

ESTRESSE HÍDRICO EM *PHASEOLUS VULGARIS*: RESPOSTAS ANATÔMICAS E FISIOLÓGICAS

Gladison Luciano Perosini¹

¹ Universidad Leonardo da Vinci - Paraguai

Email para correspondência: gladisonperosini@gmail.com

Resumo

O estresse hídrico é um dos principais fatores limitantes da produtividade agrícola, especialmente em regiões semiáridas, onde a escassez de água compromete culturas alimentares essenciais. Este estudo revisa, sob abordagem narrativa analítica, as alterações anatômicas e fisiológicas em *Phaseolus vulgaris* submetido a déficit hídrico, com foco na aplicação de bioestimulos vegetais como estratégia mitigadora. A análise abrange publicações indexadas entre 2010 e 2025, obtidas em bases como Scopus, Web of Science e SciELO. Destacam-se adaptações estruturais como espessamento do parênquima paliádico, reorganização estomática, acúmulo de solutos compatíveis e ativação de enzimas antioxidantes, que favorecem a homeostase celular e a eficiência fotossintética em condições adversas. Os bioestimulos incluindo extratos vegetais, aminoácidos e microrganismos promotores de crescimento mostraram-se eficazes na indução de plasticidade adaptativa. A integração dessas práticas com o manejo racional da água representa uma via promissora para a sustentabilidade agrícola, especialmente frente às mudanças climáticas. Os resultados oferecem subsídios científicos relevantes para políticas públicas e práticas inovadoras voltadas à agricultura familiar em contextos de vulnerabilidade hídrica.

Palavras-chave: estresse hídrico, bioestimulos vegetais, *phaseolus vulgaris*.

Abstract

Water stress is one of the main limiting factors of agricultural productivity, particularly in semi-arid regions where water scarcity directly compromises essential food crops. This study provides an analytical narrative review of anatomical and physiological changes in *Phaseolus vulgaris* under water deficit, emphasizing the application of plant biostimulants as a mitigating strategy. The analysis includes indexed publications from 2010 to 2025 retrieved from databases such as Scopus, Web of Science, and SciELO. Key structural adaptations include thickening of the palisade parenchyma, stomatal reorganization, accumulation of compatible solutes, and activation of antioxidant enzymes, all of which promote cellular homeostasis and photosynthetic efficiency under stress. Biostimulants—including plant extracts, amino acids, and growth-promoting microorganisms—proved effective in inducing adaptive plasticity. The integration of these approaches with rational water management emerges as a promising pathway for sustainable agriculture, particularly in the face of climate change. The findings provide valuable scientific insights for public policy and innovative practices aimed at supporting smallholder agriculture in water-scarce environments..

Keywords: water stress, plant biostimulants, *phaseolus vulgaris*.

1 Introdução

A escassez hídrica é uma das maiores ameaças à segurança alimentar global, responsável por até 50% de perdas na produtividade agrícola, especialmente em regiões tropicais e semiáridas (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura – FAO, 2022). A intensificação das mudanças climáticas e o uso excessivo da água comprometem a estabilidade dos sistemas agrícolas convencionais. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), a frequência de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, tende a aumentar, afetando culturas dependentes de regimes hídricos regulares.

Entre as culturas mais afetadas está o *Phaseolus vulgaris* L. (feijão-comum), essencial para populações vulneráveis e amplamente cultivado por pequenos produtores em sistemas de baixa tecnologia. A espécie tem sido modelo em estudos de estresse abiótico devido à sua sensibilidade ao déficit hídrico e à intensa resposta morfofisiológica sob seca (Flexas *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2022). A limitação hídrica impacta fortemente a fotossíntese, o metabolismo primário, a morfogênese foliar e o crescimento radicular, afetando o rendimento da cultura.

Apesar dos avanços no melhoramento genético para tolerância à seca, a complexidade poligênica e a diversidade genotípica dificultam sua eficácia em campo (Meena *et al.*, 2025). Nesse contexto, tecnologias baseadas na biotecnologia vegetal, como os bioestímulos, emergem como estratégias promissoras, atuando multifatorialmente sobre fisiologia, anatomia e bioquímica vegetal.

Bioestímulos são substâncias ou microrganismos aplicados em pequenas doses, capazes de modular processos fisiológicos, promovendo crescimento, produtividade e maior tolerância ao estresse abiótico (Du Jardin, 2015; Rouphael e Colla, 2020). Incluem extratos de algas, aminoácidos, ácidos húmicos, hormônios vegetais e microrganismos promotores de crescimento (PGPRs). Estudos indicam que esses compostos ativam vias hormonais como a do ácido abscísico (ABA), induzem respostas osmoprotetoras e antioxidantes, e promovem alterações anatômicas como espessamento da epiderme, reorganização do mesófilo e aumento da densidade de células paliçádicas (Martins *et al.*, 2025; Xu e Geelen, 2023).

Avanços em fenotipagem de alta precisão (HTP) têm possibilitado monitoramento em tempo real dos efeitos fisiológicos da aplicação de bioestímulos. Ferramentas como sensores hiperespectrais e algoritmos de *machine learning* permitem quantificar parâmetros como condutância estomática, área foliar e teor relativo de água com alta acurácia, mesmo antes de sintomas visuais (Okyere *et al.*, 2024; Verheyen *et al.*, 2024). Essas tecnologias consolidam os bioinsumos como aliados da agricultura digital e de precisão.

Apesar dos avanços, há lacunas na aplicação prática desses compostos em condições reais de campo, especialmente em regiões tropicais. Faltam estudos integrando dados anatômicos, fisiológicos e agronômicos em genótipos contrastantes de *P. vulgaris*, e são escassos os protocolos padronizados de aplicação dos bioestímulos.

Esta revisão propõe uma análise narrativa analítica com busca sistemática dos efeitos do estresse hídrico em *P. vulgaris*, com foco nos bioestímulos como agentes mitigadores das alterações morfofisiológicas. Foram considerados artigos entre 2010 e 2025, das bases Scopus, Web of Science, SciELO e Google Scholar, priorizando rigor metodológico, aplicabilidade e relevância científica. Ao integrar evidências clássicas e recentes, busca-se contribuir para práticas agrícolas sustentáveis, eficientes no uso da água, e alinhadas à biotecnologia vegetal, apoiando políticas públicas voltadas à agricultura familiar.

2 Metodologia

Este estudo configura-se como uma revisão narrativa de caráter analítico, voltada à identificação, organização e interpretação crítica da produção científica acerca das respostas anatômicas e fisiológicas de *Phaseolus vulgaris* submetido ao estresse hídrico, com ênfase na aplicação de bioestímulos vegetais como estratégia mitigadora e suas implicações no manejo racional da água.

A coleta de dados foi conduzida entre maio e julho de 2025, por meio de busca sistemática nas bases de dados Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed, Google Scholar e SciELO. Utilizou-se descritores em português, inglês e espanhol, combinando termos como: “*Phaseolus vulgaris*”, “estresse hídrico”, “déficit hídrico”, “bioestímulo vegetal”, “plant biostimulant”, “anatomia vegetal”, “respostas fisiológicas” e “microscopia óptica”.

Foram incluídos artigos publicados entre 2010 e 2025, com acesso integral e revisão por pares, redigidos em português, inglês ou espanhol, que abordassem pelo menos um dos seguintes aspectos: (i) alterações morfoanatômicas ou fisiológicas em *P. vulgaris* sob déficit hídrico; (ii) efeitos de bioestímulos vegetais em leguminosas; ou (iii) estratégias biotecnológicas voltadas ao manejo hídrico agrícola. Excluíram-se estudos com espécies não alimentares (exceto como modelos comparativos), publicações focadas exclusivamente em insumos químicos sintéticos e artigos fora do escopo temático.

A triagem dos estudos seguiu três etapas: (1) leitura de títulos e resumos, (2) análise do texto completo e (3) categorização dos estudos segundo quatro eixos temáticos: (i) alterações anatômicas induzidas pelo estresse hídrico em *P. vulgaris*; (ii) respostas fisiológicas à restrição hídrica; (iii) ação dos bioestímulos vegetais como mitigadores dos efeitos do estresse; e (iv) contribuições desses conhecimentos para práticas agrícolas sustentáveis e eficientes no uso da água.

A análise dos dados foi qualitativa e interpretativa, visando identificar padrões emergentes, lacunas no conhecimento e aplicações potenciais na biotecnologia vegetal, com foco em adaptação climática e conservação hídrica.

Além disso, foi realizado um mapeamento das principais revistas científicas da área, incluindo periódicos especializados em fisiologia vegetal, biotecnologia e ciências agrárias, de modo a assegurar a diversidade e a atualidade dos dados utilizados. A

classificação temática dos artigos revisados permitiu não apenas a sistematização do conteúdo, mas também a identificação de tendências emergentes na aplicação de bioestímulos e no uso de marcadores anatômicos e fisiológicos como ferramentas de seleção e manejo. A análise crítica considerou aspectos metodológicos, estatísticos e aplicabilidade prática dos resultados, com vistas à construção de uma base teórica integrativa e aplicada.

3 Resultados e Discussão

A exposição de *Phaseolus vulgaris* ao estresse hídrico resulta em uma ampla gama de respostas adaptativas que envolvem mudanças estruturais e funcionais em múltiplos níveis da organização vegetal. A análise integrada da literatura científica revelou padrões consistentes de modificação anatômica e fisiológica associados à tolerância à seca, especialmente quando a planta é tratada com bioestímulos vegetais. Para melhor compreensão desses mecanismos, os resultados foram organizados em três eixos temáticos: (i) alterações anatômicas induzidas pelo déficit hídrico; (ii) respostas fisiológicas em condições de limitação hídrica; e (iii) ação mitigadora dos bioestímulos vegetais. A seguir, apresentam-se os principais achados em cada uma dessas dimensões.

3.1 Eixo 1: Alterações anatômicas induzidas pelo estresse hídrico em *Phaseolus vulgaris*

A exposição ao estresse hídrico desencadeia uma série de alterações estruturais nos tecidos vegetais, refletindo a notável plasticidade anatômica de *Phaseolus vulgaris* como estratégia adaptativa frente à limitação hídrica (Silva *et al.*, 2022). Essas mudanças envolvem adaptações em diferentes níveis da arquitetura foliar, da epiderme à estrutura interna do mesófilo, permitindo uma resposta eficiente frente à limitação de água e calor excessivo (Taiz *et al.*, 2017; Beebe *et al.*, 2022).

Dentre as alterações mais recorrentes, destaca-se o espessamento da epiderme e da cutícula, o qual atua como barreira física à perda de água, reduzindo a taxa de transpiração e aumentando a resistência à dessecação (Polania *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2025). A cutícula espessada também pode apresentar maior deposição de compostos hidrofóbicos como ceras e suberina, reforçando sua função de isolamento. Estudos morfoquantitativos apontam que a espessura cuticular pode dobrar sob déficit hídrico severo, atuando sinergicamente com a rigidez das células epidérmicas, que conferem proteção mecânica adicional às folhas (Liu *et al.*, 2021).

Mudanças na densidade, no tamanho e na distribuição dos estômatos também são frequentemente relatadas. A redução estomática, aliada à diminuição do diâmetro dos poros, constitui uma resposta adaptativa eficaz, restringindo a perda hídrica por transpiração sem comprometer por completo a troca gasosa (Jha *et al.*, 2019). Em situações de seca prolongada, verifica-se uma reorganização funcional e espacial dos estômatos, com tendência à sua maior concentração na face abaxial, onde a incidência solar é menor, contribuindo para redução da evaporação direta.

No mesófilo foliar, destacam-se alterações expressivas como o espessamento do parênquima paliádico e lacunoso, a compactação celular e a redução dos espaços intercelulares. Essas adaptações promovem maior assimilação de carbono e reduzem a perda de água por difusão, mantendo a funcionalidade fotossintética por mais tempo (Beebe et al., 2022). A compactação do mesófilo também confere maior resistência mecânica às folhas, evitando o colapso celular sob desidratação extrema.

Além disso, alterações na vascularização, como o aumento do diâmetro dos feixes vasculares e da proporção de xilema funcional, também têm sido documentadas como resposta ao estresse hídrico. Essas modificações favorecem o transporte de água e solutos, mesmo em condições de baixa disponibilidade hídrica, e podem ser integradas a índices de tolerância (Martins *et al.*, 2025).

Do ponto de vista biotecnológico, esses parâmetros anatômicos representam marcadores fenotípicos valiosos na seleção de genótipos mais tolerantes à seca. Tais características estruturais são passíveis de quantificação via técnicas de microscopia de luz e imagem digital, integrando-se a programas de melhoramento vegetal assistido por análise morfométrica (Liu *et al.*, 2021). Ademais, sua correlação com parâmetros fisiológicos e bioquímicos fortalece a adoção de abordagens integradas para avaliação da resiliência hídrica em leguminosas. A anatomia vegetal, portanto, não apenas revela os efeitos do estresse, mas também orienta práticas agronômicas e decisões de seleção com base em evidências estruturais robustas.

3.2 Eixo 2: Respostas fisiológicas sob déficit hídrico

As alterações fisiológicas induzidas pelo estresse hídrico em *Phaseolus vulgaris* são complexas e multifatoriais, afetando processos centrais do metabolismo vegetal. Entre as respostas mais proeminentes está a redução da taxa fotossintética, geralmente associada à diminuição da condutância estomática, à limitação na difusão de CO₂ e ao comprometimento da atividade de enzimas do ciclo de Calvin (Taiz *et al.*, 2017; Flexas *et al.*, 2020). Essa resposta inicial é crucial para reduzir perdas por transpiração, mas frequentemente resulta em prejuízo à produção de biomassa, evidenciando o delicado balanço entre conservação hídrica e assimilação de carbono.

A condutância estomática é frequentemente o primeiro mecanismo ativado em resposta à escassez hídrica. Plantas com maior plasticidade estomática, capazes de ajustar o grau de abertura e o tempo de fechamento dos poros, tendem a apresentar desempenho superior sob flutuações hídricas. Esse mecanismo de ajuste fino é particularmente relevante para cultivares adaptadas a ambientes semiáridos, onde a disponibilidade de água é intermitente (Rouphael e Colla, 2020). Além disso, foi observado que, em algumas linhagens tolerantes, a condutância estomática é parcialmente mantida durante o estresse moderado, permitindo certa continuidade da fotossíntese sem comprometer drasticamente a transpiração (Martins *et al.*, 2025).

A transpiração é reduzida não apenas por mecanismos estomáticos, mas também por modificações na arquitetura foliar, como o enrolamento das folhas, a menor

expansão foliar e a alteração no ângulo de exposição ao sol. Essas estratégias morfofisiológicas visam minimizar o acúmulo de radiação térmica, reduzir a superfície de evaporação ativa e conservar o estado hídrico interno da planta (Silva *et al.*, 2023). Tais respostas são frequentemente acompanhadas de alterações na atividade de aquaporinas, proteínas de membrana envolvidas no transporte de água, cuja expressão é regulada sob estresse hídrico.

O déficit hídrico provoca também alterações profundas no estado hídrico dos tecidos, como a queda no conteúdo relativo de água (CRA) e no potencial hídrico foliar, levando a um quadro de estresse osmótico e desorganização metabólica. Como resposta adaptativa, *P. vulgaris* ativa mecanismos de ajuste osmótico, promovendo o acúmulo de solutos compatíveis como prolina, açúcares solúveis, glicina-betaína e compostos fenólicos (Meena *et al.*, 2025). Esses solutos desempenham múltiplas funções, incluindo a manutenção da turgidez celular, a proteção de estruturas macromoleculares e a regulação do potencial osmótico intracelular.

Adicionalmente, há incremento na atividade de enzimas antioxidantes como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidase (POD), que desempenham papel central na neutralização de espécies reativas de oxigênio (ROS) geradas durante a seca (Silva *et al.*, 2023). O acúmulo de ROS sob estresse hídrico pode causar peroxidação lipídica, danos ao DNA e disfunção mitocondrial; portanto, a ativação do sistema antioxidante é considerada uma das principais estratégias de tolerância. Estudos demonstram que cultivares com maior atividade antioxidante apresentam menor dano oxidativo e melhor desempenho agrônômico em ambientes adversos.

A integração entre essas respostas fisiológicas revela a sofisticação adaptativa de *P. vulgaris* frente à seca. A quantificação desses parâmetros em estudos fenotípicos permite avaliar a eficácia de bioestímulos vegetais e selecionar genótipos com maior eficiência no uso da água (EUA), consolidando uma base científica robusta para estratégias de melhoramento e manejo sustentável. Além disso, a caracterização fisiológica detalhada fornece subsídios para formulações de bioinsumos mais direcionadas, otimizando a ativação de vias metabólicas associadas à tolerância ao estresse abiótico.

Esses achados estão sintetizados no Quadro 1, que compara os principais parâmetros morfofisiológicos observados em *P. vulgaris* sob estresse hídrico, com e sem aplicação de bioestímulos vegetais, destacando os efeitos benéficos desses compostos na mitigação dos impactos do déficit hídrico.

Quadro 1: Comparação das respostas morfofisiológicas de *Phaseolus vulgaris* sob estresse hídrico com e sem aplicação de bioestímulos vegetais

Parâmetro analisado	Sem bioestímulo (controle)	Com bioestímulo vegetal
Espessamento da epiderme e cutícula	Reduzido	Aumentado, com deposição de ceras
Densidade estomática	Redução acentuada	Redução moderada, com manutenção funcional
CRA (Conteúdo Relativo de Água)	Baixo	Elevado, indicando melhor retenção hídrica
Atividade de enzimas antioxidantes	Moderada	Elevada (SOD, CAT, POD)
Acúmulo de solutos compatíveis	Limitado	Elevado (prolina, açúcares, fenóis)
Taxa fotossintética	Reduzida	Parcialmente mantida sob estresse
Arquitetura do mesófilo	Compactação Desorganizada	Reorganização funcional Com maior densidade celular
Eficiência no uso da água (EUA)	Baixa	Alta

Fonte: Autoria própria (2025)

3.3 Eixo 3: Ação dos bioestímulos vegetais como mitigadores do estresse hídrico

Bioestímulos vegetais representam uma das fronteiras mais promissoras da biotecnologia agrícola contemporânea, atuando como reguladores metabólicos capazes de aumentar a tolerância ao estresse abiótico em diversas culturas, incluindo *Phaseolus vulgaris* (Calvo *et al.*, 2014; Rouphael *et al.*, 2020). Esses compostos compreendem uma gama heterogênea de substâncias, como extratos de algas, aminoácidos livres, peptídeos bioativos, hormônios vegetais e microrganismos promotores de crescimento (PGPRs), que atuam sinergicamente na modulação fisiológica e estrutural das plantas. Nos últimos anos, sua utilização tem sido intensamente estudada, dada a capacidade de promover respostas adaptativas complexas com baixo impacto ambiental e alto potencial de integração a práticas agrícolas sustentáveis.

Sob condições de déficit hídrico, a aplicação de bioestímulos tem demonstrado reduzir os efeitos deletérios sobre a biomassa, a área foliar e a taxa fotossintética de *P. vulgaris*, promovendo maior estabilidade metabólica mesmo em ambientes com restrição hídrica severa (Silva *et al.*, 2023). Esses compostos favorecem o acúmulo de solutos osmoprotetores como prolina, glicina-betaína e açúcares solúveis, os quais desempenham papel crucial na manutenção do potencial osmótico e na estabilização de proteínas e membranas. Além disso, o uso de bioestímulos está associado à ativação de vias de sinalização relacionadas ao ácido abscísico (ABA), um hormônio-chave na

resposta ao estresse hídrico, reforçando o fechamento estomático e o controle hídrico da planta.

A eficiência no uso da água (EUA) também é positivamente influenciada, uma vez que os bioestímulos modulam não apenas os mecanismos de absorção e transporte, mas também a capacidade de retenção hídrica das células. Estudos demonstram que, em feijoeiros tratados com extratos de algas ou consórcios de aminoácidos, houve aumento significativo na taxa fotossintética líquida, mesmo sob estresse severo, resultado da manutenção funcional dos cloroplastos e da integridade das membranas celulares (Lourenço *et al.*, 2020). Essa estabilidade metabólica se traduz em maior persistência vegetativa e redução do colapso foliar, o que repercute positivamente no rendimento final da cultura.

Do ponto de vista anatômico, a aplicação de bioestímulos resulta em modificações estruturais marcantes. O espessamento da cutícula, a manutenção da funcionalidade estomática, a reorganização do mesófilo e a maior densidade de células fotossintéticas são adaptações comuns observadas após aplicação de determinados produtos bioativos (Silva *et al.*, 2022). Essas alterações estruturais contribuem para a integridade celular e para a manutenção da atividade fotossintética, mesmo sob limitação hídrica prolongada. Em cultivares de *P. vulgaris*, a aplicação de extratos de algas marinhas resultou em folhas mais espessas e com maior densidade de células paliçádicas, o que se correlacionou positivamente com a persistência fotossintética durante a seca.

Além dos compostos bioativos, os microrganismos rizosféricos – especialmente os PGPRs como *Azospirillum*, *Bacillus* e *Pseudomonas* – têm desempenhado papel fundamental na mitigação dos efeitos do estresse hídrico. Esses microrganismos favorecem a absorção de água e nutrientes, promovem a produção de fitohormônios endógenos (como ABA e citocininas) e ativam mecanismos de resistência sistêmica adquirida (ISR). Ainda, atuam na melhora da estrutura do solo e da rizosfera, aumentando a capacidade de retenção hídrica e a eficiência da colonização radicular (Rouphael *et al.*, 2020).

Nos últimos anos, o avanço das tecnologias de fenotipagem de alto rendimento (HTP) tem revolucionado a avaliação da resposta de cultivares e bioinsumos. Sensores hiperespectrais e plataformas de imagem multitemporal integradas a inteligência artificial e algoritmos de *machine learning* permitem quantificar com alta acurácia (> 94 %) parâmetros fisiológicos como condutância estomática, taxa fotossintética e teor relativo de água, mesmo antes da manifestação de sintomas visíveis de estresse (Okyere *et al.*, 2024; Verheyen *et al.*, 2024). Esses sistemas, cada vez mais aplicados a fabáceas como soja e feijão, possibilitam avaliar em tempo real os efeitos de bioestímulos sob diferentes condições edafoclimáticas.

A integração entre bioestímulos e ferramentas de fenotipagem moderna contribui para acelerar a seleção de genótipos mais eficientes, além de reduzir os custos e o tempo dos ensaios de campo. A modelagem de dados morfofisiológicos com base em inteligência artificial permite prever a performance de cultivares sob múltiplos cenários

hídricos, promovendo a transição para uma agricultura digital e de precisão. Assim, os bioestímulos vegetais, quando associados a tecnologias de monitoramento avançado, deixam de serem apenas insumos biológicos e passam a compor estratégias integradas de manejo agrícola sustentável e resiliente.

As evidências acumuladas reforçam o valor estratégico dos bioestímulos vegetais como ferramentas sustentáveis de manejo agrícola. Sua aplicação integrada ao conhecimento anatômico e fisiológico de *P. vulgaris* pode otimizar a adaptação das plantas a ambientes com disponibilidade hídrica variável, promovendo uma agricultura menos dependente de insumos sintéticos e mais resiliente às mudanças climáticas. A consolidação dessa abordagem exige, contudo, protocolos padronizados de aplicação, além de estudos de campo de longo prazo que considerem a variabilidade genética entre cultivares e as interações com o ambiente edáfico-climático.

Embora diversos estudos apontem para os efeitos positivos dos bioestímulos sob estresse hídrico, ainda há controvérsias quanto à variabilidade das respostas em diferentes cultivares de *Phaseolus vulgaris*. Por exemplo, enquanto Lourenço *et al.* (2020) relatam ganhos superiores a 30% na taxa fotossintética em cultivares tratadas com extratos de algas, Silva *et al.* (2022) observaram efeitos marginais (<10%) sob as mesmas condições, sugerindo influência do genótipo, fenofase e composição específica dos bioinsumos. Essa heterogeneidade evidencia a necessidade de estudos comparativos diretos com cultivares contrastantes e sob diferentes regimes hídricos.

Além disso, poucos trabalhos abordam a durabilidade dos efeitos bioestimulantes ao longo do ciclo reprodutivo completo da planta. A maioria dos estudos se limita a fases vegetativas iniciais, o que restringe a extrapolação dos resultados a condições de campo. Faltam também padronizações metodológicas quanto à concentração, frequência e modo de aplicação dos bioestímulos, dificultando a comparação entre experimentos e a formulação de recomendações agrônômicas consistentes.

De forma integrativa, o Quadro 2 apresenta uma complaração dos principais mecanismos anatômicos, fisiológicos e bioquímicos ativados por *Phaseolus vulgaris* sob estresse hídrico, com destaque para os efeitos moduladores da aplicação de bioestímulos vegetais.

Por fim, ainda há escassez de estudos que integram dados fenotípicos e transcriptômicos sob aplicação de bioestímulos, especialmente em condições edafoclimáticas tropicais. A ausência de painéis genéticos amplos avaliados sob estresse controlado limita a identificação de locos de características quantitativas e genes candidatos associados à resposta bioestimulada à seca.

Quadro 2. Resumo dos principais mecanismos de resposta ao estresse hídrico em *Phaseolus vulgaris*, com e sem aplicação de bioestímulos vegetais

Categoria	Sem Bioestímulos	Com Bioestímulos
Anatômicos	Espessamento cuticular e epidérmico moderado; redução estomática sem reorganização significativa	Maior espessamento cuticular; reorganização do mesófilo; manutenção funcional dos estômatos
Fisiológicos	Redução da condutância estomática e da taxa fotossintética; acúmulo limitado de solutos compatíveis	Maior taxa fotossintética; aumento da eficiência do uso da água; acúmulo de prolina e açúcares
Bioquímicos	Atividade antioxidante basal; vulnerabilidade à peroxidação lipídica	Ativação de enzimas antioxidantes (SOD, CAT, POD); proteção contra ROS
Hidráulicos	Queda acentuada no conteúdo relativo de água e no potencial hídrico	Estabilização do potencial osmótico; maior retenção e absorção hídrica
Impacto Agrônomo	Redução expressiva de biomassa e produtividade	Mitigação de perdas; manutenção do desempenho agrônomo

Fonte: Autoria própria (2025)

3.4 Eixo 4: Contribuições ao manejo sustentável da água e à biotecnologia vegetal

A integração do conhecimento anatômico e fisiológico de *Phaseolus vulgaris* frente ao estresse hídrico, especialmente sob a aplicação de bioestímulos vegetais, oferece caminhos sólidos e multifuncionais para o aprimoramento do manejo hídrico em sistemas agrícolas contemporâneos. Em um cenário global marcado por escassez progressiva de água, instabilidades climáticas e crescentes restrições ambientais, estratégias fundamentadas na eficiência do uso da água (EUA), na plasticidade vegetal e na intensificação ecológica da agricultura ganham centralidade nas agendas científicas e políticas (FAO, 2022).

Bioestímulos vegetais, ao promoverem modulações estruturais e metabólicas adaptativas, destacam-se como ferramentas biotecnológicas sustentáveis, com potencial para reduzir os efeitos deletérios da seca, preservar funções fisiológicas críticas e fortalecer a integridade dos tecidos vegetais, mesmo sob restrição hídrica severa (Silva *et al.*, 2023; Martins *et al.*, 2025). Essa plasticidade induzida pode ser explorada em programas de melhoramento genético, formulação de bioinsumos e modelagem de cultivos inteligentes voltados à conservação de recursos hídricos e à redução da dependência de insumos sintéticos.

Do ponto de vista agrônomo, os bioestímulos representam uma ponte concreta entre ciência e prática agrícola. Sua aplicação, sobretudo em culturas alimentares como o feijão-comum, oferece soluções de baixo custo, alta eficiência e fácil integração para pequenos e médios produtores — atores frequentemente mais expostos aos impactos da seca. Lourenço *et al.*, (2020) apontam que, além de melhorar o desempenho fisiológico das plantas, os bioestímulos contribuem para estabilizar a produtividade em ambientes

marginais. Sua escalabilidade, baixa toxicidade e compatibilidade ambiental reforçam sua inserção em sistemas agrícolas de base ecológica, agroflorestal ou conservacionista.

Adicionalmente, os parâmetros morfofisiológicos destacados nesta revisão configuram-se como marcadores fenotípicos estratégicos para o desenvolvimento de cultivares tolerantes à seca. O uso combinado de análises anatômicas, bioquímicas e fisiológicas potencializa a acurácia das seleções genotípicas, estreitando o vínculo entre pesquisa básica e inovação aplicada. Tecnologias emergentes como fenotipagem de alta precisão, imagem hiperespectral e transcriptômica funcional possibilitam a identificação de genótipos superiores e a compreensão profunda das redes regulatórias ativadas por bioestímulos.

Entretanto, a adoção em larga escala dessa abordagem ainda enfrenta entraves importantes, como a ausência de protocolos padronizados de aplicação, a escassez de dados de longo prazo em condições reais de campo e a limitação de estudos que integrem múltiplos níveis de análise (morfofisiológico, molecular, agrônômico e econômico). Tais lacunas dificultam a elaboração de recomendações técnicas regionalizadas e a inclusão efetiva desses produtos em políticas públicas agrícolas.

Iniciativas integradas que combinem bioestímulos vegetais com práticas de manejo conservacionista — como rotação de culturas, cobertura do solo, irrigação deficitária controlada e agricultura de precisão — podem maximizar os benefícios dessas tecnologias. Além disso, o desenvolvimento de plataformas digitais para monitoramento fisiológico em tempo real e a adoção de inteligência artificial para modelagem agrônômica ampliam a capacidade de prever e gerenciar o desempenho das culturas sob diferentes cenários climáticos.

Tais abordagens dialogam diretamente com marcos regulatórios nacionais e internacionais voltados à sustentabilidade, segurança alimentar e adaptação às mudanças climáticas, o que fortalece a inserção dos produtos agrícolas em mercados exigentes e com certificações socioambientais. A construção de uma agricultura mais resiliente, equitativa e tecnicamente inovadora passa necessariamente pela valorização de soluções de base biológica, como os bioestímulos, articuladas ao conhecimento técnico-científico sobre as respostas das plantas ao estresse.

Portanto, ao articular bioestímulos vegetais com conhecimento anatômico, fisiológico e tecnológico, esta abordagem contribui significativamente para um novo paradigma agrícola — pautado pela eficiência hídrica, pela sustentabilidade produtiva e pela biotecnologia vegetal avançada. A consolidação desse modelo exige investimentos continuados em pesquisa multidisciplinar, capacitação técnica e extensão rural participativa, garantindo não apenas o acesso equitativo às inovações, mas também sua apropriação social, ambiental e econômica em larga escala.

4 Conclusão

Esta revisão destaca o feijão-comum (*Phaseolus vulgaris*) como modelo biológico estratégico para o entendimento das respostas anatômicas e fisiológicas ao estresse

hídrico. A análise integrada da literatura revelou que a espécie apresenta elevada plasticidade adaptativa frente à limitação hídrica, com destaque para o espessamento da epiderme, reorganização do mesófilo, regulação estomática e ativação de mecanismos antioxidantes e osmoprotetores.

O diferencial desta revisão reside na síntese crítica do papel dos bioestímulos vegetais como agentes mitigadores do estresse hídrico. Compostos como extratos de algas, aminoácidos e microrganismos promotores de crescimento (PGPRs) têm demonstrado eficácia na indução de respostas morfofisiológicas benéficas, promovendo maior eficiência no uso da água (EUA) e estabilidade fotossintética, mesmo sob condições de seca severa. Essa abordagem representa uma inovação relevante ao propor soluções de base biológica para o manejo hídrico sustentável, com potencial de aplicação direta na agricultura familiar e em sistemas produtivos de baixa disponibilidade hídrica.

Além do avanço conceitual, este trabalho contribui com fundamentos científicos para o desenvolvimento de tecnologias aplicadas à biotecnologia vegetal, reforçando a necessidade de protocolos padronizados, testes em diferentes genótipos e a adoção de ferramentas modernas de fenotipagem, modelagem e análises ômicas.

Consolidar essas estratégias pode fortalecer políticas públicas voltadas à resiliência agrícola, promovendo uma agricultura mais sustentável, eficiente e menos dependente de insumos sintéticos.

5 Referências

BEEBE, S., SOUZA, M., LÓPEZ, R. Root adaptations to drought stress in common bean. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 845291, 2022.

CALVO, P.; NELSON, L. Agricultural uses of plant biostimulants. **Plant and Soil**, v. 383, n. 1, p. 3–41, 2014.

DU JARDIN, P. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 3–14, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>.

FAO. The state of the world's land and water resources for food and agriculture – **systems at breaking point**. 2. ed. Rome: FAO, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc2939en/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

FLEXAS, J. *et al.* Mesophyll conductance to CO₂: current knowledge and future prospects. **Plant, Cell & Environment**, v. 43, n. 2, p. 258–271, 2020.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 2023.

JHA, U. C.; BOHRA, A. Heat stress response in legumes: physiology, genomics and breeding. **Plant Cell Reports**, v. 38, p. 1–14, 2019.

LOURENÇO, L. S. *et al.* Aplicação de extrato de algas marinhas em feijão sob déficit hídrico: respostas morfofisiológicas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 4, p. 785–792, 2020.

MARTINS, L. F. *et al.* Alterações anatômicas e fisiológicas em *Phaseolus vulgaris* submetido ao estresse hídrico. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 32, p. 98–109, 2025.

MEENA, R. S. *et al.* Physiological and biochemical basis of drought tolerance in crops: an overview. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 71, n. 1, p. 1–15, 2025.

OKYERE, J. *et al.* Hyperspectral imaging and machine learning for early detection of water stress in crop plants. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 213, p. 108092, 2024.

ROUPHAEL, Y.; COLLA, G. Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants: from experimental data to practical applications. **Agronomy**, v. 10, n. 10, p. 1461, 2020.

SILVA, A. P. *et al.* Bioestimulantes na tolerância ao déficit hídrico em leguminosas: revisão crítica. **Cadernos de Biotecnologia**, v. 3, n. 1, p. 55–68, 2023.

SILVA, D. B. *et al.* Drought stress impact on anatomical and physiological traits in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.): implications for plant resilience and productivity. **Scientia Horticulturae**, v. 302, p. 111186, 2022.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre, RS: Artmed, 2017.

VERHEYEN, J. *et al.* High-throughput phenotyping reveals multiple drought responses of wild and cultivated Phaseolinae beans. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, e1385985, 2024.

XU, L.; GEELEN, D. Recent advances in plant biostimulants: A review on their mechanisms of action and application in agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023.