

ZAPOTOSKI, Robson Gustavo Trigo; FERREIRA, Kelly Cristina. Agrominerais-fertilizantes e corretivos de acidez do solo. **Revista Foco**, v. 16, n. 12, p. e3622-e3622, 2023.



## MANEJO DE DOR E BEM-ESTAR EM ANIMAIS DE PRODUÇÃO: A EFICÁCIA DO USO DE ANTI-INFLAMATÓRIOS E ANALGÉSICOS EM PROCEDIMENTOS DE DESCORNA E CASTRAÇÃO.



10.5281/zenodo.19856013

**Fernanda Freitas Montefusco**

Médica veterinária, bacharela em Medicina Veterinária pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás, 2025), pós-graduada em Etologia Clínica Animal pela Universidade Facuminas (2025) e pós graduanda em clínica e cirurgia de grandes animais a campo, pelo instituto aprimory (2025). Atua como médica-veterinária comportamental equina, realizando atendimentos a campo nas áreas de comportamento, clínica geral e laserterapia em equinos. Email: [fernandafmontefusco@gmail.com](mailto:fernandafmontefusco@gmail.com). Lattes: <https://lattes.cnpq.br/8266545553952784>

### INTRODUÇÃO

A problematização da dor em animais de produção, especialmente no contexto de práticas zootécnicas invasivas como a descorna e a castração, exige o deslocamento de uma leitura estritamente operacional para um enquadramento analítico que articule dimensões neurofisiológicas, farmacológicas e produtivas, reconhecendo que a dor não se configura como evento episódico restrito ao momento do procedimento, mas como processo dinâmico que envolve ativação nociceptiva periférica, modulação central e respostas sistêmicas que repercutem sobre o comportamento e o desempenho animal. Nesse sentido, a compreensão dos mecanismos envolvidos na gênese e na modulação da dor implica considerar a interação entre mediadores inflamatórios, fibras aferentes e centros superiores do sistema nervoso, cuja ativação desencadeia respostas que extrapolam o plano sensorial e se projetam sobre sistemas endócrinos e metabólicos, como discutido por Menezes (2010) ao abordar os processos de sensibilização associados à dor crônica. A análise desses processos revela que a dor induzida por procedimentos como descorna e castração não pode ser dissociada da resposta inflamatória que se instala a partir da lesão tecidual, caracterizada pela liberação de prostaglandinas, citocinas e outros mediadores que modulam a excitabilidade neuronal, ampliando a intensidade e a duração da experiência dolorosa. Essa dinâmica é aprofundada quando se considera que a dor, ao ativar o eixo hipotálamo-hipófise-adrenal, promove alterações fisiológicas que impactam diretamente o metabolismo e o comportamento alimentar dos animais, o que, conforme Schade (2021), pode resultar em prejuízos produtivos que não são imediatamente atribuídos ao manejo da dor, mas que decorrem de processos biológicos desencadeados pelo estresse. A leitura integrada desses elementos permite compreender que a dor não constitui apenas uma questão ética ou de bem-estar, mas um fenômeno que

incide sobre a eficiência dos sistemas produtivos, exigindo abordagens que articulem conhecimento científico e práticas de manejo.

A complexidade desse fenômeno é ampliada quando se incorporam as especificidades dos procedimentos de descorna e castração, cujas técnicas variam em grau de invasividade, extensão da lesão e impacto fisiopatológico, produzindo respostas diferenciadas que exigem análise contextualizada. Canozzi (2015), ao examinar comparativamente essas práticas, indica que a intensidade da resposta inflamatória e nociceptiva depende não apenas do método empregado, mas também do estágio de desenvolvimento do animal, o que introduz uma variável temporal na avaliação dos efeitos da dor. Essa dimensão é retomada por Cunha (2024), ao discutir que a escolha entre técnicas químicas, térmicas ou cirúrgicas na descorna implica trajetórias distintas de cicatrização e ativação nociceptiva, evidenciando que a decisão técnica não pode ser orientada exclusivamente por critérios operacionais. No caso da castração, a interrupção da função testicular produz não apenas efeitos locais associados ao trauma, mas também alterações endócrinas que influenciam o crescimento, o comportamento e a composição corporal, configurando um quadro em que a resposta fisiológica ao procedimento se desdobra em múltiplos níveis. Júnior (2022), ao analisar a descorna em bovinos à campo, aponta que a ausência de intervenções analgésicas adequadas intensifica a resposta ao estresse, o que reforça a necessidade de integrar estratégias de manejo da dor aos protocolos zootécnicos. Essa perspectiva é tensionada quando se observa que, apesar do avanço do conhecimento científico, a adoção de práticas voltadas à redução da dor ainda encontra resistências no contexto produtivo, frequentemente associadas a fatores econômicos, culturais e logísticos, o que evidencia a existência de uma lacuna entre o conhecimento disponível e sua aplicação efetiva.

A discussão sobre o manejo farmacológico da dor insere-se, portanto, em um campo de análise que exige a articulação entre farmacodinâmica, farmacocinética e condições de uso em sistemas produtivos, considerando que os anti-inflamatórios e analgésicos atuam sobre diferentes pontos da via nociceptiva e da resposta inflamatória, mas apresentam limites relacionados a efeitos adversos e à variabilidade da resposta entre espécies. Pires (2009) destaca que a inibição da síntese de prostaglandinas, embora eficaz na redução da dor e do edema, pode comprometer funções fisiológicas essenciais, o que exige cautela na utilização desses fármacos. Midon (2012), ao discutir o uso de anti-inflamatórios não esteroidais, evidencia que a eficácia analgésica depende da adequação entre o fármaco, a dose e o momento de administração, o que se torna particularmente

relevante em procedimentos que desencadeiam respostas inflamatórias prolongadas. A análise de Romeu (2019) sobre analgesia farmacológica reforça a necessidade de abordagens multimodais, nas quais diferentes classes de fármacos são combinadas para potencializar o efeito analgésico e reduzir a ocorrência de efeitos adversos. Entretanto, Dos Santos (2021) problematiza a prática de utilização de medicamentos de uso humano em animais, indicando que diferenças metabólicas podem alterar significativamente a resposta aos fármacos, o que exige protocolos específicos para cada espécie. Essa articulação entre conhecimento farmacológico e condições de aplicação evidencia que a eficácia do manejo da dor não pode ser avaliada de forma isolada, mas deve ser compreendida como resultado de um conjunto de decisões técnicas que envolvem a escolha do fármaco, o momento de administração e o contexto produtivo.

Diante da complexidade teórica e empírica que atravessa a compreensão da dor em animais de produção, e considerando as limitações observadas na aplicação de estratégias analgésicas nos procedimentos de descorna e castração, torna-se necessário problematizar de forma mais aprofundada as condições em que o manejo farmacológico da dor se mostra eficaz, deslocando o debate de uma perspectiva descritiva para uma análise crítica que considere a interação entre fatores biológicos, técnicos e produtivos, de modo que, diante disso, pergunta-se: qual a eficácia do uso de anti-inflamatórios e analgésicos no manejo da dor e na promoção do bem-estar em animais de produção submetidos a procedimentos de descorna e castração?

O objetivo geral deste estudo consiste em analisar a eficácia do uso de anti-inflamatórios e analgésicos no manejo da dor e na promoção do bem-estar em animais de produção submetidos a procedimentos de descorna e castração, considerando a articulação entre os mecanismos neurofisiológicos da dor, as respostas inflamatórias decorrentes das intervenções e os impactos produtivos e comportamentais associados.

Os objetivos específicos orientam-se pela necessidade de compreender, em primeiro lugar, as bases neurofisiológicas da dor em animais de produção, articulando os processos de transdução, transmissão e modulação nociceptiva com as respostas comportamentais e fisiológicas observáveis, ao mesmo tempo em que se busca analisar os diferentes métodos de descorna e castração, considerando suas implicações fisiopatológicas e os efeitos sobre o organismo animal, bem como avaliar as classes de anti-inflamatórios e analgésicos utilizados nesses contextos, examinando seus mecanismos de ação, eficácia e limitações, e, por fim, discutir as evidências científicas

disponíveis sobre o controle da dor nesses procedimentos, articulando os dados farmacológicos com as condições reais de aplicação nos sistemas produtivos.

A metodologia adotada baseia-se em revisão de literatura de caráter qualitativo, com abordagem analítica e interpretativa, orientada pela seleção criteriosa de estudos científicos que abordam a dor em animais de produção, os procedimentos de descorna e castração e o uso de fármacos analgésicos e anti-inflamatórios, buscando integrar diferentes perspectivas teóricas e empíricas de modo a construir uma compreensão abrangente do fenômeno investigado, sem a pretensão de esgotar o tema, mas com o objetivo de identificar padrões, lacunas e tensões presentes na produção científica existente.

A justificativa deste estudo decorre da necessidade de aprofundar a compreensão da dor em animais de produção para além de sua dimensão ética, incorporando-a como variável central na análise dos sistemas produtivos, na medida em que os efeitos da dor e do estresse sobre o desempenho animal, a ocorrência de complicações sanitárias e a qualidade dos produtos gerados indicam que o manejo inadequado da dor não constitui apenas um problema de bem-estar, mas também um fator que compromete a eficiência e a sustentabilidade da produção pecuária, exigindo a construção de protocolos que articulem conhecimento científico, viabilidade técnica e responsabilidade no manejo dos animais.

## **2. FUNDAMENTOS FISIOLÓGICOS DA DOR E BEM-ESTAR EM ANIMAIS DE PRODUÇÃO**

### **2.1 BASES NEUROFISIOLÓGICAS DA DOR EM ANIMAIS DE PRODUÇÃO**

A compreensão da dor em animais de produção exige o deslocamento de uma abordagem meramente reativa para um enquadramento que considere a complexidade dos circuitos neurobiológicos responsáveis pela transdução, transmissão, modulação e percepção dos estímulos nociceptivos, de modo que a dor deixe de ser interpretada como simples resposta periférica e passe a ser concebida como experiência neurofuncional integrada, envolvendo múltiplos níveis do sistema nervoso central e periférico, cuja dinâmica depende de processos eletroquímicos que articulam terminações nervosas livres, fibras aferentes primárias e centros superiores de processamento. Nesse sentido, a ativação de nociceptores especializados, distribuídos nos tecidos cutâneos, musculares e viscerais, ocorre a partir da liberação de mediadores inflamatórios como prostaglandinas, bradicinina e substância P, os quais alteram o limiar de excitabilidade neuronal e

desencadeiam potenciais de ação que percorrem fibras do tipo A-delta e C até o corno dorsal da medula espinhal, onde ocorre a primeira etapa de modulação sináptica do estímulo doloroso, processo que não se restringe à condução linear, mas envolve mecanismos de amplificação e inibição mediados por interneurônios e neurotransmissores excitatórios e inibitórios, como glutamato e GABA, respectivamente, conforme discutido por Menezes et al. (2010) ao abordar os fundamentos da dor crônica e sua relação com processos de sensibilização central. A partir desse ponto, as vias ascendentes, especialmente o trato espinotalâmico, conduzem a informação nociceptiva até estruturas talâmicas e corticais, onde ocorre a integração sensorial e a atribuição de significado ao estímulo, fenômeno que não pode ser dissociado de componentes afetivos e cognitivos, ainda que em animais de produção tais dimensões sejam inferidas por indicadores indiretos, o que impõe limites metodológicos à avaliação da dor, conforme apontado por Silva (2018) ao discutir a complexidade das escalas de mensuração da dor em animais. Esse percurso neurofisiológico, entretanto, não se configura como fluxo unidirecional, uma vez que sistemas descendentes de modulação, originados em regiões como a substância cinzenta periaquedutal e o bulbo rostroventromedial, exercem controle inibitório ou facilitador sobre a transmissão nociceptiva na medula espinhal, evidenciando que a dor resulta de um equilíbrio dinâmico entre estímulos aferentes e mecanismos moduladores centrais, aspecto aprofundado por Ferrari (2020) ao investigar a participação do córtex motor e das vias descendentes na modulação da dor neuropática.

A análise desses mecanismos revela que a dor em animais de produção não pode ser compreendida sem considerar os fenômenos de sensibilização periférica e central, que alteram significativamente a forma como estímulos subsequentes são processados pelo sistema nervoso, ampliando a resposta dolorosa e prolongando sua duração mesmo após a cessação do estímulo inicial, o que tem implicações diretas em procedimentos zootécnicos como descorna e castração, nos quais há ativação intensa e prolongada de nociceptores. A sensibilização periférica decorre da exposição contínua dos nociceptores a mediadores inflamatórios, reduzindo seu limiar de ativação, enquanto a sensibilização central envolve alterações na excitabilidade dos neurônios do corno dorsal da medula, com aumento da resposta sináptica e recrutamento de vias neuronais adicionais, fenômeno descrito por Garcez et al. (2011) ao tratar das bases neurofisiológicas da analgesia e dos mecanismos envolvidos na modulação da dor. Esse processo é potencializado pela liberação sustentada de neurotransmissores excitatórios e pela ativação de receptores NMDA, que promovem plasticidade sináptica e perpetuam a

resposta dolorosa, configurando um quadro em que a dor passa a ser mantida por alterações estruturais e funcionais do sistema nervoso, independentemente da presença contínua do estímulo nocivo, o que aproxima tais mecanismos das condições de dor crônica discutidas por Lima (2020) em sua análise das bases neurofisiológicas da acupuntura médica. Nesse contexto, torna-se necessário considerar que intervenções analgésicas não atuam apenas na periferia, mas também interferem em circuitos centrais, modulando a liberação de neurotransmissores e a atividade de vias descendentes, o que justifica a utilização de abordagens multimodais no manejo da dor, incluindo fármacos que atuam em diferentes pontos da via nociceptiva, como demonstrado por Rodrigues (2017) ao relatar o uso de gabapentina no controle da dor neuropática, evidenciando a relevância de agentes que modulam a excitabilidade neuronal central. Ao mesmo tempo, a compreensão desses mecanismos amplia o entendimento sobre a eficácia de técnicas não farmacológicas, como a acupuntura, cuja ação analgésica está relacionada à liberação de endorfinas e à modulação de circuitos centrais, conforme discutido por Onetta (2005), o que reforça a necessidade de integrar diferentes abordagens terapêuticas no manejo da dor em sistemas de produção animal.

A incorporação desse arcabouço neurofisiológico na análise da dor em animais de produção impõe a revisão de práticas que historicamente negligenciaram a complexidade dos processos envolvidos na nocicepção, sobretudo ao considerar que a ausência de vocalização ou de respostas comportamentais evidentes não implica ausência de dor, uma vez que os mecanismos centrais de modulação podem mascarar manifestações externas, mantendo, entretanto, a atividade neuronal associada ao estímulo nocivo. A literatura evidencia que bovinos submetidos a procedimentos invasivos apresentam alterações fisiológicas consistentes com ativação do eixo hipotálamo-hipófise-adrenal, aumento de cortisol plasmático e modificações no comportamento alimentar e locomotor, indicando a presença de dor mesmo quando não há sinais explícitos facilmente identificáveis, conforme discutido por Schade et al. (2021) ao revisar o controle da dor em bovinos e suas implicações produtivas e sanitárias. Esse quadro é aprofundado por Bolzer (2022), ao analisar a identificação e gestão da dor em bovinos leiteiros, apontando que a subestimação da dor decorre, em grande medida, da dificuldade em interpretar sinais comportamentais e da ausência de protocolos padronizados de avaliação, o que reforça a necessidade de articular conhecimento neurofisiológico com ferramentas clínicas de monitoramento. A articulação entre os diferentes níveis de processamento da dor, desde a ativação periférica até a modulação central, permite compreender que a experiência

dolorosa em animais de produção não pode ser reduzida a um evento pontual, mas deve ser analisada como processo dinâmico que envolve plasticidade neural, interação entre sistemas excitatórios e inibitórios e influência de fatores ambientais e de manejo, o que implica reconhecer que intervenções inadequadas ou tardias podem não apenas prolongar a dor, mas também alterar permanentemente a forma como o sistema nervoso responde a estímulos futuros, deslocando o debate do campo exclusivamente técnico para uma dimensão que envolve decisões sobre práticas produtivas, estratégias terapêuticas e critérios de avaliação que levem em conta a complexidade biológica da dor enquanto fenômeno neurofisiológico integrado.

## 2.2 INDICADORES COMPORTAMENTAIS E FISIOLÓGICOS DE DOR E ESTRESSE

A identificação da dor e do estresse em animais de produção insere-se em um campo analítico atravessado por tensões metodológicas e epistemológicas, uma vez que a impossibilidade de acesso direto à experiência subjetiva do animal impõe a necessidade de recorrer a indicadores indiretos que articulem manifestações comportamentais e respostas fisiológicas, o que desloca a análise para um plano interpretativo no qual sinais observáveis precisam ser constantemente confrontados com o conhecimento neurofisiológico subjacente. Nesse contexto, a leitura do comportamento assume papel central, não como evidência imediata, mas como expressão mediada por circuitos neurais complexos, nos quais alterações motoras, posturais e interacionais emergem como desdobramentos da ativação nociceptiva e da resposta ao estresse, sendo possível identificar padrões como redução da ingestão alimentar, isolamento social, vocalizações atípicas e mudanças na postura corporal, que não devem ser compreendidos como respostas lineares, mas como manifestações moduladas por fatores ambientais, genéticos e pelo histórico de manejo, conforme problematizado por Silva (2018) ao discutir os limites das escalas descritivas na avaliação da dor animal. A dificuldade de padronização desses indicadores comportamentais é intensificada pela variabilidade interespecífica e pela capacidade dos animais de mascarar sinais de vulnerabilidade, especialmente em contextos de produção, nos quais a pressão seletiva pode favorecer indivíduos que não expressam abertamente sinais de dor, o que implica reconhecer que a ausência de comportamentos evidentes não constitui evidência de ausência de sofrimento, mas pode refletir mecanismos adaptativos mediados por sistemas centrais de modulação da dor, como aqueles descritos por Menezes (2010) ao abordar a interação entre estímulos

periféricos e processos de sensibilização central. A análise comportamental, portanto, exige uma abordagem que integre observação sistemática e conhecimento dos circuitos neurobiológicos, evitando interpretações simplificadoras que reduzam a dor a um conjunto fixo de sinais, ao mesmo tempo em que demanda a construção de instrumentos avaliativos capazes de captar nuances da experiência dolorosa, ainda que de forma indireta, o que tensiona a própria ideia de objetividade na mensuração da dor em animais.

Paralelamente, os indicadores fisiológicos emergem como tentativa de conferir maior robustez à avaliação da dor e do estresse, ao se basearem em parâmetros mensuráveis como níveis hormonais, frequência cardíaca, temperatura corporal e alterações metabólicas, os quais refletem a ativação de sistemas neuroendócrinos associados à resposta ao estresse, especialmente o eixo hipotálamo-hipófise-adrenal, cuja estimulação resulta na liberação de cortisol e outras catecolaminas que modulam a homeostase do organismo frente a estímulos nocivos. No entanto, a utilização desses marcadores não está isenta de ambiguidades, uma vez que tais respostas podem ser desencadeadas por múltiplos fatores não relacionados diretamente à dor, como manejo, transporte ou alterações ambientais, o que exige cautela na interpretação dos dados e reforça a necessidade de análise integrada entre diferentes tipos de indicadores, conforme discutido por Schade (2021) ao examinar o controle da dor em bovinos e as limitações dos parâmetros fisiológicos isolados. A complexidade desses processos é ampliada quando se considera que a resposta fisiológica à dor envolve não apenas a ativação de sistemas periféricos, mas também a participação de estruturas centrais responsáveis pela modulação do estresse e da nocicepção, como a substância cinzenta periaquedutal, cuja atuação na regulação descendente da dor é detalhada por Ferrari (2020), indicando que alterações fisiológicas observadas em animais podem refletir tanto a intensidade do estímulo nociceptivo quanto a eficiência dos mecanismos internos de controle da dor. Nesse sentido, a análise fisiológica não deve ser tomada como medida direta da dor, mas como componente de um sistema interpretativo mais amplo, no qual a articulação com dados comportamentais e contextuais se torna indispensável para evitar reducionismos que comprometam a compreensão do fenômeno.

A integração entre indicadores comportamentais e fisiológicos, longe de constituir solução definitiva para a avaliação da dor e do estresse em animais de produção, revela a necessidade de um modelo interpretativo que reconheça a dor como processo multidimensional, no qual diferentes níveis de organização biológica interagem de forma dinâmica, produzindo manifestações que não podem ser plenamente capturadas por



métricas isoladas. Essa perspectiva é reforçada quando se consideram abordagens terapêuticas que atuam simultaneamente em múltiplos pontos da via nociceptiva, como a acupuntura, cuja eficácia analgésica está associada à modulação de neurotransmissores e à ativação de vias inibitórias centrais, conforme discutido por Garcez (2011) e aprofundado por Lima (2020), indicando que a própria resposta do organismo ao tratamento pode fornecer pistas sobre os mecanismos subjacentes à dor e ao estresse. Ao mesmo tempo, a análise crítica desse campo exige reconhecer que a operacionalização de indicadores em sistemas produtivos é frequentemente condicionada por fatores econômicos e logísticos que limitam a aplicação de protocolos mais sofisticados, o que pode levar à adoção de métodos simplificados que não capturam a complexidade do fenômeno, como aponta Bolzer (2022) ao discutir os desafios na gestão da dor em bovinos leiteiros. A incorporação de fármacos moduladores da dor neuropática, como a gabapentina, discutida por Rodrigues (2017), também evidencia que a resposta ao tratamento pode variar de acordo com a natureza da dor e com o estado do sistema nervoso do animal, reforçando a ideia de que a avaliação da dor não pode ser dissociada das estratégias de manejo adotadas. Nesse cenário, a construção de modelos avaliativos mais refinados depende da articulação entre conhecimento neurofisiológico, observação clínica e análise crítica das condições de produção, de modo que a dor deixe de ser tratada como variável secundária e passe a ser incorporada como elemento constitutivo das práticas de manejo, não apenas como questão ética, mas como dimensão intrínseca à compreensão do funcionamento biológico dos animais submetidos a sistemas produtivos intensivos.

### **3. PROCEDIMENTOS DE DESCORNA E CASTRAÇÃO: IMPACTOS E IMPLICAÇÕES**

#### **3.1 TÉCNICAS DE DESCORNA E SEUS EFEITOS SOBRE O ORGANISMO ANIMAL**

A descorna em bovinos, compreendida como a remoção ou destruição do tecido germinativo do corno, insere-se em um conjunto de práticas zootécnicas historicamente justificadas por critérios de manejo e segurança, mas cuja análise contemporânea exige o exame de seus efeitos sobre o organismo animal a partir de uma perspectiva que articule processos fisiológicos, respostas inflamatórias e alterações neurobiológicas decorrentes da intervenção. As técnicas empregadas variam entre métodos físicos, como a descorna térmica por ferro quente, métodos químicos baseados em agentes cáusticos e

procedimentos cirúrgicos que implicam excisão tecidual mais invasiva, sendo que cada uma dessas abordagens produz impactos distintos sobre os tecidos locais e sobre o sistema nervoso, o que implica compreender que a escolha técnica não se limita a uma decisão operacional, mas envolve diferentes padrões de lesão, inflamação e ativação nociceptiva. Nesse sentido, ao analisar a prática à campo, Júnior (2022) discute que a descorna por cauterização térmica, amplamente utilizada em sistemas extensivos, provoca necrose tecidual controlada na região do botão córneo, desencadeando resposta inflamatória aguda caracterizada pela liberação de mediadores químicos que sensibilizam terminações nervosas periféricas, processo que se desdobra em ativação das vias nociceptivas e repercussões sistêmicas associadas ao estresse. Essa dinâmica é aprofundada quando se considera que o dano tecidual não se restringe à epiderme, alcançando estruturas subjacentes, incluindo periósteo e tecido conjuntivo, o que intensifica a resposta inflamatória e prolonga o processo de cicatrização, aspecto que se aproxima das alterações observadas em lesões térmicas estudadas por Barbosa (2016), nas quais a reparação tecidual envolve fases sucessivas de inflamação, proliferação celular e remodelamento, todas potencialmente moduladas por fatores ambientais e pelo manejo pós-operatório. Ao tensionar essas evidências com as práticas relatadas por produtores, Cardoso (2014) aponta que a escolha do método de descorna frequentemente desconsidera tais implicações fisiológicas, sendo orientada por critérios de custo e facilidade de execução, o que evidencia uma dissociação entre conhecimento técnico-científico e práticas efetivamente adotadas no campo.

A análise dos efeitos da descorna sobre o organismo animal torna-se ainda mais complexa quando se incorporam as diferenças entre o amochamento precoce e a descorna tardia, uma vez que o estágio de desenvolvimento do corno influencia diretamente a extensão do dano tecidual e a intensidade da resposta inflamatória e nociceptiva, configurando cenários fisiopatológicos distintos que exigem abordagens diferenciadas. Canozzi (2015), ao realizar revisão sistemática sobre práticas de castração e descorna, indica que intervenções realizadas em estágios iniciais da vida tendem a envolver menor quantidade de tecido vascularizado e inervado, o que reduz a magnitude da resposta inflamatória, embora não elimine a ativação dos sistemas de dor, enquanto procedimentos tardios implicam maior invasividade, com risco aumentado de hemorragias, infecções e complicações pós-operatórias. Essa distinção é retomada por Cunha (2024), ao discutir que o amochamento químico, apesar de menos invasivo em termos mecânicos, pode provocar queimaduras químicas extensas quando não aplicado de forma controlada,

levando a lesões que extrapolam a área pretendida e ampliam o processo inflamatório, o que coloca em questão a ideia de que métodos menos invasivos do ponto de vista técnico necessariamente resultam em menor impacto fisiológico. A dimensão neurobiológica dessas práticas também não pode ser negligenciada, uma vez que a intensidade e a duração da estimulação nociceptiva influenciam processos de sensibilização central, alterando a forma como o sistema nervoso responde a estímulos subsequentes, o que se articula com a discussão de Hötzel (2016) sobre as barreiras à implementação de práticas que minimizem a dor na descorna, evidenciando que a ausência de intervenções analgésicas adequadas pode não apenas intensificar a dor imediata, mas também modificar padrões de resposta ao estresse ao longo do tempo. Ao inserir a análise no campo das respostas sistêmicas, observa-se que a descorna está associada a alterações fisiológicas como elevação de cortisol plasmático, redução do consumo alimentar e alterações comportamentais que refletem o impacto integrado do procedimento sobre o organismo, o que reforça a necessidade de compreender a descorna como evento biológico complexo, e não como simples intervenção localizada.

A discussão sobre as técnicas de descorna e seus efeitos sobre o organismo animal não pode ser dissociada das estratégias de mitigação da dor e das respostas inflamatórias, que incluem o uso de anestésicos locais, anti-inflamatórios e abordagens complementares que visam reduzir o impacto do procedimento sobre os sistemas fisiológicos do animal, ainda que sua implementação encontre limitações práticas em contextos produtivos. Boto (2015), ao investigar o efeito da anestesia tópica na dor pós-descorna em cabritos, demonstra que a intervenção farmacológica pode reduzir significativamente os indicadores de dor nas fases iniciais do processo inflamatório, embora não elimine completamente a resposta nociceptiva, o que indica que o controle da dor envolve múltiplos mecanismos que não podem ser totalmente suprimidos por uma única estratégia. Essa constatação dialoga com a análise de Schmidt (2025), que ao relatar aspectos e vantagens da descorna bovina, aponta que a adoção de protocolos que integrem técnicas menos invasivas e manejo adequado do pós-operatório pode reduzir complicações e melhorar a recuperação tecidual, ainda que tais práticas dependam de condições estruturais e de capacitação técnica nem sempre disponíveis. Ao tensionar essas perspectivas, torna-se possível compreender que a descorna, enquanto prática consolidada na produção pecuária, opera em um campo de contradições no qual a busca por eficiência produtiva se articula com a necessidade de reconhecer os efeitos biológicos do procedimento, exigindo a incorporação de conhecimentos provenientes da fisiologia,

da neurociência e da medicina veterinária para reconfigurar protocolos que considerem não apenas a execução técnica, mas também as consequências sistêmicas da intervenção sobre o organismo animal, deslocando o debate para um nível em que a análise dos efeitos da descorna passa a integrar discussões mais amplas sobre manejo, ética e organização dos sistemas produtivos.

### 3.2 MÉTODOS DE CASTRAÇÃO E RESPOSTAS FISIOPATOLÓGICAS ASSOCIADAS

A castração em bovinos, inserida no conjunto de práticas zootécnicas voltadas ao controle reprodutivo e à modulação do comportamento e da qualidade da carne, constitui uma intervenção que, sob análise fisiopatológica, revela-se como evento complexo que envolve não apenas a remoção ou interrupção da função testicular, mas a ativação de múltiplos sistemas orgânicos que respondem ao trauma tecidual e à alteração abrupta do equilíbrio endócrino. Os métodos mais frequentemente empregados, como a castração cirúrgica, a castração por esmagamento do cordão espermático com uso de burdizzo e a castração por anel elástico, diferenciam-se não apenas pela técnica operatória, mas sobretudo pelos padrões de lesão induzidos, pela intensidade da resposta inflamatória e pela dinâmica de ativação das vias nociceptivas, o que exige compreender que cada método implica trajetórias fisiológicas distintas. Canozzi (2015), ao analisar comparativamente essas práticas, indica que a castração cirúrgica, embora permita remoção imediata dos testículos, está associada a maior exposição de tecidos internos, risco de hemorragias e potencial de infecção, configurando um cenário em que a resposta inflamatória aguda é intensa e prolongada, enquanto métodos como o uso de anéis elásticos produzem isquemia progressiva, levando à necrose tecidual ao longo do tempo, o que, embora reduza o risco imediato de sangramento, mantém a ativação nociceptiva por períodos mais extensos. Essa diferença temporal na manifestação da dor e do estresse implica reconhecer que a intensidade da resposta fisiopatológica não pode ser avaliada apenas pela invasividade inicial do procedimento, mas deve considerar a duração e a natureza do estímulo nocivo, aspecto que dialoga com as análises de Cunha (2024), que ao tratar de práticas de manejo em bovinos leiteiros evidencia que a escolha do método frequentemente ignora tais nuances, sendo orientada por critérios operacionais que não incorporam plenamente os efeitos biológicos envolvidos.

A resposta fisiopatológica à castração envolve a ativação coordenada de sistemas inflamatórios, neuroendócrinos e imunológicos, configurando um quadro que ultrapassa a dimensão local da lesão e se projeta sobre o funcionamento sistêmico do organismo

animal, com implicações que se manifestam tanto no curto quanto no médio prazo. A lesão tecidual decorrente da ruptura de vasos sanguíneos e da manipulação do cordão espermático desencadeia a liberação de mediadores inflamatórios que promovem vasodilatação, aumento da permeabilidade vascular e recrutamento de células do sistema imune, estabelecendo um ambiente inflamatório que, por sua vez, sensibiliza terminações nervosas periféricas e intensifica a transmissão nociceptiva. Júnior (2022), ao discutir práticas invasivas em bovinos, aponta que tais processos estão diretamente associados à elevação de marcadores de estresse, como o cortisol plasmático, cuja liberação decorre da ativação do eixo hipotálamo-hipófise-adrenal, indicando que a dor não se restringe ao local da intervenção, mas se articula com respostas sistêmicas que afetam o metabolismo e o comportamento animal. Essa dinâmica é aprofundada quando se considera que a castração implica também a interrupção da produção de testosterona, o que produz alterações endócrinas que repercutem sobre o crescimento, a deposição de tecido adiposo e a expressão de comportamentos agonísticos, configurando um rearranjo fisiológico que não pode ser dissociado do trauma inicial. Hötzel (2016), ao analisar barreiras à adoção de práticas que minimizem a dor em procedimentos zootécnicos, argumenta que a subestimação dessas respostas fisiológicas decorre, em parte, da dificuldade de integrar conhecimentos provenientes da fisiologia, da endocrinologia e da ciência do bem-estar animal, o que contribui para a manutenção de protocolos que não consideram a complexidade das alterações induzidas pela castração. Ao mesmo tempo, a análise de processos inflamatórios e de cicatrização, como aqueles discutidos por Barbosa (2016) em estudos sobre lesões térmicas em bezerros, permite estabelecer paralelos com a resposta tecidual observada após a castração, evidenciando que a reparação envolve fases sucessivas que podem ser moduladas por fatores externos, como manejo sanitário e condições ambientais.

A incorporação de estratégias de mitigação da dor no contexto da castração revela-se como campo de disputas entre conhecimento científico e práticas produtivas, uma vez que, embora existam evidências sobre a eficácia de intervenções analgésicas e anestésicas na redução da resposta nociceptiva e inflamatória, sua aplicação ainda é limitada por fatores econômicos e logísticos. Boto (2015), ao investigar o uso de anestesia tópica em procedimentos dolorosos, demonstra que a intervenção farmacológica pode atenuar significativamente os indicadores de dor no período imediato pós-operatório, ainda que não elimine completamente a resposta fisiológica ao trauma, o que sugere que o manejo da dor deve ser compreendido como processo contínuo, e não como intervenção pontual.

Essa perspectiva é retomada por Schmidt (2025), que ao discutir práticas relacionadas à descorna e manejo em bovinos, aponta que a adoção de protocolos que integrem analgesia, técnicas adequadas e manejo pós-operatório pode reduzir complicações e melhorar a recuperação, embora tais medidas dependam de mudanças estruturais nos sistemas de produção. Cardoso (2014), ao analisar atitudes de produtores frente a práticas como amochamento e descorna, oferece elementos que podem ser extrapolados para a castração, indicando que a adoção de medidas voltadas à redução da dor frequentemente esbarra em percepções culturais e limitações de conhecimento técnico, o que evidencia que a transformação das práticas depende não apenas da disponibilidade de tecnologias, mas de processos formativos que reconfigurem a forma como o sofrimento animal é compreendido no contexto produtivo. Nesse cenário, a análise dos métodos de castração e de suas respostas fisiopatológicas associadas desloca-se de uma abordagem descritiva para um campo em que a compreensão dos mecanismos biológicos se articula com questões de manejo, decisão técnica e organização dos sistemas produtivos, exigindo que o debate incorpore a complexidade das interações entre trauma, dor, resposta inflamatória e adaptação fisiológica como elementos constitutivos da prática zootécnica.

### 3.3 CONSEQUÊNCIAS PRODUTIVAS, SANITÁRIAS E COMPORTAMENTAIS DOS PROCEDIMENTOS

A análise das consequências produtivas associadas a procedimentos como descorna e castração exige a superação de leituras que restringem tais práticas a instrumentos de manejo funcional, uma vez que os efeitos sobre o desempenho zootécnico não se limitam à alteração imediata de parâmetros produtivos, mas decorrem de uma complexa interação entre dor, estresse e reorganização fisiológica que incide diretamente sobre o metabolismo, o comportamento alimentar e a eficiência produtiva dos animais. Nesse sentido, a literatura tem indicado que a ativação do eixo hipotálamo-hipófise-adrenal, desencadeada pelo trauma cirúrgico e pela resposta inflamatória, promove elevação de cortisol e redirecionamento de recursos energéticos para processos de defesa e reparação tecidual, o que implica redução da taxa de crescimento e prejuízos no ganho de peso, ainda que tais efeitos variem conforme o método empregado e o momento da intervenção, como sugere Canozzi (2015) ao discutir diferenças entre técnicas de manejo e seus impactos produtivos. Ao considerar a dimensão prática dessas implicações, Cardoso (2014) evidencia que muitos produtores reconhecem empiricamente alterações no desempenho de bezerros submetidos a descorna e castração,

embora tais percepções não sejam necessariamente traduzidas em mudanças nos protocolos adotados, o que revela uma dissociação entre observação empírica e incorporação de estratégias de mitigação. Essa contradição se intensifica quando se observa que a literatura científica, ao analisar tais procedimentos, tende a enfatizar benefícios indiretos como redução de comportamentos agressivos e facilitação do manejo, sem necessariamente problematizar os custos fisiológicos associados ao estresse e à dor, o que exige uma abordagem crítica que considere não apenas os resultados finais, mas os processos biológicos que os produzem. Júnior (2022), ao tratar da descorna em bovinos à campo, insere essa discussão no âmbito do bem-estar animal, apontando que a produtividade não pode ser dissociada das condições fisiológicas impostas ao animal, uma vez que a dor prolongada compromete não apenas o desempenho imediato, mas também a capacidade adaptativa em contextos produtivos.

As consequências sanitárias decorrentes desses procedimentos configuram outro eixo de análise que evidencia a complexidade dos efeitos fisiopatológicos envolvidos, uma vez que a ruptura de barreiras naturais, a exposição de tecidos internos e a formação de áreas necróticas criam condições propícias para a instalação de processos infecciosos, cuja ocorrência depende tanto da técnica utilizada quanto das condições de higiene e manejo pós-operatório. No caso da descorna, a cauterização inadequada ou a aplicação incorreta de agentes químicos pode resultar em lesões extensas e profundas, ampliando o risco de infecções secundárias e retardando o processo de cicatrização, o que se articula com os achados de Barbosa (2016) ao analisar a dinâmica de reparação tecidual em lesões térmicas, nas quais a inflamação prolongada pode comprometer a regeneração adequada dos tecidos. De modo semelhante, a castração, especialmente quando realizada por métodos cirúrgicos, expõe o animal a riscos de hemorragias, miíases e infecções bacterianas, cuja evolução pode comprometer o estado geral do animal e exigir intervenções terapêuticas adicionais, configurando um cenário em que o procedimento inicial desencadeia uma cadeia de eventos que extrapola sua finalidade imediata. Cunha (2024), ao revisar práticas de manejo em bovinos leiteiros, aponta que a ausência de protocolos sanitários rigorosos está entre os principais fatores associados a complicações pós-operatórias, o que evidencia que os efeitos sanitários não decorrem apenas da técnica em si, mas da forma como ela é inserida no sistema produtivo. Essa perspectiva é aprofundada por Schmidt (2025), ao discutir aspectos e vantagens da descorna, indicando que a redução de riscos sanitários depende da combinação entre técnica adequada e manejo criterioso, ainda que tais condições nem sempre estejam presentes em sistemas

extensivos, o que reforça a necessidade de integrar conhecimento técnico e organização produtiva na análise das consequências desses procedimentos.

No plano comportamental, os efeitos da descorna e da castração revelam-se igualmente complexos, uma vez que a dor e o estresse associados a essas intervenções produzem alterações que não se restringem ao período imediato pós-operatório, mas podem influenciar padrões de comportamento ao longo do desenvolvimento do animal, afetando sua interação com o ambiente, com outros indivíduos e com os manejadores. Hötzel (2016), ao discutir barreiras à minimização da dor em bezerras leiteiras, destaca que alterações comportamentais como redução da atividade, isolamento social e mudanças na ingestão alimentar devem ser interpretadas como manifestações de um estado fisiológico alterado, no qual a dor atua como moduladora do comportamento, e não como evento isolado. Essa leitura é tensionada quando se considera que a castração, ao reduzir a produção de testosterona, promove mudanças no comportamento agonístico, diminuindo a agressividade e facilitando o manejo, o que frequentemente é utilizado como justificativa para a prática, sem que se problematize o processo pelo qual tais mudanças são alcançadas e os custos fisiológicos associados. Boto (2015), ao investigar intervenções voltadas à redução da dor, demonstra que a modulação da resposta nociceptiva pode influenciar diretamente o comportamento pós-operatório, indicando que alterações comportamentais não são apenas consequência inevitável do procedimento, mas podem ser mitigadas por estratégias adequadas de manejo. Ao articular essas dimensões, torna-se possível compreender que as consequências comportamentais não podem ser analisadas de forma dissociada das respostas fisiológicas e produtivas, uma vez que todas emergem de um mesmo processo de interação entre trauma, dor e adaptação, o que exige uma abordagem que reconheça a interdependência entre esses níveis e questione a naturalização de práticas que, embora funcionalmente justificadas, produzem efeitos que atravessam a biologia e o comportamento dos animais de forma duradoura.

#### **4. MANEJO FARMACOLÓGICO DA DOR: ANTI-INFLAMATÓRIOS E ANALGÉSICOS**

##### **4.1 CLASSES DE ANTI-INFLAMATÓRIOS E ANALGÉSICOS UTILIZADOS EM ANIMAIS DE PRODUÇÃO**

A utilização de anti-inflamatórios e analgésicos em animais de produção insere-se em um campo farmacológico cuja complexidade não pode ser reduzida à distinção



simplificada entre alívio da dor e controle da inflamação, uma vez que tais fármacos operam em múltiplos níveis da resposta biológica ao trauma, interferindo em cascatas bioquímicas que envolvem mediadores inflamatórios, vias nociceptivas e mecanismos de homeostase sistêmica. Nesse contexto, os anti-inflamatórios não esteroidais constituem a classe mais amplamente empregada, atuando predominantemente pela inibição das enzimas ciclooxigenases, responsáveis pela conversão do ácido araquidônico em prostaglandinas, cuja participação na gênese da dor, do edema e da febre é amplamente documentada, ainda que a supressão dessas vias produza efeitos que extrapolam o controle sintomático e incidem sobre processos fisiológicos basais, como a proteção da mucosa gástrica e a perfusão renal, conforme discutido por Pires (2009) ao analisar a atividade farmacodinâmica desses compostos. A diferenciação entre inibidores não seletivos e seletivos da COX-2, retomada por Midon (2012), introduz um elemento de complexidade adicional, na medida em que os fármacos seletivos foram desenvolvidos com a proposta de reduzir efeitos adversos gastrointestinais, mas sua utilização prolongada tem sido associada a outras alterações sistêmicas, o que tensiona a ideia de seletividade como solução farmacológica definitiva. Essa discussão é aprofundada por Silva (2023), ao examinar o uso de diclofenaco e meloxicam em diferentes espécies, apontando que a variabilidade interespecífica na resposta aos fármacos exige cautela na extrapolação de protocolos, sobretudo em sistemas de produção nos quais a diversidade fisiológica dos animais e as condições ambientais podem alterar significativamente a farmacocinética e a farmacodinâmica dos medicamentos. A análise dessas classes farmacológicas, portanto, não pode ser dissociada de uma compreensão integrada dos mecanismos de ação e dos efeitos sistêmicos, o que implica reconhecer que o uso de anti-inflamatórios em animais de produção envolve uma negociação constante entre controle da dor e manutenção da integridade fisiológica.

A dimensão analgésica, por sua vez, envolve um espectro mais amplo de substâncias que atuam em diferentes pontos da via nociceptiva, desde a periferia até os centros superiores de modulação da dor, o que exige uma abordagem que articule diferentes classes farmacológicas de forma a atingir múltiplos mecanismos envolvidos na experiência dolorosa. Aleixo (2017), ao discutir a classificação e as vias de administração dos analgésicos, destaca que a analgesia farmacológica não se restringe aos anti-inflamatórios, incluindo também opioides, anestésicos locais e fármacos adjuvantes que modulam a excitabilidade neuronal, o que reforça a necessidade de compreender o manejo da dor como processo multimodal. Essa perspectiva é retomada por Romeu (2019), ao

analisar a analgesia em medicina veterinária, indicando que a combinação de fármacos com diferentes mecanismos de ação pode potencializar o efeito analgésico e reduzir a necessidade de doses elevadas de um único agente, o que se articula com a tentativa de minimizar efeitos adversos. A utilização de medicamentos originalmente desenvolvidos para humanos em animais domésticos, discutida por Dos Santos (2021), introduz outro elemento de complexidade, uma vez que a adaptação de protocolos farmacológicos entre espécies envolve riscos relacionados à toxicidade e à eficácia, especialmente quando se consideram diferenças metabólicas que podem alterar a biodisponibilidade e o tempo de ação dos fármacos. Essa problemática torna-se particularmente evidente no contexto dos sistemas produtivos, nos quais a padronização de tratamentos pode não contemplar a variabilidade individual dos animais, o que exige uma abordagem que considere não apenas a classe farmacológica, mas também as condições específicas de uso, incluindo dose, via de administração e duração do tratamento, de modo a evitar tanto a subdosagem, que compromete o controle da dor, quanto a superdosagem, que aumenta o risco de efeitos adversos.

A análise crítica das classes de anti-inflamatórios e analgésicos em animais de produção não pode prescindir da consideração dos efeitos colaterais e das implicações do uso prolongado, uma vez que a interferência em vias fisiológicas essenciais pode produzir alterações que, embora não sejam imediatamente perceptíveis, impactam o funcionamento sistêmico do organismo ao longo do tempo. Neto (2022), ao investigar os efeitos tóxicos dos anti-inflamatórios não esteroidais, aponta que a inibição da síntese de prostaglandinas pode comprometer a função renal e a integridade da mucosa gastrointestinal, especialmente em situações de uso contínuo ou em condições de estresse fisiológico, o que é corroborado por Júnior (2020) ao discutir os efeitos adversos de inibidores da COX-2 em equinos, indicando que a seletividade enzimática não elimina completamente os riscos associados à terapia. Essa discussão é ampliada por Júnior (2021), ao abordar o uso de meloxicam em equinos, evidenciando que a duração do tratamento e a dose administrada são variáveis críticas na determinação do perfil de segurança do fármaco, o que se articula com a análise de das Neves (2022) sobre os prós e contras do uso de anti-inflamatórios em lesões musculares e ligamentares, destacando que a supressão da inflamação pode interferir em processos de reparação tecidual quando não adequadamente manejada. No contexto específico de bovinos, Sousa (2017) discute a aplicação de anti-inflamatórios no tratamento de condições inflamatórias agudas, evidenciando que a resposta ao tratamento depende da interação entre o estado fisiológico

do animal e as características do fármaco utilizado, o que reforça a necessidade de uma abordagem que considere a farmacologia não como conjunto de soluções padronizadas, mas como campo de decisões que exigem articulação entre conhecimento científico, avaliação clínica e condições de manejo, deslocando o debate para uma dimensão em que a escolha terapêutica passa a ser analisada em termos de suas implicações biológicas e produtivas no contexto dos sistemas de produção animal.

#### 4.2 EVIDÊNCIAS CIENTÍFICAS SOBRE A EFICÁCIA NO CONTROLE DA DOR EM DESCORNA E CASTRAÇÃO

As evidências científicas sobre a eficácia do controle farmacológico da dor em procedimentos como descorna e castração precisam ser compreendidas a partir de uma leitura que não reduza o efeito analgésico à supressão imediata de sinais comportamentais, pois a dor produzida por essas intervenções resulta da articulação entre lesão tecidual, inflamação, ativação nociceptiva periférica e modulação central, exigindo estratégias capazes de atuar em diferentes momentos da cascata fisiopatológica. Nesse campo, os anti-inflamatórios não esteroidais ocupam posição recorrente por interferirem na síntese de prostaglandinas, mediadores diretamente envolvidos na sensibilização dos nociceptores após trauma cirúrgico ou térmico, o que permite compreender por que fármacos como meloxicam, flunixin meglumine, cetoprofeno e diclofenaco aparecem com frequência em protocolos voltados à redução da dor pós-procedimento. Pires (2009), ao analisar o potencial analgésico, anti-edematogênico e antipirético de fármacos anti-inflamatórios, contribui para situar essa classe como ferramenta de interferência sobre manifestações inflamatórias que acompanham a dor, mas sua discussão também permite tensionar a ideia de eficácia como fenômeno unicamente benéfico, já que a mesma inibição de mediadores inflamatórios pode se associar a riscos gastrointestinais e sistêmicos quando utilizada sem avaliação clínica adequada. No contexto dos animais de produção, essa tensão adquire densidade própria, porque a castração e a descorna não produzem apenas dor aguda, mas instauram um processo inflamatório que se prolonga no tempo, atravessando fases de edema, hiperalgesia, cicatrização e reorganização tecidual, de modo que a analgesia efetiva depende tanto do momento de administração quanto da duração da cobertura farmacológica. Midon (2012), ainda que voltado à terapêutica analgésica em pequenos animais, permite compreender que os anti-inflamatórios não esteroidais apresentam maior racionalidade terapêutica quando inseridos em protocolos que reconhecem a temporalidade da inflamação, e essa leitura pode ser transposta

criticamente para bovinos submetidos a descorna e castração, desde que se considerem as diferenças de espécie, metabolismo, idade, peso, via de administração e finalidade produtiva. Assim, a evidência de eficácia não deve ser confundida com a simples constatação de que determinado fármaco reduz dor, pois o dado científico precisa ser lido em relação à intensidade do procedimento, ao tipo de lesão produzida, à janela de ação do medicamento, à presença ou ausência de anestesia local e ao risco de se tratar a dor de modo tardio, quando a sensibilização periférica e central já se encontra instalada.

A literatura farmacológica também indica que a analgesia em descorna e castração tende a ser mais consistente quando estruturada de modo multimodal, combinando agentes que atuam sobre diferentes alvos fisiológicos, pois a dor desses procedimentos não decorre de uma única via, mas de uma rede de estímulos nociceptivos que envolve tecido cutâneo, estruturas vasculares, terminações nervosas, periósteo, escroto, cordão espermático e mediadores inflamatórios liberados após a intervenção. Romeu (2019), ao discutir a analgesia farmacológica em medicina veterinária, contribui para pensar a combinação entre anestésicos locais, anti-inflamatórios e analgésicos como estratégia voltada à redução da intensidade dolorosa e da resposta neuroendócrina ao estresse, perspectiva que se aproxima das exigências clínicas dos procedimentos zootécnicos, nos quais a anestesia local isolada pode bloquear temporariamente a condução nervosa, mas não necessariamente controla a inflamação subsequente. Aleixo (2017), ao classificar analgésicos, indica que a escolha da via de administração e do mecanismo de ação deve acompanhar a natureza da dor, o que desloca o debate da mera disponibilidade do medicamento para a adequação entre fármaco, procedimento e resposta esperada. Nessa lógica, a administração prévia ou perioperatória de anti-inflamatórios tende a apresentar maior coerência fisiológica do que a intervenção exclusivamente posterior, pois atua antes que a cascata inflamatória amplifique a excitabilidade dos nociceptores, aspecto que dialoga com Rodrigues (2016) ao analisar o uso do meloxicam para prevenir respostas inflamatórias em bovinos de corte, sugerindo que a eficácia terapêutica está relacionada à capacidade de antecipar a resposta orgânica ao trauma. Entretanto, a transposição acrítica de esquemas terapêuticos entre espécies e categorias produtivas permanece problemática, como adverte Dos Santos (2021) ao tratar da prescrição de medicamentos de uso humano em animais, pois a diferença metabólica entre espécies pode alterar margem de segurança, toxicidade e duração do efeito. Essa advertência torna-se ainda mais sensível quando se observa que a descorna e a castração são frequentemente realizadas em condições de campo, com variabilidade de higiene, contenção, idade dos

animais e capacitação técnica, circunstâncias que interferem na eficácia real dos protocolos e fazem com que a evidência científica só se converta em benefício clínico quando articulada a um manejo que respeite dose, intervalo, via, período de carência e acompanhamento pós-operatório.

A eficácia dos anti-inflamatórios no controle da dor, portanto, deve ser avaliada em conjunto com seus limites, pois a supressão farmacológica da inflamação não equivale à eliminação completa do sofrimento associado à descorna e à castração, especialmente quando os procedimentos são realizados sem anestesia local, sem planejamento prévio ou sem monitoramento posterior. Silva (2023), ao revisar o uso de diclofenaco e meloxicam em diferentes animais, permite problematizar a falsa homogeneidade dessa classe farmacológica, uma vez que cada fármaco possui perfil próprio de ação, risco e indicação, o que impede tratar anti-inflamatórios como categoria intercambiável. A discussão de Sousa (2017), ao avaliar anti-inflamatórios não esteroidais em bovinos, amplia essa leitura ao demonstrar que a resposta terapêutica depende das condições fisiopatológicas do animal, indicando que inflamação, metabolismo e dor formam um campo de interação no qual o medicamento atua de modo situado, e não como solução universal. Por outro lado, Neto (2022) adverte que os efeitos tóxicos dos anti-inflamatórios não esteroidais, especialmente sobre mucosa gastrointestinal e função renal, impõem cautela diante do uso prolongado, enquanto Júnior (2020) e Júnior (2021), ao tratarem dos inibidores de COX-2 em equinos, indicam que a seletividade farmacológica pode reduzir determinados efeitos adversos, mas não elimina riscos associados à duração do tratamento e à repetição de doses. Essa tensão é particularmente relevante para procedimentos dolorosos em animais de produção, pois a busca por analgesia deve ser pensada em relação à segurança do animal, à qualidade da recuperação, ao risco de resíduos em produtos de origem animal e à viabilidade de protocolos que não sacrifiquem o bem-estar em nome da simplificação operacional. Das Neves (2022), ao discutir prós e contras dos anti-inflamatórios em lesões musculares e ligamentares, fornece uma chave analítica para compreender que a inflamação não é apenas evento patológico a ser bloqueado, mas também componente do reparo tecidual, o que exige equilíbrio entre reduzir dor e preservar processos biológicos de cicatrização. Assim, as evidências disponíveis apontam para a eficácia dos anti-inflamatórios e analgésicos como parte de protocolos integrados, especialmente quando associados a anestesia local e manejo pós-operatório, mas também revelam que a efetividade clínica em descorna e castração depende de uma racionalidade terapêutica que

considere o animal como organismo submetido a trauma, dor, estresse e reparação, recusando tanto a negligência analgésica quanto o uso farmacológico indiscriminado.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo deste estudo permitiu deslocar o problema da dor em animais de produção, especialmente no contexto de procedimentos como descorna e castração, de uma abordagem instrumental e operacional para um campo de investigação que exige a articulação entre dimensões neurofisiológicas, farmacológicas, comportamentais e produtivas, revelando que a dor não pode ser compreendida como evento isolado ou como consequência inevitável e secundária das práticas zootécnicas, mas como fenômeno estrutural que atravessa o funcionamento biológico dos animais e incide diretamente sobre os resultados produtivos e sanitários dos sistemas de criação. Nesse sentido, ao retomar o objetivo central de analisar a eficácia do uso de anti-inflamatórios e analgésicos no manejo da dor e do bem-estar em animais submetidos a tais procedimentos, torna-se possível afirmar que a investigação não se limitou à verificação de efeitos farmacológicos, mas avançou na compreensão das condições em que esses efeitos se produzem, considerando a temporalidade da resposta inflamatória, a complexidade das vias nociceptivas e a influência de fatores externos como manejo, ambiente e estágio de desenvolvimento dos animais. A resposta à questão de pesquisa, portanto, não pode ser formulada em termos binários ou conclusivos, pois a eficácia dos fármacos não se apresenta como atributo absoluto, mas como resultado de uma interação entre características do medicamento, momento de administração, técnica utilizada e contexto produtivo, o que implica reconhecer que a analgesia farmacológica, embora capaz de reduzir significativamente os efeitos da dor, não elimina integralmente os impactos fisiológicos e comportamentais dos procedimentos, especialmente quando aplicada de forma isolada ou tardia. A análise crítica dos dados disponíveis permite compreender que a persistência de práticas que negligenciam a dor não decorre exclusivamente da ausência de conhecimento técnico, mas de uma lógica produtiva que historicamente subordinou o bem-estar animal a critérios de eficiência imediata, exigindo, portanto, uma reconfiguração das bases epistemológicas que orientam o manejo, na qual a dor deixa de ser tratada como variável residual e passa a ser integrada como elemento constitutivo da análise produtiva.

A rearticulação dos objetivos específicos evidencia que a compreensão das bases neurofisiológicas da dor, a identificação de indicadores comportamentais e fisiológicos,

a análise dos efeitos dos procedimentos e a avaliação das classes farmacológicas utilizadas não operam como etapas independentes, mas como dimensões interdependentes de um mesmo fenômeno, cuja complexidade impede abordagens fragmentadas ou reducionistas. Ao examinar os mecanismos de transdução e modulação da dor, torna-se evidente que a ativação nociceptiva desencadeada por descorna e castração não se limita ao momento da intervenção, mas se prolonga por meio de processos de sensibilização periférica e central que alteram a resposta do sistema nervoso, o que repercute sobre o comportamento e o desempenho produtivo dos animais. Nesse cenário, a utilização de anti-inflamatórios e analgésicos emerge como estratégia que, embora tecnicamente fundamentada, apresenta limites quando não inserida em protocolos que considerem a multidimensionalidade da dor, incluindo o uso de anestesia local, a escolha adequada da técnica e o manejo pós-operatório. A análise dos achados evidencia que a eficácia farmacológica depende de uma racionalidade que articule conhecimento científico e aplicação prática, evitando tanto a subutilização dos recursos disponíveis quanto sua aplicação indiscriminada, o que pode gerar efeitos adversos e comprometer a integridade fisiológica dos animais. A resposta analítica à problemática proposta, portanto, aponta para a necessidade de superar a dicotomia entre produção e bem-estar, demonstrando que a redução da dor não constitui obstáculo à eficiência produtiva, mas condição para sua sustentabilidade, na medida em que animais submetidos a menor carga de estresse apresentam melhor desempenho, menor incidência de complicações sanitárias e maior capacidade adaptativa aos sistemas de criação.

A síntese crítica dos principais achados permite identificar que os efeitos produtivos, sanitários e comportamentais dos procedimentos analisados não podem ser compreendidos de forma dissociada, uma vez que todos derivam de um mesmo processo de interação entre trauma, resposta inflamatória e modulação neuroendócrina, o que exige uma abordagem integrada que reconheça a interdependência entre essas dimensões. A análise das práticas de campo revela que a escolha de técnicas e protocolos frequentemente desconsidera essa complexidade, sendo orientada por fatores econômicos e logísticos que limitam a incorporação de medidas mais sofisticadas de manejo da dor, o que evidencia uma lacuna entre o conhecimento científico disponível e sua aplicação efetiva. As contribuições deste estudo, nesse contexto, situam-se tanto no plano teórico, ao propor uma leitura integrada da dor como fenômeno multidimensional, quanto no plano prático, ao indicar a necessidade de reconfiguração dos protocolos de manejo, com ênfase na adoção de abordagens multimodais que combinem diferentes classes

farmacológicas e técnicas de intervenção. Entretanto, é necessário reconhecer que a análise desenvolvida encontra limites relacionados à disponibilidade e à heterogeneidade dos estudos existentes, à variabilidade das condições de produção e à dificuldade de padronização dos indicadores de dor, o que impede a formulação de generalizações amplas e exige cautela na extrapolação dos resultados. Esses limites, longe de comprometer a validade da investigação, apontam para a necessidade de aprofundamento das pesquisas, especialmente em contextos que considerem a diversidade de sistemas produtivos e a especificidade das diferentes espécies e categorias animais.

A indicação de caminhos para pesquisas futuras emerge, portanto, como desdobramento necessário de uma análise que reconhece tanto os avanços quanto as lacunas do campo investigado, sugerindo a ampliação de estudos que integrem abordagens experimentais e observacionais, capazes de avaliar de forma mais precisa a eficácia de diferentes protocolos analgésicos em condições reais de produção. Torna-se igualmente pertinente o desenvolvimento de instrumentos mais refinados para a avaliação da dor, que articulem indicadores comportamentais, fisiológicos e, quando possível, biomarcadores específicos, permitindo uma leitura mais acurada da experiência dolorosa em animais de produção. A necessidade de investigar os efeitos de longo prazo dos procedimentos e das intervenções farmacológicas também se impõe como agenda relevante, uma vez que a maioria dos estudos concentra-se em respostas imediatas, sem considerar plenamente as implicações para o desenvolvimento e o desempenho produtivo ao longo do ciclo de vida dos animais. Nesse sentido, a reflexão proposta ao longo deste trabalho conduz a um deslocamento do debate para um nível em que a análise da dor e de seu manejo não se restringe a uma questão técnica, mas se insere em um campo mais amplo de discussão sobre a organização dos sistemas produtivos, a relação entre eficiência e bem-estar e os critérios que orientam a tomada de decisão no contexto da produção animal, exigindo uma abordagem que combine rigor científico, sensibilidade ética e capacidade de articulação entre diferentes níveis de análise.

## REFERÊNCIAS

- ALEIXO, G. A. S.; Tudury, E. A.; Coelho, M. C. O. C.; Andrade, L. S. S.; Bessa, A. L. N. G. Tratamento da dor em pequenos animais: classificação, indicações e vias de administração dos analgésicos. **Medicina Veterinária**, v. 11, n. 1, p. 29-40, 2017
- BARBOSA, B. S. Efeitos da fototerapia no processo de cicatrização de queimaduras em bezerros. Tese (Doutorado). **Universidade de São Paulo**, s/v., s/n., p. 1-140, 2016



- BOLZER, M. L. Identificação e gestão da dor em bovinos leiteiros. Trabalho acadêmico. **Instituição de Ensino Superior**, s/v., s/n., p. 1-80, 2022
- BOTO, A. A. D. S. D. Efeito da anestesia tópica na dor após descorna de cabritos. Dissertação (Mestrado). **Universidade de Lisboa**, s/v., s/n., p. 1-100, 2015
- CANOZZI, M. E. A. Castração e descorna/amochamento em bovinos de corte: revisão sistemática e meta-análise. Dissertação (Mestrado). **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, s/v., s/n., p. 1-130, 2015
- CARDOSO, C. S. Sustentabilidade da pecuária leiteira no sul do Brasil: atitudes e práticas de agricultores familiares sobre amochamento e descorna de bezerras. Dissertação (Mestrado). **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, s/v., s/n., p. 1-120, 2014
- CUNHA, P. R. R. D. Amochamento e descorna de bovinos leiteiros: revisão bibliográfica. Trabalho acadêmico. **Instituição de Ensino Superior**, s/v., s/n., p. 1-80, 2024
- DAS NEVES, L. M. P. O uso de anti-inflamatórios não esteroides nas lesões musculares e ligamentares: prós e contras. Dissertação (Mestrado). **Universidade da Beira Interior**, s/v., s/n., p. 1-110, 2022
- DOS SANTOS, K. C.; Souza, L.; Sousa, L. D. C.; Colacite, J.; Todeschini, B. Medicamentos de uso humano e sua prescrição para animais domésticos. **Arquivos Brasileiros de Medicina Veterinária FAG**, v. 4, n. 2, p. 1-10, 2021
- FERRARI, S. E. N. Efeito da estimulação elétrica e química do córtex motor primário na modulação da dor neuropática crônica por meio do envolvimento da substância cinzenta periaquedutal. Tese (Doutorado). **Universidade de São Paulo**, s/v., s/n., p. 1-150, 2020
- GARCEZ, T. N. A.; Mörschbacher, P. D.; Beheregaray, W. K.; Gianotti, G. C.; Contesini, E. A. Bases anatômicas e neurofisiológicas da analgesia por acupuntura. **MEDVEP - Revista Científica de Medicina Veterinária**, v. 9, n. 30, p. 40-44, 2011
- HÖTZEL, M. J. Barreiras e oportunidades para minimizar a dor na descorna de bezerras leiteiras. Tese (Doutorado). **Universidade Federal de Santa Catarina**, s/v., s/n., p. 1-150, 2016
- JÚNIOR, D. D. A. S.; de Oliveira Filho, E. F.; de Miranda Neto, E. G.; Escodro, P. B. Efeitos adversos do uso prolongado de anti-inflamatórios não esteroidais inibidores da COX-2 em equinos: revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e609997747, 2020
- JÚNIOR, G. S.; Comassetto, F.; Coradassi, P.; Cavagnari, L.; de Oliveira Filho, M.; Manfioletti, G. O.; Oleskovicz, N. Descorna em bovinos à campo: ética e bem-estar. **Pubvet**, v. 16, n. 8, p. 1-9, 2022

- JÚNIOR, S.; de Alencar, D. Anti-inflamatórios inibidores da COX-2 em equinos no Nordeste Brasileiro: abordagem prescritional e efeitos adversos do uso prolongado de meloxicam. **Revista Científica**, v. 1, n. 1, p. 1-10, 2021
- LIMA, S. C. A. Bases neurofisiológicas da acupuntura médica. Dissertação (Mestrado). **Universidade de Coimbra**, s/v., s/n., p. 1-120, 2020
- MENEZES, C. R. O.; Moreira, A. C. P.; Brandão, W. D. B. Base neurofisiológica para compreensão da dor crônica através da acupuntura. **Revista Dor**, v. 11, n. 2, p. 161-168, 2010
- MIDON, M. Uso de anti-inflamatórios não esteroidais na terapêutica analgésica de pequenos animais. Trabalho acadêmico. **Instituição de Ensino Superior**, s/v., s/n., p. 1-80, 2012
- NETO, C. I. M. Estudo dos efeitos tóxicos de anti-inflamatórios não esteroides em animais de companhia: experiência profissionalizante nas vertentes de investigação e farmácia comunitária. Dissertação (Mestrado). **Universidade da Beira Interior**, s/v., s/n., p. 1-130, 2022
- ONETTA, R. C. Bases neurofisiológicas da acupuntura no tratamento da dor. Trabalho de conclusão de curso (Fisioterapia). Centro de Ciências Biológicas e da Saúde. **Instituição de Ensino Superior do Oeste do Paraná**, s/v., s/n., p. 1-60, 2005
- PIRES, P. A. Potencial analgésico, anti-edematogênico, antipirético e atividade ulcerogênica de fármacos anti-inflamatórios em roedores. Dissertação (Mestrado). **Instituição de Ensino Superior**, s/v., s/n., p. 1-120, 2009
- RODRIGUES, M. C. Uso de meloxicam para prevenir respostas inflamatórias em bovinos de corte. Trabalho acadêmico. **Instituição de Ensino Superior**, s/v., s/n., p. 1-100, 2016
- RODRIGUES, N. Utilização de gabapentina para manejo clínico de dor neuropática em cães: relato de caso. **Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da UNIPAR**, v. 20, n. 3, p. 1-5, 2017
- ROMEU, R.; Gorczak, R.; Valandro, M. A. Analgesia farmacológica em pequenos animais. **Pubvet**, v. 13, n. 1, p. 150-160, 2019
- SCHADE, J.; Moroz, M. S.; de Souza, A. F.; Maia, B. T.; Curti, J. M.; Gonçalves, G. R.; Dornbusch, P. T. Controle da dor em bovinos: revisão bibliográfica. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 1, p. 1-9, 2021
- SCHMIDT, R. H. B.; da Costa, L. H. A.; de Souza Vianini, J. J. Descorna bovina aspectos e vantagens: relato de caso. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 11, n. 11, p. 4862-4870, 2025

SILVA, F. G. Estudo comparativo do uso de escalas descritivas e semi-objectivas na avaliação da dor animal. Trabalho acadêmico. **Instituição de Ensino Superior**, s/v., s/n., p. 1-90, 2018

SILVA, H. R. Uso de diclofenaco e meloxicam em diferentes animais e seus efeitos adversos: um estudo de revisão. Trabalho acadêmico. **Instituição de Ensino Superior**, s/v., s/n., p. 1-90, 2023

SOUSA, R. D. S. Avaliação de anti-inflamatórios não esteroidais no tratamento da laminite asséptica aguda decorrente de acidose ruminal por oligofructose em bovinos. Tese (Doutorado). **Universidade de São Paulo**, s/v., s/n., p. 1-150, 2017

## ESTUDO DA ESTABILIDADE DE PROBIÓTICOS MICROENCAPSULADOS EM MATRIZES ALIMENTARES NÃO LÁCTEAS (BEBIDAS VEGETAIS E SOBREMESAS DE FRUTAS).



10.5281/zenodo.19856019

Larissa Grazielle Rauber Duarte.

Graduada em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal de Lavras (UFLA) (2006–2012). Possui especialização em Tecnologia de Alimentos pela Faculdade Metropolitana do Estado de São Paulo (2021–2022), mestrado em Biotecnologia Industrial pela Universidade de São Paulo (USP) (2013–2015) e doutorado em Alimentos e Nutrição pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) (2017–2023). Atua na área de Ciência e Tecnologia de Alimentos, com ênfase em biotecnologia, processamento de alimentos e desenvolvimento de produtos. Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1093277455869965>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1632-4459>. E-mail: [larissagrazielle@gmail.com](mailto:larissagrazielle@gmail.com)

### 1. INTRODUÇÃO

A crescente valorização de alimentos com alegações funcionais tem impulsionado o desenvolvimento de produtos capazes de atuar para além da nutrição básica, especialmente aqueles que incorporam microrganismos probióticos. Esses organismos têm sido associados à modulação da microbiota intestinal, ao fortalecimento da resposta imunológica e à prevenção de diferentes condições clínicas, o que justifica o interesse científico e tecnológico na sua aplicação em alimentos (Rodrigues, 2020). Tradicionalmente veiculados em produtos lácteos, os probióticos passaram a ser explorados em matrizes não lácteas, acompanhando mudanças nos hábitos alimentares e demandas por produtos de origem vegetal (Costa, 2022). No entanto, essa transição introduz desafios específicos relacionados à estabilidade e à manutenção da viabilidade microbiana, uma vez que tais matrizes apresentam condições menos favoráveis à sobrevivência dos microrganismos quando comparadas aos sistemas lácteos (Bordini, 2022).

A viabilidade dos probióticos ao longo do processamento e armazenamento constitui uma das principais limitações para o desenvolvimento de alimentos funcionais eficazes. Fatores como pH, atividade de água, presença de oxigênio e composição da matriz influenciam diretamente a sobrevivência celular, podendo reduzir significativamente a quantidade de microrganismos viáveis disponíveis no momento do consumo (Soares, 2017). Além disso, a interação entre a matriz alimentar e os microrganismos pode atuar tanto como mecanismo de proteção quanto como fator de estresse, dependendo das características físico-químicas do sistema (Morais, 2017). Em

produtos não lácteos, como bebidas vegetais e sobremesas de frutas, a ausência de efeito tamponante e a presença de compostos potencialmente antimicrobianos tornam ainda mais evidente a necessidade de estratégias que aumentem a estabilidade desses microrganismos (Pinto, 2021).

Nesse contexto, a microencapsulação tem sido amplamente investigada como alternativa tecnológica para proteger probióticos contra condições adversas e permitir sua aplicação em diferentes matrizes alimentares. Esse processo consiste na incorporação dos microrganismos em estruturas formadas por materiais encapsulantes, capazes de reduzir a exposição direta a fatores externos e promover maior estabilidade durante o armazenamento (Viana, 2021). Além disso, a encapsulação possibilita o controle da liberação dos probióticos ao longo do trato gastrointestinal, favorecendo sua chegada em regiões específicas do intestino, onde exercem seus efeitos (De farias, 2021). A escolha da técnica e dos materiais de encapsulação, entretanto, deve considerar não apenas a proteção conferida, mas também a interação com a matriz alimentar e as condições de processamento (Batista, 2022).

Outro aspecto relevante diz respeito à resistência dos probióticos às condições do trato gastrointestinal, etapa fundamental para a efetividade funcional desses microrganismos. O ambiente gástrico, caracterizado por pH ácido e presença de enzimas digestivas, seguido pela ação de sais biliares no intestino, representa um conjunto de barreiras que limitam a sobrevivência celular (Martin; De dea lindner, 2022). A capacidade de resistir a essas condições está associada às características específicas das cepas e às estratégias tecnológicas empregadas para sua proteção, incluindo a microencapsulação (Dos santos, 2024). Nesse sentido, a avaliação da sobrevivência em condições simuladas do trato gastrointestinal torna-se uma etapa essencial para verificar a eficácia dos sistemas desenvolvidos.

Diante desse cenário, o presente estudo parte do seguinte problema de pesquisa: de que maneira a microencapsulação influencia a estabilidade e a viabilidade de probióticos incorporados em matrizes alimentares não lácteas, como bebidas vegetais e sobremesas de frutas, ao longo do armazenamento e da simulação das condições do trato gastrointestinal? A investigação proposta busca analisar a estabilidade e a viabilidade de probióticos microencapsulados nessas matrizes, considerando os efeitos das condições de processamento, armazenamento e digestão simulada sobre a sobrevivência microbiana. Para isso, são estabelecidos como objetivos específicos a investigação dos fatores físico-químicos que interferem na estabilidade dos probióticos, a avaliação da eficiência de

diferentes técnicas e materiais de microencapsulação e o exame do comportamento dos microrganismos em condições simuladas do trato gastrointestinal, com ênfase na sua capacidade de sobrevivência e liberação controlada.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE PROBIÓTICOS E MATRIZES ALIMENTARES NÃO LÁCTEAS**

### **2.1 Conceitos, classificação e mecanismos de ação dos probióticos**

A compreensão dos probióticos enquanto categoria funcional no campo da ciência dos alimentos está fundamentada na definição clássica de microrganismos vivos que, quando administrados em quantidades adequadas, promovem benefícios à saúde do hospedeiro, sendo esta concepção amplamente consolidada na literatura científica contemporânea (Bordini, 2022). Essa definição, embora estável, tem sido progressivamente tensionada por avanços conceituais que ampliam o escopo dos efeitos biológicos associados à microbiota, incorporando não apenas a presença de células viáveis, mas também seus derivados metabólicos e estruturais. Nesse sentido, a relação entre viabilidade celular e funcionalidade tornou-se um eixo de debate relevante, uma vez que a eficácia dos probióticos depende de sua capacidade de sobreviver às condições adversas do processamento, armazenamento e trânsito gastrointestinal (Soares, 2017). Tal exigência impõe critérios rigorosos à seleção de cepas, que devem apresentar resistência a variações de pH, sais biliares e estresse oxidativo, além de capacidade de adesão ao epitélio intestinal (Castro, 2018; Uecker, 2018).

A evolução terminológica no campo evidencia a necessidade de distinguir diferentes categorias de compostos relacionados à atividade probiótica. Além dos probióticos propriamente ditos, destacam-se os prebióticos, definidos como substratos seletivamente utilizados por microrganismos benéficos, e os simbióticos, que resultam da associação entre ambos com efeitos potencialmente sinérgicos (Zacheu, 2021). Mais recentemente, a literatura tem incorporado os conceitos de pós-bióticos, que correspondem a metabólitos microbianos bioativos, e de paraprobióticos, relacionados a células inativadas com propriedades funcionais, o que indica uma ampliação da compreensão sobre os mecanismos de ação para além da exigência de viabilidade celular (Bordini, 2022; Rocha, 2022). Essa diversificação conceitual reflete a complexidade das interações entre microrganismos e hospedeiro, bem como o reconhecimento de que diferentes componentes microbianos podem exercer efeitos fisiológicos relevantes.

No que se refere à classificação microbiológica, os probióticos são predominantemente constituídos por bactérias ácido-láticas, como espécies dos gêneros *Lactobacillus* e *Bifidobacterium*, além de outros microrganismos como *Bacillus* e leveduras, cuja aplicação tem sido investigada em diferentes matrizes alimentares (Martin; Lindner, 2022; Soares, 2017). A seleção dessas cepas está associada à sua segurança, estabilidade e capacidade de desempenhar funções específicas no organismo, incluindo a modulação da microbiota intestinal e a inibição de patógenos. Nesse contexto, estudos demonstram que a utilização de probióticos em alimentos fermentados contribui para a formação de um ambiente microbiano competitivo, dificultando o estabelecimento de microrganismos indesejáveis (Da Silva, 2025). Esse fenômeno está diretamente relacionado à produção de compostos antimicrobianos, como ácidos orgânicos e bacteriocinas, que reduzem o pH e interferem na viabilidade de espécies patogênicas (Gomes, 2019).

Os mecanismos de ação dos probióticos são múltiplos e interdependentes, envolvendo processos físicos, químicos e biológicos que atuam no trato gastrointestinal. Um dos principais mecanismos é a exclusão competitiva, na qual microrganismos benéficos ocupam sítios de adesão na mucosa intestinal, impedindo a colonização por patógenos (Rodrigues, 2020). Paralelamente, observa-se a capacidade de modulação da resposta imune, com estímulo à produção de citocinas e fortalecimento das barreiras intestinais, contribuindo para a manutenção da homeostase (Rocha, 2020). A produção de metabólitos, como ácidos graxos de cadeia curta, também desempenha papel relevante ao regular o ambiente intestinal e favorecer o equilíbrio da microbiota (Da cunha, 2023). Além disso, há evidências de que os probióticos influenciam o eixo intestino cérebro, atuando na síntese de neurotransmissores e na regulação de processos emocionais e comportamentais (Nogueira, 2025).

A interação entre probióticos e matriz alimentar constitui outro aspecto relevante para a compreensão de seus mecanismos de ação, uma vez que o meio no qual são veiculados pode potencializar ou limitar seus efeitos. Estudos envolvendo produtos lácteos demonstram que a composição nutricional desses alimentos exerce efeito protetor sobre as células microbianas, favorecendo sua sobrevivência e funcionalidade (Morais, 2017; Bezeril, 2021). Em contrapartida, matrizes não lácteas apresentam desafios adicionais relacionados à estabilidade e à disponibilidade de nutrientes, o que tem impulsionado o desenvolvimento de novas estratégias tecnológicas para garantir a eficácia probiótica (Costa, 2022; Souza, 2025). Ainda assim, a incorporação de

probióticos em diferentes sistemas alimentares continua sendo uma abordagem promissora, sobretudo quando associada à seleção adequada de cepas e ao controle das condições físico-químicas do produto (Caleja, 2018; Rosa, 2022).

A relevância dos probióticos extrapola o campo da nutrição, alcançando aplicações clínicas e terapêuticas em diferentes áreas da saúde. Evidências indicam sua atuação na prevenção e no tratamento de disfunções gastrointestinais, doenças inflamatórias e condições dermatológicas, além de seu papel na restauração da microbiota após o uso de antibióticos (Berbel, 2016; Da cunha, 2023). Esse conjunto de evidências reforça a necessidade de abordagens integradas que considerem tanto os aspectos microbiológicos quanto tecnológicos, de modo a assegurar que os probióticos mantenham sua viabilidade e funcionalidade ao longo de toda a cadeia de produção e consumo.

## 2.2 Matrizes alimentares não lácteas: características físico-químicas e potencial funcional

O desenvolvimento de matrizes alimentares não lácteas tem sido impulsionado por mudanças nos padrões de consumo, especialmente associadas à intolerância à lactose, restrições alimentares e à adoção de dietas baseadas em vegetais. Nesse contexto, alimentos de origem vegetal passam a ser explorados como veículos para compostos bioativos, incluindo microrganismos probióticos, o que amplia o escopo dos alimentos funcionais disponíveis no mercado (Bordini, 2022). Essas matrizes incluem bebidas vegetais, polpas de frutas, cereais e produtos fermentados, cuja composição química apresenta características distintas em relação aos sistemas lácteos, influenciando diretamente o comportamento microbiológico e tecnológico dos produtos (Costa, 2022). A diversidade de fontes vegetais utilizadas, como oleaginosas, grãos e frutas, resulta em perfis nutricionais variados, com presença de fibras, compostos fenólicos e açúcares fermentáveis que podem favorecer ou limitar o crescimento microbiano, dependendo das condições do meio (Pinto, 2021).

As propriedades físico-químicas dessas matrizes constituem um fator determinante para a estabilidade e funcionalidade dos microrganismos incorporados. Diferentemente dos produtos lácteos, que apresentam efeito tamponante e composição proteica favorável à sobrevivência bacteriana, alimentos não lácteos frequentemente possuem pH mais ácido, menor teor proteico e maior exposição ao oxigênio, o que pode comprometer a viabilidade celular (Morais, 2017). Além disso, parâmetros como



atividade de água, viscosidade e composição de carboidratos influenciam a interação entre microrganismos e matriz, condicionando tanto a sobrevivência quanto a atividade metabólica das cepas probióticas (Soares, 2017). Em produtos à base de frutas, por exemplo, a acidez elevada e a presença de compostos antimicrobianos naturais podem dificultar a manutenção de populações viáveis ao longo do armazenamento (Namanda, 2025). Por outro lado, em bebidas vegetais, a composição pode ser ajustada tecnologicamente para favorecer a estabilidade, por meio da adição de ingredientes estruturantes ou fontes de nutrientes específicos (Souza, 2025).

Do ponto de vista funcional, as matrizes não lácteas apresentam potencial relevante na promoção da saúde, sobretudo em razão da presença de compostos bioativos que atuam de forma complementar aos probióticos. Fibras alimentares e polissacarídeos presentes em vegetais podem exercer efeito prebiótico, estimulando seletivamente o crescimento de microrganismos benéficos no trato gastrointestinal (Zacheu, 2021). Além disso, compostos fenólicos e antioxidantes podem contribuir para a modulação do ambiente intestinal e para a redução de processos inflamatórios, ampliando o efeito funcional do alimento (Caleja, 2018). A associação entre probióticos e componentes bioativos naturais tem sido explorada como estratégia para o desenvolvimento de alimentos simbióticos em matrizes não convencionais, com potencial de aplicação em diferentes contextos nutricionais (Rodrigues, 2020).

A fermentação de matérias-primas vegetais representa uma abordagem relevante para potencializar as propriedades dessas matrizes, tanto do ponto de vista sensorial quanto microbiológico. Processos fermentativos promovem modificações estruturais e químicas, incluindo redução do pH, produção de ácidos orgânicos e formação de compostos bioativos, o que pode favorecer a estabilidade microbiológica e a segurança do alimento (Martin; Lindner, 2022). Produtos como bebidas fermentadas à base de frutas ou cereais e sistemas derivados de culturas simbióticas, como o soby, evidenciam o potencial dessas matrizes na incorporação de microrganismos benéficos (Cruz, 2023). Nesses sistemas, a microbiota associada desempenha papel ativo na transformação da matriz, contribuindo para a formação de um ambiente mais seletivo e funcional (Da Silva, 2025).

Apesar do potencial observado, a utilização de matrizes não lácteas apresenta limitações tecnológicas que exigem atenção no desenvolvimento de produtos. A ausência de componentes estruturais típicos do leite pode comprometer propriedades sensoriais e a estabilidade físico-química, exigindo o uso de espessantes, estabilizantes e processos de

padronização (Alves, 2020). Além disso, a variabilidade na composição das matérias-primas vegetais pode impactar a reprodutibilidade dos produtos, dificultando o controle de qualidade e a padronização industrial (Souza, 2025). Estudos com formulações alternativas demonstram que a incorporação de ingredientes funcionais pode melhorar propriedades reológicas e tecnológicas, contribuindo para maior aceitabilidade e estabilidade do produto final (Santos, 2017).

A exploração de matrizes não lácteas para o desenvolvimento de alimentos funcionais exige a integração entre conhecimento microbiológico, tecnológico e nutricional. A escolha adequada da matéria-prima, aliada ao controle das condições físico-químicas e ao uso de estratégias tecnológicas específicas, é fundamental para garantir a funcionalidade e a segurança dos produtos (Bordini, 2022). Nesse cenário, observa-se um campo em expansão, no qual a inovação está associada à capacidade de adaptar sistemas alimentares tradicionais às novas demandas de consumo, mantendo a eficácia dos compostos bioativos e a qualidade dos produtos oferecidos ao consumidor (Rocha, 2022).

### 2.3 Desafios de viabilidade microbiana em bebidas vegetais e sobremesas de frutas

A incorporação de probióticos em matrizes alimentares não lácteas impõe desafios técnicos relacionados, sobretudo, à manutenção da viabilidade celular ao longo do processamento, armazenamento e consumo. Diferentemente dos sistemas lácteos, que apresentam propriedades tamponantes e composição nutricional favorável à sobrevivência microbiana, bebidas vegetais e sobremesas de frutas constituem ambientes frequentemente mais adversos, caracterizados por pH reduzido, presença de oxigênio e menor disponibilidade de nutrientes específicos (Bordini, 2022). Essas condições interferem diretamente na integridade das células probióticas, reduzindo sua capacidade de permanecer viáveis em concentrações adequadas para promover efeitos benéficos ao hospedeiro, o que compromete a funcionalidade do alimento (Soares, 2017).

Entre os fatores intrínsecos que limitam a viabilidade microbiana, destaca-se a acidez das matrizes à base de frutas, que pode induzir estresse fisiológico nas células bacterianas, afetando sua atividade metabólica e sua capacidade de multiplicação (Namanda, 2025). Além disso, compostos naturais presentes em frutas, como fenólicos e ácidos orgânicos, podem exercer ação antimicrobiana, contribuindo para a redução da população de microrganismos probióticos durante o armazenamento (Caleja, 2018). Em bebidas vegetais, embora o pH possa ser menos ácido em comparação às frutas, a ausência

de proteínas e lipídios em níveis equivalentes aos do leite reduz a proteção contra condições adversas, como variações de temperatura e exposição ao oxigênio (Pinto, 2021). Essas limitações reforçam a necessidade de compreender a interação entre composição da matriz e comportamento microbiano, uma vez que pequenas variações físico-químicas podem impactar significativamente a estabilidade celular (Souza, 2025).

Fatores extrínsecos também desempenham papel relevante na viabilidade dos probióticos em matrizes não lácteas. Processos tecnológicos como pasteurização, homogeneização e armazenamento refrigerado influenciam a sobrevivência das cepas, podendo causar danos estruturais às células ou alterar o ambiente em que estão inseridas (Alves, 2020). O tempo de prateleira constitui outro elemento crítico, pois a redução gradual da população microbiana ao longo do armazenamento pode resultar em concentrações inferiores às recomendadas para efeitos funcionais (Rosa, 2022). Em sistemas vegetais fermentados, a atividade metabólica contínua dos microrganismos pode alterar características sensoriais e físico-químicas do produto, exigindo controle rigoroso das condições de processamento (Martin; Lindner, 2022).

A resistência dos probióticos às condições do trato gastrointestinal representa um desafio adicional, especialmente quando associados a matrizes que não oferecem proteção suficiente contra o pH gástrico e os sais biliares. Estudos indicam que a sobrevivência durante a digestão está diretamente relacionada à capacidade da matriz alimentar de atuar como barreira física e química, protegendo as células até sua liberação no intestino (Morais, 2017). Em matrizes não lácteas, essa proteção tende a ser limitada, o que pode comprometer a eficácia dos microrganismos após o consumo (Costa, 2022). Nesse contexto, a seleção de cepas com maior resistência a condições adversas e a aplicação de estratégias tecnológicas tornam-se fundamentais para assegurar a funcionalidade dos produtos (Uecker, 2018).

Do ponto de vista microbiológico, a interação entre probióticos e outros microrganismos presentes na matriz também pode influenciar a viabilidade celular. Em alimentos fermentados, a competição por nutrientes e sítios de adesão pode reduzir a sobrevivência das cepas adicionadas, especialmente quando não há equilíbrio entre as populações microbianas (Da Silva, 2025). Por outro lado, em determinadas condições, essa interação pode favorecer a estabilidade do sistema, contribuindo para a formação de um ambiente menos propício ao desenvolvimento de microrganismos patogênicos (Gomes, 2019). A dinâmica microbiana, portanto, deve ser considerada no

desenvolvimento de produtos não lácteos, uma vez que interfere tanto na segurança quanto na funcionalidade dos alimentos (Rodrigues, 2020).

Além dos aspectos tecnológicos e microbiológicos, a estabilidade dos probióticos em matrizes não lácteas possui implicações diretas na sua aplicação clínica e funcional. A redução da viabilidade celular pode limitar os efeitos benéficos associados à modulação da microbiota intestinal, à resposta imunológica e à regulação de processos metabólicos e neurocomportamentais (Nogueira, 2025). Considerando que a eficácia dos probióticos está condicionada à ingestão de quantidades mínimas viáveis, torna-se necessário garantir que os produtos mantenham essas concentrações até o momento do consumo (Rocha, 2022). Esse aspecto é particularmente relevante em populações que utilizam alimentos funcionais como estratégia complementar de cuidado em saúde, incluindo condições dermatológicas e gastrointestinais (Berbel, 2016).

Por fim, a superação dos desafios relacionados à viabilidade microbiana em bebidas vegetais e sobremesas de frutas depende da integração entre conhecimento científico e desenvolvimento tecnológico. A aplicação de técnicas como microencapsulação, o ajuste da composição das matrizes e a seleção de cepas mais resistentes têm sido apontadas como estratégias promissoras para aumentar a estabilidade dos probióticos (Bordini, 2022). Além disso, a compreensão dos efeitos de fatores como estresse oxidativo e condições ambientais sobre as células microbianas contribui para o aprimoramento das formulações (Castro, 2018). Nesse cenário, o avanço das pesquisas permite ampliar o uso de matrizes não lácteas como veículos de probióticos, desde que sejam considerados os limites impostos pelas características físico-químicas desses sistemas e pelas exigências de viabilidade para a promoção de efeitos à saúde (Zacheu, 2021).

### **3. MICROENCAPSULAÇÃO DE PROBIÓTICOS EM SISTEMAS ALIMENTARES**

#### **3.1 Princípios e fundamentos da microencapsulação aplicados à microbiologia alimentar**

A microencapsulação, no contexto da microbiologia alimentar, constitui uma estratégia tecnológica voltada à proteção de agentes ativos sensíveis, especialmente microrganismos probióticos, por meio da sua incorporação em uma matriz encapsulante que atua como barreira física e química frente a condições adversas do meio. Esse processo baseia-se no aprisionamento das células em estruturas microscópicas formadas

por polímeros, capazes de isolar parcialmente o conteúdo interno e modular as trocas com o ambiente externo, o que contribui para a preservação da viabilidade microbiana durante etapas críticas como processamento e armazenamento (Barroso, 2020). A relevância dessa abordagem decorre do fato de que os probióticos apresentam elevada susceptibilidade a fatores como variações de pH, presença de oxigênio, umidade e temperatura, condições frequentemente encontradas em sistemas alimentares e que podem comprometer sua funcionalidade (Batista, 2022). Nesse sentido, a encapsulação não apenas protege os microrganismos, mas também possibilita sua incorporação em diferentes matrizes alimentares, ampliando o espectro de aplicação dos alimentos funcionais (Otaviano; Cerino, 2022).

Do ponto de vista conceitual, a microencapsulação envolve a formação de partículas constituídas por um núcleo ativo e uma parede encapsulante, cuja composição e estrutura determinam o comportamento do sistema em termos de estabilidade e liberação. A escolha do material de parede é decisiva, pois influencia propriedades como permeabilidade, resistência mecânica e interação com o meio, sendo comumente utilizados polissacarídeos, proteínas e lipídeos, isoladamente ou em combinação (De santana, 2023). Esses materiais são selecionados com base na sua capacidade de formar matrizes estruturadas que protejam as células contra estresses ambientais, além de permitirem a liberação controlada no trato gastrointestinal, onde os probióticos exercem seus efeitos biológicos (Viana, 2021). A eficiência do processo encapsulante está associada à capacidade de reter o maior número possível de células viáveis no interior da cápsula, o que depende tanto das condições de processamento quanto da compatibilidade entre o microrganismo e o material utilizado (Silva, 2021).

A aplicação da microencapsulação em microbiologia alimentar também está relacionada à necessidade de superar limitações impostas pela baixa estabilidade dos probióticos em sistemas convencionais. Estudos demonstram que a encapsulação cria um microambiente favorável ao metabolismo celular, reduzindo os danos causados por fatores externos e aumentando a sobrevivência durante o armazenamento e a passagem pelo trato gastrointestinal (De farias, 2021). Esse efeito é particularmente relevante quando se considera que a eficácia dos probióticos depende da ingestão de quantidades mínimas viáveis, o que exige a manutenção da integridade celular até o momento da liberação no intestino (Vido, 2020). Além disso, a encapsulação pode atuar na modulação da liberação dos microrganismos, permitindo que a ruptura da cápsula ocorra em

condições específicas de pH ou ação enzimática, o que favorece a entrega direcionada do conteúdo no local de interesse (Correia, 2022).

Outro aspecto relevante refere-se à ampliação das aplicações da microencapsulação para além dos probióticos, abrangendo diferentes compostos bioativos de interesse alimentar, como vitaminas, extratos vegetais e óleos essenciais, o que evidencia a versatilidade da tecnologia (Lima, 2023). Essa diversidade de aplicações reforça a importância dos princípios físico-químicos envolvidos no processo, especialmente no que se refere à interação entre o núcleo e a parede encapsulante, bem como às condições de formação das partículas, que podem influenciar diretamente sua estabilidade e funcionalidade (Do lago, 2024). A formação das microcápsulas pode ocorrer por diferentes mecanismos, envolvendo processos físicos, químicos ou físico-químicos, sendo a escolha do método condicionada às características do material encapsulado e ao objetivo da aplicação (Pellizzon, 2024).

A microencapsulação também se destaca pela sua capacidade de melhorar características sensoriais e tecnológicas dos produtos alimentares, uma vez que pode mascarar sabores indesejáveis e controlar a liberação de compostos voláteis, contribuindo para a aceitação do produto final (Alonso, 2022). Em sistemas contendo microrganismos, essa propriedade é particularmente relevante quando se utilizam culturas com perfil sensorial marcante, como ocorre em alguns alimentos fermentados, permitindo sua incorporação em formulações mais amplas sem comprometer a qualidade sensorial (Dos santos, 2024). Além disso, a encapsulação pode favorecer a estabilidade de compostos com atividade antimicrobiana ou antioxidante, ampliando seu potencial de aplicação em estratégias de conservação de alimentos (Lopes, 2021).

Os fundamentos da microencapsulação em microbiologia alimentar estão diretamente associados à necessidade de integrar estabilidade, funcionalidade e aplicabilidade tecnológica. A eficiência dessa técnica depende da compreensão dos mecanismos que regem a proteção e a liberação dos agentes encapsulados, bem como da interação entre os diferentes componentes do sistema, incluindo o microrganismo, o material encapsulante e a matriz alimentar (Budin, 2022). Nesse contexto, a microencapsulação configura-se como uma ferramenta relevante para o desenvolvimento de alimentos funcionais, permitindo a utilização de microrganismos probióticos em condições que anteriormente limitavam sua aplicação, ao mesmo tempo em que exige avanços contínuos no entendimento dos processos envolvidos para otimização de seu desempenho (Bordini, 2022).

### 3.2 Técnicas de encapsulação e materiais de parede utilizados em alimentos funcionais

As técnicas de encapsulação aplicadas à área de alimentos têm evoluído em função da necessidade de proteger compostos sensíveis e ampliar sua estabilidade em diferentes condições de processamento e armazenamento. Essas técnicas podem ser classificadas em métodos físicos, químicos e físico-químicos, sendo essa categorização relevante para compreender os mecanismos envolvidos na formação das microcápsulas e na retenção do agente ativo (Barroso, 2020). Entre os métodos físicos, destaca-se a secagem por atomização, amplamente utilizada na indústria alimentícia devido à sua viabilidade econômica e capacidade de produzir partículas estáveis em escala industrial. Nesse processo, uma solução contendo o material encapsulante e o composto ativo é atomizada em uma corrente de ar quente, promovendo a rápida evaporação do solvente e a formação de partículas secas (Do Iago, 2024). A aplicação dessa técnica em probióticos tem demonstrado bons resultados, especialmente quando combinada a materiais como pectina e proteínas do soro, que contribuem para a manutenção da viabilidade celular (Gomes, 2023).

Outro método relevante é a gelificação iônica, classificada como técnica físico-química, que se baseia na interação entre polímeros aniônicos, como o alginato, e íons multivalentes, como cálcio, resultando na formação de estruturas tridimensionais capazes de aprisionar microrganismos ou compostos bioativos (Correia, 2022). Essa técnica tem sido amplamente empregada na encapsulação de probióticos devido à sua capacidade de operar em condições brandas, preservando a integridade celular durante o processo (Silva, 2021). Além disso, a gelificação permite o controle do tamanho das partículas e da espessura da parede, fatores que influenciam diretamente a liberação do conteúdo encapsulado (Oliveira, 2020). Estudos envolvendo a encapsulação de extratos vegetais e óleos essenciais por esse método indicam que a formação de matrizes poliméricas estáveis contribui para a proteção contra degradação oxidativa e volatilização (Budin, 2022; Tasca, 2025).

A coacervação representa outra abordagem relevante, caracterizada pela separação de fases em sistemas poliméricos, resultando na formação de um revestimento ao redor do núcleo ativo. Esse método permite elevada eficiência de encapsulamento e é particularmente útil para compostos lipofílicos, como óleos essenciais, cuja estabilidade pode ser significativamente aumentada quando encapsulados (Pellizzon, 2024). Em paralelo, técnicas como emulsificação e liofilização também são utilizadas, sendo

escolhidas conforme a natureza do material encapsulado e as condições de processamento desejadas (De santana, 2023). A escolha da técnica adequada depende de fatores como sensibilidade térmica, solubilidade e objetivo final da aplicação, evidenciando a necessidade de integração entre conhecimento tecnológico e características do composto ativo (Batista, 2022).

No que se refere aos materiais de parede, observa-se predominância do uso de biopolímeros, especialmente polissacarídeos e proteínas, em função de sua biocompatibilidade e capacidade de formar estruturas estáveis. O alginato é um dos materiais mais utilizados, devido à sua facilidade de gelificação e à formação de redes tridimensionais capazes de encapsular microrganismos com eficiência (Viana, 2021). A gelatina, frequentemente associada ao alginato, contribui para melhorar a resistência mecânica das cápsulas, favorecendo sua estabilidade em diferentes condições (Silva, 2021). Além disso, compostos como inulina e amido resistente têm sido explorados não apenas como materiais estruturais, mas também como componentes funcionais com efeito prebiótico, ampliando o potencial dos sistemas encapsulados (De farias, 2021; Dorneles, 2025).

Proteínas, tanto de origem animal quanto vegetal, também desempenham papel relevante na formação das microcápsulas, especialmente em sistemas submetidos à secagem por atomização. O uso de concentrado proteico de soro, por exemplo, tem demonstrado capacidade de formar matrizes com boa estabilidade térmica e proteção contra estresse ambiental (Gomes, 2023). Em matrizes vegetais, proteínas como as derivadas de arroz ou leguminosas têm sido utilizadas como alternativa, permitindo a aplicação em produtos não lácteos (Dos santos, 2024). A combinação de diferentes materiais encapsulantes tem sido explorada como estratégia para otimizar propriedades como permeabilidade, resistência e liberação controlada, evidenciando a complexidade envolvida no desenvolvimento desses sistemas (Vido, 2020).

A aplicação de materiais encapsulantes também se estende à incorporação de compostos com atividade antimicrobiana e antioxidante, como óleos essenciais e extratos vegetais, cuja estabilidade pode ser significativamente aumentada por meio da encapsulação. Nesse contexto, a utilização de microcápsulas em revestimentos comestíveis e filmes ativos tem sido investigada como estratégia para conservação de alimentos, contribuindo para a redução da deterioração microbiológica e oxidativa (Lopes, 2021; Goulart, 2025). A encapsulação desses compostos permite sua liberação



gradual, aumentando sua eficácia e reduzindo impactos sensoriais indesejáveis (Alonso, 2022).

A seleção das técnicas e dos materiais de parede deve considerar não apenas a proteção do agente ativo, mas também a compatibilidade com a matriz alimentar e as exigências tecnológicas do produto final. A eficiência do sistema encapsulado está associada à capacidade de manter a estabilidade do composto ao longo do tempo e de promover sua liberação em condições específicas, garantindo a funcionalidade do alimento (Otaviano; Cerino, 2022). Nesse cenário, a microencapsulação se consolida como uma abordagem versátil na engenharia de alimentos, permitindo a incorporação de diferentes compostos bioativos em sistemas alimentares diversos, desde que haja controle adequado das variáveis envolvidas no processo (Bordini, 2022).

### 3.3 Interação entre microcápsulas e matrizes alimentares não lácteas

A interação entre microcápsulas e matrizes alimentares não lácteas envolve um conjunto de fenômenos físico-químicos e microbiológicos que determinam a estabilidade do sistema e a funcionalidade dos compostos encapsulados. Em matrizes vegetais, caracterizadas por maior variabilidade composicional e ausência de componentes estruturais típicos do leite, a compatibilidade entre o material encapsulante e o meio torna-se um fator determinante para a manutenção da integridade das microcápsulas (Costa, 2022). A composição da matriz, especialmente em termos de pH, atividade de água e presença de compostos bioativos, pode interferir diretamente na estabilidade das partículas, promovendo processos de difusão, inchaço ou degradação da parede encapsulante (Pinto, 2021). Nesse contexto, a interação não se limita a uma relação passiva, mas envolve trocas contínuas entre cápsula e meio, influenciando tanto a viabilidade microbiana quanto as propriedades tecnológicas do alimento.

A incorporação de microcápsulas em bebidas vegetais e sobremesas de frutas exige a consideração das características reológicas e estruturais dessas matrizes, uma vez que a distribuição homogênea das partículas impacta diretamente a funcionalidade do produto. Sistemas com baixa viscosidade podem favorecer a sedimentação das cápsulas, enquanto matrizes mais estruturadas podem dificultar a liberação do conteúdo encapsulado (Alves, 2020). Além disso, a interação com macromoléculas presentes na matriz, como fibras e polissacarídeos, pode alterar a permeabilidade da cápsula, interferindo na difusão de solutos e na proteção conferida ao microrganismo (Souza,

2025). A estabilidade física do sistema, portanto, depende da compatibilidade entre as propriedades da cápsula e as características da matriz alimentar.

Outro aspecto relevante refere-se ao impacto sensorial da incorporação de microcápsulas em alimentos não lácteos. A presença de partículas pode modificar textura, aparência e percepção oral do produto, especialmente quando há variação no tamanho das cápsulas ou distribuição irregular no sistema (Caleja, 2018). Nesse sentido, a microencapsulação também é utilizada como estratégia para mascarar sabores indesejáveis de compostos bioativos, permitindo a incorporação de ingredientes que, na forma livre, comprometeriam a aceitação sensorial (Alonso, 2022). A interação entre cápsula e matriz, portanto, deve ser ajustada de forma a equilibrar funcionalidade e aceitabilidade, evitando alterações que comprometam a qualidade do produto final.

Do ponto de vista microbiológico, a matriz alimentar pode atuar como um ambiente adicional de proteção ou, em determinados casos, como fator de estresse para os microrganismos encapsulados. Em matrizes não lácteas, a ausência de efeito tamponante pode intensificar o impacto de variações de pH, exigindo maior eficiência do sistema encapsulante para garantir a viabilidade celular (Bordini, 2022). Por outro lado, a presença de compostos com atividade antioxidante ou prebiótica pode favorecer a manutenção das células, contribuindo para um ambiente mais estável (Zacheu, 2021). Essa relação evidencia que a funcionalidade do sistema não depende exclusivamente da cápsula, mas da interação dinâmica entre todos os componentes do alimento.

A liberação do conteúdo encapsulado também está diretamente relacionada às propriedades da matriz alimentar, uma vez que fatores como umidade, temperatura e composição química influenciam a ruptura da cápsula e a disponibilidade do probiótico no trato gastrointestinal. Em sistemas não lácteos, a liberação pode ocorrer de forma antecipada ou incompleta, caso a matriz não ofereça condições adequadas para a manutenção da integridade da cápsula até o momento desejado (Moraes, 2017). Assim, a interação cápsula matriz deve ser projetada considerando não apenas a estabilidade durante o armazenamento, mas também o comportamento do sistema em condições fisiológicas, garantindo que os microrganismos sejam liberados no local de ação (Rodrigues, 2020).

Além disso, a aplicação de microcápsulas em matrizes não lácteas está associada à necessidade de adaptação tecnológica para atender às exigências industriais e regulatórias. A variabilidade das matérias-primas vegetais pode impactar a reprodutibilidade dos sistemas encapsulados, exigindo controle rigoroso dos parâmetros

de processamento e formulação (Rocha, 2022). A interação entre cápsula e matriz, nesse contexto, deve ser avaliada não apenas em termos de estabilidade e funcionalidade, mas também em relação à viabilidade de produção em escala e à padronização do produto final. Dessa forma, o desenvolvimento de alimentos funcionais contendo microcápsulas requer uma abordagem integrada que considere simultaneamente aspectos microbiológicos, físico-químicos e tecnológicos, assegurando a eficácia do sistema e sua aplicabilidade prática.

### 3.4 Fatores intrínsecos e extrínsecos que afetam a estabilidade probiótica

A estabilidade de microrganismos probióticos em sistemas alimentares resulta da interação entre fatores intrínsecos, relacionados às características do próprio alimento e do microrganismo, e fatores extrínsecos, associados às condições de processamento, armazenamento e distribuição. Entre os fatores intrínsecos, o pH destaca-se como uma variável determinante, uma vez que a maioria das bactérias ácido lácticas apresenta faixa ótima de crescimento relativamente restrita, sendo sensível a ambientes excessivamente ácidos ou alcalinos, o que pode comprometer sua viabilidade ao longo do tempo (Martin; De da lindner, 2022). A atividade de água também exerce influência direta sobre o metabolismo celular, afetando tanto a sobrevivência quanto a capacidade de multiplicação, especialmente em matrizes com baixa umidade ou elevada concentração de solutos (Pinto, 2023). Além disso, a composição química do alimento, incluindo a presença de proteínas, lipídios e carboidratos, pode atuar como sistema de proteção ou como fator limitante, dependendo da sua interação com as células microbianas (Bordini, 2022).

A natureza da cepa probiótica constitui outro elemento intrínseco relevante, uma vez que diferentes espécies e linhagens apresentam respostas distintas às condições ambientais. Estudos com bactérias ácido lácticas isoladas de alimentos tradicionais demonstram que a resistência a estresses físico-químicos varia significativamente, influenciando o desempenho tecnológico e funcional desses microrganismos (Carlos, 2022). Essa variabilidade está associada a características estruturais e metabólicas específicas, como composição da parede celular e capacidade de adaptação ao estresse oxidativo, o que explica diferenças na estabilidade observada entre cepas submetidas às mesmas condições (Degenhardt, 2025). Ainda nesse contexto, a densidade celular inicial e a interação com outros microrganismos presentes no alimento podem modificar o

equilíbrio microbiano, favorecendo ou dificultando a sobrevivência dos probióticos (Da silva; Silva; Da cruz, 2021).

Entre os fatores extrínsecos, a temperatura de armazenamento assume papel central na manutenção da viabilidade probiótica. Variações térmicas ao longo da cadeia de distribuição podem acelerar processos de degradação celular, reduzindo a quantidade de microrganismos viáveis disponíveis no momento do consumo. Evidências experimentais indicam que condições não controladas de temperatura podem alterar significativamente o comportamento de microrganismos, afetando tanto sua sobrevivência quanto sua atividade metabólica. A exposição prolongada a temperaturas elevadas tende a intensificar a perda de viabilidade, enquanto temperaturas inadequadamente baixas podem induzir danos estruturais às células, especialmente em sistemas não protegidos (Dos santos, 2024). Além disso, o tempo de armazenamento atua de forma cumulativa, sendo responsável por reduções progressivas na contagem de células viáveis ao longo da vida útil do produto.

Outros fatores extrínsecos, como presença de oxigênio, luz e condições de embalagem, também interferem na estabilidade dos probióticos. A exposição ao oxigênio pode induzir estresse oxidativo, especialmente em microrganismos anaeróbios ou microaerófilos, comprometendo sua integridade celular (Lima, 2023). A escolha do material de embalagem, portanto, deve considerar propriedades de barreira que minimizem trocas gasosas e protejam o sistema encapsulado ou livre contra condições adversas. Adicionalmente, processos tecnológicos como aquecimento, secagem ou congelamento podem impactar a viabilidade microbiana, exigindo estratégias de proteção específicas, como a microencapsulação, para reduzir os danos causados por essas etapas (Pellizzon, 2024).

A interação entre fatores intrínsecos e extrínsecos torna-se ainda mais evidente quando se analisam sistemas alimentares complexos, como matrizes vegetais ou produtos estruturados. Em formulações contendo probióticos, a combinação entre composição da matriz e condições de processamento pode influenciar diretamente a estabilidade do sistema, como observado em produtos desenvolvidos com frutas ou oleaginosas, nos quais a matriz pode tanto proteger quanto expor os microrganismos a condições adversas (Cavinatti, 2025). Em aplicações específicas, como a incorporação de probióticos em estruturas gelificadas ou revestimentos alimentares, a estabilidade depende da capacidade do sistema em manter condições adequadas de microambiente ao redor das células (Coelho, 2024). Esses resultados reforçam que a estabilidade probiótica não pode ser

atribuída a um único fator isolado, mas deve ser compreendida a partir da interação dinâmica entre múltiplas variáveis.

A análise conjunta desses fatores evidencia que a estabilidade probiótica é um fenômeno multifatorial, dependente de características microbiológicas, propriedades da matriz alimentar e condições externas ao longo da cadeia produtiva. A compreensão desses elementos é essencial para o desenvolvimento de alimentos funcionais com eficácia comprovada, uma vez que a manutenção da viabilidade microbiana até o momento do consumo constitui requisito para a obtenção dos efeitos associados à saúde (Léo, 2020). Nesse sentido, estratégias tecnológicas devem ser orientadas para o controle simultâneo desses fatores, considerando a complexidade dos sistemas alimentares e a variabilidade inerente aos microrganismos utilizados.

### 3.5 Resistência gastrointestinal e liberação controlada dos microrganismos

A resistência gastrointestinal dos microrganismos probióticos constitui um requisito fundamental para que esses organismos exerçam efeitos fisiológicos após a ingestão, uma vez que o trato digestório apresenta condições adversas que limitam a sobrevivência celular. O ambiente gástrico, caracterizado por pH ácido e presença de enzimas digestivas, representa uma das principais barreiras à viabilidade microbiana, exigindo que as cepas probióticas apresentem mecanismos de adaptação capazes de preservar sua integridade estrutural e funcional (Martin; De dea lindner, 2022). Além disso, ao atingir o intestino delgado, os microrganismos ainda são expostos à ação de sais biliares, que podem comprometer a membrana celular e reduzir significativamente a população viável (Carlos, 2022). Nesse cenário, a resistência ao trato gastrointestinal não depende apenas da espécie, mas de características específicas de cada cepa, o que explica a variabilidade observada em estudos experimentais (Degenhardt, 2025).

A eficiência da sobrevivência durante a digestão está diretamente relacionada à quantidade inicial de microrganismos ingeridos e à capacidade de manter níveis viáveis até o cólon, local onde ocorre a maior parte das interações com a microbiota intestinal. Evidências indicam que a redução da viabilidade ao longo do trato digestório pode comprometer os efeitos associados ao consumo de probióticos, incluindo modulação da microbiota, resposta imunológica e produção de metabólitos bioativos (Da silva; Silva; Da cruz, 2021). Esse aspecto é particularmente relevante em aplicações clínicas e nutricionais, nas quais a eficácia funcional está condicionada à chegada de células viáveis em concentrações adequadas ao sítio de ação (Léo, 2020). Além disso, a interação entre

probióticos e microbioma intestinal existente pode influenciar a colonização e a persistência desses microrganismos, sendo afetada por fatores dietéticos e fisiológicos do hospedeiro (Pinto, 2023).

A microencapsulação tem sido empregada como estratégia para aumentar a resistência dos probióticos às condições gastrointestinais, atuando como barreira física que reduz o contato direto das células com o ambiente ácido e com agentes detergentes presentes no trato digestório. O uso de materiais encapsulantes permite a formação de estruturas capazes de proteger os microrganismos durante a passagem pelo estômago, liberando-os posteriormente em regiões mais favoráveis do intestino (Bordini, 2022). Estudos com leveduras probióticas demonstram que sistemas encapsulados apresentam maior sobrevivência em comparação às formas livres, evidenciando o efeito protetor da cápsula frente às condições simuladas de digestão (Dos santos, 2024). A eficácia desse processo depende da estabilidade da cápsula durante o trânsito gastrointestinal e da sua capacidade de se desintegrar em resposta a estímulos específicos, como variações de pH ou ação enzimática.

A liberação controlada dos microrganismos está diretamente associada às propriedades físico-químicas do material encapsulante e à sua interação com o ambiente digestivo. Sistemas encapsulados podem ser projetados para resistir ao pH gástrico e liberar seu conteúdo apenas em condições intestinais, o que aumenta a eficiência da entrega dos probióticos (Lima, 2023). Essa abordagem tem sido amplamente utilizada também para outros compostos bioativos, como vitaminas e óleos, indicando que os princípios de liberação controlada podem ser aplicados de forma transversal na área de alimentos funcionais (Pellizzon, 2024). No entanto, a liberação inadequada, seja por ruptura precoce ou por retenção excessiva do conteúdo encapsulado, pode comprometer a eficácia do sistema, exigindo ajustes na formulação e na escolha dos materiais.

A interação entre microcápsulas e matriz alimentar também influencia a resistência gastrointestinal e o perfil de liberação dos microrganismos. Em sistemas alimentares estruturados, como pastas ou produtos gelificados, a matriz pode atuar como proteção adicional, reduzindo o impacto do ambiente gástrico sobre as células (Cavinatti, 2025). Em formulações específicas, como produtos estruturados com revestimentos proteicos, observa-se que a combinação entre encapsulação e matriz contribui para maior estabilidade e liberação gradual dos probióticos (Coelho, 2024). Essa interação evidencia que a eficiência do sistema não depende exclusivamente da cápsula, mas da integração entre todos os componentes do alimento.

Por fim, a resistência gastrointestinal e a liberação controlada configuram aspectos interdependentes na avaliação da eficácia de probióticos em alimentos funcionais. A capacidade de sobreviver às condições adversas do trato digestório e de ser liberado no local adequado determina o potencial de atuação desses microrganismos no organismo humano. Nesse contexto, o desenvolvimento de sistemas encapsulados deve considerar simultaneamente a proteção durante a digestão e a liberação eficiente no intestino, de modo a garantir que os probióticos mantenham sua funcionalidade após o consumo.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo deste trabalho evidencia que a incorporação de probióticos em matrizes alimentares não lácteas não pode ser compreendida apenas como uma alternativa tecnológica, mas como um campo que exige articulação entre microbiologia, engenharia de alimentos e conhecimento das propriedades físico-químicas dos sistemas utilizados. A substituição de matrizes tradicionais por bebidas vegetais e sobremesas de frutas introduz desafios específicos, sobretudo no que se refere à estabilidade e à manutenção da viabilidade microbiana, uma vez que essas matrizes apresentam condições menos favoráveis à sobrevivência celular. Nesse cenário, a microencapsulação surge como uma estratégia capaz de mitigar parte dessas limitações, ao oferecer proteção contra fatores ambientais e permitir maior controle sobre a liberação dos microrganismos.

A complexidade do tema torna-se ainda mais evidente quando se considera que a estabilidade probiótica não depende de um único fator isolado, mas da interação simultânea entre características da cepa, composição da matriz alimentar e condições de processamento e armazenamento. Pequenas variações nesses parâmetros podem resultar em respostas distintas, o que explica a heterogeneidade observada nos estudos analisados. Além disso, a resistência ao trato gastrointestinal impõe uma etapa adicional de seleção, uma vez que apenas microrganismos capazes de sobreviver às condições digestivas conseguem exercer seus efeitos no organismo. Isso reforça a necessidade de abordagens integradas que considerem todo o percurso do probiótico, desde sua incorporação no alimento até sua liberação no intestino.

Os resultados discutidos também indicam que a eficácia dos sistemas encapsulados está diretamente associada ao equilíbrio entre proteção e liberação. A formação de microcápsulas suficientemente resistentes para preservar a viabilidade

durante o armazenamento, mas capazes de se desintegrar em condições específicas do trato digestório, representa um dos principais desafios tecnológicos. Paralelamente, a interação entre cápsula e matriz alimentar deve ser cuidadosamente ajustada, de modo a evitar impactos negativos nas propriedades sensoriais e garantir a aceitação do produto final. Esse conjunto de fatores demonstra que o desenvolvimento de alimentos funcionais contendo probióticos exige não apenas domínio técnico, mas também compreensão das limitações impostas pelos sistemas alimentares utilizados.

Sendo assim, observa-se que o avanço nessa área depende da consolidação de estratégias que integrem inovação tecnológica e rigor científico, especialmente no que diz respeito à padronização de métodos de avaliação da viabilidade e funcionalidade dos probióticos. Ainda que a literatura apresente avanços significativos, permanecem lacunas relacionadas à reprodutibilidade dos resultados, à variabilidade entre cepas e à influência das diferentes matrizes alimentares. Nesse contexto, a continuidade das pesquisas é fundamental para ampliar a compreensão dos mecanismos envolvidos e possibilitar o desenvolvimento de produtos que conciliem estabilidade, funcionalidade e aplicabilidade em escala industrial.

## REFERÊNCIAS

ALONSO, Laila et al. Óleos essenciais como alternativa natural para a conservação de alimentos. 2022.

BARROSO, Tiago Linhares Cruz Tabosa. Tecnologia de encapsulamento na área de alimentos: Uma revisão. 2020.

BATISTA, Leonam da Silva Pereira. Encapsulação de probióticos: aspectos técnicos, efeitos na preservação da viabilidade e aplicação em alimentos. 2022.

BORDINI, Fernanda Weber et al. Probióticos: inovações no desenvolvimento de formulações de alimentos funcionais não convencionais. **Probióticos: viabilidade e saúde**, p. 51-88, 2022.

BUDIN, Ana Caroline. Microencapsulação do extrato de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) por gelificação iônica: avaliação da estabilidade e aplicação em barras de frutas e cereais. 2022.

CARLOS, Erica Alexandra de Almeida. Avaliação do potencial tecnológico e probiótico de bactérias ácido lácticas isoladas de queijos tradicionais portugueses. 2022.



CAVINATTI, Luana Batista. Desenvolvimento de pasta de amendoim funcional contendo proteína do soro de leite e probióticos. 2025.

COELHO, Edivaldo Bruno dos Santos. Desenvolvimento de estruturado de cajá-umbu (*Spondias bahiensis*) com incorporação de *Lacticaseibacillus rhamnosus* GG através de revestimento de gelatina. 2024.

CORREIA, Hugo José de Araújo. Microencapsulação de kefir pela técnica de gelificação iônica para aplicação em alimentos. 2022.

DA SILVA, Thaís Cristina Mendes; SILVA, Marcia Cristina; DA CRUZ, Adriano Gomes. Benefícios conferidos à saúde através do consumo de queijos probióticos. **Alimentos: Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente**, v. 2, n. 12, p. 81-95, 2021.

DE ALMEIDA CARLOS, Erica Alexandra. **Avaliação do Potencial Tecnológico e Probiótico de Bactérias Ácido Lácticas Isoladas de Queijos Tradicionais Portugueses**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade de Lisboa (Portugal).

DE FARIAS, Thaísa Gabriela Silva et al. Alimentos simbióticos: uso da co-encapsulação como forma de veiculação de probióticos e prebióticos. In: **AVANÇOS EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS-VOLUME 4**. Editora Científica Digital, 2021. p. 39-58.

DE SANTANA, Letícia Olimpia et al. Microencapsulação de *Lacticaseibacillus*: Uma revisão sistemática. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 14, p. e12121444400-e12121444400, 2023.

DEGENHARDT, Roberto et al. O paradoxo microbiano das Bactérias Ácido Lácticas nos alimentos. 2025.

DO LAGO, Gleice Vasconcelos Pereira et al. Secagem, Revestimento e Encapsulamento de Partículas por Spray-Dryer: desenvolvimento, desafios e inovações. **Revista Cereus**, v. 16, n. 1, p. 306-322, 2024.

DORNELES, Mariane Santos. Aproveitamento da pinha da *Araucaria Angustifolia* para extração de compostos bioativos e obtenção de amido resistente para uso como encapsulante. 2025.

DOS SANTOS, Ediane Dejjaly. Sobrevivência da levedura probiótica *Komagataella phaffii* cepa X-33 livre e microencapsulada aplicada em uma matriz alimentar não láctea. 2024.

GOMES, Miriam Cristina da Silva et al. **Microencapsulação de *Lactobacillus acidophilus* por spray drying empregando pectina e concentrado proteico de soro de leite como agentes encapsulantes**. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GOULART, Aline Krümmel Pazzini. Filmes Ativos Biodegradáveis de Fécula de Mandioca com Carvacrol Livre ou Nanoencapsulado para Conservação de Carne Moída. 2025.

LÉO, Alessandra Figueirôa. Avaliação da atividade anti-hipertensiva de uma bebida probiótica em ratos espontaneamente hipertensos. 2020.

LIMA, Nicole Guimarães et al. O limiar entre farmácia e alimentos: Microencapsulação de vitamina B12 para enriquecimento de alimentos plant-based. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 3, p. e1912340354-e1912340354, 2023.

LOPES, Ana Claudia Aparecida et al. **Revestimento comestível com carvacrol: tecnologia de conservação pós-colheita de fruto**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MARTIN, José Guilherme Prado; DE DEA LINDNER, Juliano. **Microbiologia de alimentos fermentados**. Editora Blucher, 2022.

OLIVEIRA, Alessandra Lopes de; LEITE DELLOVA, Deise Carla Almeida; SOUSA, Ricardo Luiz Moro de. Caderno de resumos do V Simpósio de Pós-Graduação da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos. 2022.

OLIVEIRA, Jéssica Moura de. Obtenção de microcápsulas do extrato de erva cidreira (*Melissa officinalis* L.), pelo processo de gelificação iônica: caracterização dos compostos bioativos e da capacidade antioxidante. 2020.

OTAVIANO, Leticia Galli; CERINO, Ana Paula. Estudo da Aplicação de Microrganismos Probióticos Micro encapsulados em Alimentos. **Environmental Science & Technology Innovation-ISSN 2965-1158**, v. 1, n. 02, 2022.

PELLIZZON, Elisa. Principais técnicas de encapsulação de óleos vegetais: uma revisão. 2024.

PINTO, Adriana Alvaredo. O microbioma, a doença inflamatória intestinal e a alimentação. 2023.

SILVA, Sebastião Ânderson Dantas da. Microencapsulação de *Lactobacillus acidophilus* e *Lactiplantibacillus plantarum* em alginato e gelatina: estudo da produção, caracterização e estabilidade visando aplicação em alimentos. 2021.

TASCA, Janaina dos Santos. Desenvolvimento de micropartículas de alginato e hidroxiapatita contendo óleo essencial de *cymbopogon* (citronela) para ação antimicrobiana e repelente. 2025.

VIANA, Carolina Carvalho Ramos et al. Microencapsulamento de bactérias probióticas: uma breve revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, p. e242101320814-e242101320814, 2021.

VIDO, Mariana Alves Gragnani. Microencapsulação de culturas probióticas para aplicação em formulas infantis e avaliação da viabilidade após o preparo. 2020.

ZAMPOL, Francisco J. **Agricultura Transgênica: direito constitucional de informação e escolha**. Editora Dialética, 2021.

## ENCERRAMENTO

A construção analítica desenvolvida ao longo deste livro permite compreender que a discussão sobre a qualidade da água subterrânea, longe de se esgotar nos limites de um campo técnico específico, projeta-se como uma problemática estrutural que atravessa dimensões científicas, territoriais e políticas, exigindo uma leitura que reconheça a complexidade dos sistemas aquíferos e a multiplicidade de fatores que condicionam sua dinâmica. Ao longo dos capítulos, evidenciou-se que o monitoramento hidroquímico não pode ser reduzido a um procedimento operacional voltado à geração de dados, mas deve ser compreendido como prática interpretativa situada, na qual cada parâmetro analisado, cada técnica empregada e cada modelo adotado participam da construção de uma determinada forma de conhecer a realidade subterrânea. Nesse sentido, a água subterrânea deixa de ser concebida como recurso invisível e passivo, passando a ocupar o centro de uma reflexão que a insere em circuitos ambientais amplos, nos quais se articulam processos geológicos, fluxos hidrodinâmicos e intervenções antrópicas, configurando um campo analítico no qual o conhecimento depende da capacidade de integrar diferentes escalas e dimensões do fenômeno.

A trajetória argumentativa apresentada revela que a compreensão da qualidade da água subterrânea exige a superação de dicotomias simplificadoras entre natural e antrópico, técnico e político, dado e interpretação, uma vez que os sistemas hidrogeoquímicos se constituem precisamente na interseção entre esses domínios. Ao evidenciar que os parâmetros físico-químicos refletem processos complexos de interação água-rocha e, simultaneamente, respondem às formas de uso do território, o livro demonstra que qualquer tentativa de análise isolada tende a produzir leituras parciais, incapazes de apreender a totalidade do fenômeno. Nesse contexto, os métodos de amostragem, as técnicas analíticas e os índices de qualidade assumem papel decisivo não apenas na produção de resultados, mas na definição dos próprios limites do que pode ser conhecido, o que implica reconhecer que o monitoramento é também um processo de construção epistemológica. A análise crítica desses instrumentos, desenvolvida ao longo da obra, aponta para a necessidade de utilizá-los como mediações interpretativas, evitando sua reificação como representações absolutas da realidade e reconhecendo suas potencialidades e limitações no interior de sistemas marcados por elevada heterogeneidade.

Ao mesmo tempo, a articulação entre diagnóstico hidrogeoquímico e estratégias de gestão evidencia que a produção de conhecimento não pode ser dissociada de sua dimensão aplicada, sobretudo em um contexto no qual a intensificação do uso da água subterrânea e a expansão de pressões antrópicas colocam em risco a sustentabilidade dos aquíferos. A análise das políticas públicas, dos instrumentos de regulação e das práticas de monitoramento revela que a efetividade das ações de controle e proteção depende da capacidade de integrar saber técnico, organização institucional e leitura territorial, o que exige deslocar a gestão da água subterrânea para um plano no qual ciência e política se entrelaçam de forma indissociável. Essa constatação reforça a necessidade de construir modelos de governança que não apenas respondam a problemas já instalados, mas que sejam capazes de antecipar cenários de degradação, incorporando a avaliação de vulnerabilidade e risco como dimensões centrais do planejamento.

Diante desse quadro, o encerramento desta obra não se configura como ponto final, mas como abertura para um campo de investigação e intervenção que permanece em

permanente transformação, impulsionado tanto pelos avanços científicos quanto pelas mudanças nas formas de uso do território e nas demandas sociais por água de qualidade. A reflexão aqui desenvolvida indica que o desafio contemporâneo não reside apenas em aprimorar técnicas de monitoramento ou em expandir bases de dados, mas em construir abordagens analíticas capazes de lidar com a complexidade dos sistemas subterrâneos, reconhecendo que a qualidade da água é resultado de processos dinâmicos, historicamente situados e profundamente interdependentes. Nesse sentido, o livro contribui ao oferecer uma leitura integrada que articula teoria, método e aplicação, ao mesmo tempo em que aponta para a necessidade de aprofundamento contínuo das pesquisas e do diálogo entre diferentes áreas do conhecimento, condição indispensável para enfrentar, de forma consistente, os desafios associados à proteção e ao uso sustentável das águas subterrâneas.