REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

USO DE MICRORGANISMOS PARA REDUÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO DA SOJA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

USE OF MICROORGANISMS TO REDUCE WATER STRESS IN SOYBEAN: A LITERATURE REVIEW

Me. Fernanda Lourenço Dipple
Docente Agronomia Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT
Mestre em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola
E-mail: fernanda.dipple@unemat.br
https://orcid.org/0000-0003-3616-0359

Me. Ane Mari Keller
Doutoranda em Biotecnologia e Biodiversidade
E-mail: kelleranemari@gmail.com
https://orcid.org/0002-3500-9075

Dr. Marco Antonio Camillo de Carvalho
Docente Agronomia Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT
Doutorado e Pós-Doutorado em Agronomia
E-mail: marcocarvalho@unemat.br
https://orcid.org/0000-0003-4966-1013

Dra. Grace Queiroz David Peres
Docente Agronomia Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT
Doutora em Agronomia
E-mail: gracedavid@unemat.br
https://orcid.org/0000-0001-6032-8516

Dr. Rivanildo Dallacort
Docente Agronomia Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT
Doutorado em Agronomia
E-mail: rivanildo@unemat.br
http://orcid.org/0000-0002-7634-8973

Resumo
A cultura da soja é de suma importância para a economia mundial. Diversos fatores podem interferir no seu desenvolvimento e na sua produtividade. Dentre os fatores o clima e os intempéries ambientais podem afetar drasticamente sua produção e a economia mundial. Assim, usar estratégias sustentáveis para redução dos impactos de déficits hídricos na cultura da soja é fundamental para o sucesso da produção, principalmente em países que possuem um clima quente e seco. O uso de microrganismos possibilita reduzir os impactos de déficit hídricos, devido seus mecanismos de ação e suas interações solo, planta e ambiente. Este trabalho teve como objetivo fazer uma pesquisa sobre o uso de microrganismos para redução de estresse hídrico na cultura da soja, foi feito uma pesquisa na plataforma Scopus com as palavras microorganism" AND "water-deficit" AND "soybean" OR

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

"Trichoderma" OR "Bacillus" OR "mycorrhiza", foram selecionados 65 documentos encontrados nos últimos 10 anos. Dentre os resultados de artigos publicados durante os últimos dez anos, o período de maior concentração foi em 2020, na área de pesquisa da agricultura, onde os países que mais contribuíram foram Irã, Brasil e Índia, sendo a entidade de pesquisa com maior participação foi a Embrapa. Dentre as espécies de microrganismos as bactérias de fixação biológica de nitrogênio, os Bacillus obtiveram maior quantidade de estudos e resultados promissores, já entre os fungos o gênero Trichoderma e os FMA se destacaram em promoção de crescimento radicular, produção de fitohormônios e redução de impactos de déficit hídrico. Apesar de diversos benefícios evidenciados reforça-se a necessidade de realizar pesquisas à campo em diversas condições de estresse com cepas ou estirpes diferentes para maior equidade dos resultados.
Palavras-chave: Bactérias. Déficit hídrico. Fungos. Micorrizas.

Abstract

Soybean is a crop of great importance to the global economy, and several factors can interfere with its development and productivity. Among these factors, climate conditions and environmental adversities can drastically affect production and, consequently, the world economy. Thus, adopting sustainable strategies to mitigate the impacts of water deficit in soybean cultivation is essential for successful production, especially in countries with hot and dry climates. The use of microorganisms can reduce the effects of water deficit due to their mechanisms of action and their interactions with soil, plants, and the environment. This study aimed to investigate the use of microorganisms to alleviate water stress in soybean crops. A search was conducted on the Scopus platform using the keywords “microorganism” AND “water-deficit” AND “soybean” OR “Trichoderma” OR “Bacillus” OR “mycorrhiza,” resulting in the selection of 65 documents published in the last 10 years. Among the articles published during this period, 2020 had the highest concentration of studies, mainly in the field of agriculture. The countries that contributed the most were Iran, Brazil, and India, with Embrapa being the research institution with the greatest participation. Among microbial species, nitrogen-fixing bacteria and Bacillus showed the highest number of studies and promising results. Among fungi, the genus Trichoderma and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) stood out for enhancing root growth, promoting phytohormone production, and reducing the impacts of water deficit. Despite the various documented benefits, there remains a need for field research under diverse stress conditions using different strains to improve the consistency of results.
Keywords: Bacteria. Water deficit. Fungi. Mycorrhizae.

1 Introdução

A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merr.) representa um dos pilares da agricultura mundial por seu alto valor nutricional e múltiplas aplicações industriais. No entanto, a sua produtividade está intrinsecamente ligada à disponibilidade de água durante todo o seu ciclo de cultivo, mesmo breves períodos de déficit hídrico podem desencadear severas consequências agronômicas. A escassez hídrica na soja provoca redução de área foliar, fechamento estomático e senescência prematura, resultando em declínio na produção de biomassa e na formação de grãos. Outra problemática é a variabilidade climática e os eventos extremos, cada vez mais frequentes em regiões de agricultura intensiva, intensificando a magnitude desses prejuízos (NGUMBI & KLOEPPER, 2016; ZIRAK-QOTURBULAGH et al., 2025).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

Além dos impactos produtivos, o déficit hídrico desencadeia uma série de respostas fisiológicas adversas. A restrição de água induz acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROS), dano de membranas celulares (evidenciado pelo aumento de malondialdeído) e desequilíbrios hormonais (como o etileno), que comprometem a fotossíntese, o transporte de fotoassimilados e a fixação biológica de nitrogênio via nódulos. Esse estresse também reduz a atividade dos nódulos simbióticos e limita a exploração radicular, prejudicando a absorção de água e nutrientes e diminuindo a eficiência de uso da água pela planta (CHIEB & GACHOMO, 2023).

Os impactos da seca em ambientes agrícolas, especialmente em solos compactados ou com baixa matéria orgânica pode afetar negativamente a microbiota se não houver estratégia de manejo adequada, prejudicando os processos de ciclagem de nutrientes e a estrutura do solo (NGUMBI & KLOEPPER, 2016; CHIEB & GACHOMO, 2023).

Diante dessas problemáticas, os microrganismos promotores de crescimento vegetal, em especial bactérias rizosféricas e fungos micorrízicos arbusculares atuam como sendo uma estratégia biológica sustentável e eficiente para mitigar o estresse hídrico na soja, através de diversos mecanismos de ação como a produção de fito hormônios para estimular o crescimento radicular; síntese de ACC-desaminase para reduzir os níveis de etileno associados ao estresse; formação de exopolissacarídeos para aumentar a retenção de água na rizosfera; e indução de sistemas antioxidantes que protegem contra o dano oxidativo (NGUMBI & KLOEPPER, 2016).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), como as espécies *Rhizophagus irregularis* e *Rhizophagus clarus* têm demonstrado efeitos benéficos diretos sobre o estado hídrico das plantas, promovendo a colonização nas raízes da soja e melhorando a fotossíntese, a integridade de membranas e a atividade antioxidante sob estresse por seca (SOLIMAN et al., 2023). Já a inoculação com *R. clarus* em cultivares de soja além de melhor taxas de fotossíntese, eficiência no uso da água atuou na dissipação térmica durante a seca (OLIVEIRA et al., 2022). Além disso, os FMA podem regular a expressão de genes de biossíntese de poliaminas por moléculas ligadas à tolerância ao estresse, como foi observado em soja submetida a regimes de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

irrigação reduzida (25% a 50% da capacidade de campo) (SOLIMAN, ABDELHAMEED & METWALLY, 2025).

Diversos estudos mostram que os consórcios microbianos que combinam fungos e bactérias também têm mostrado grande potencial. Por exemplo, a coinoculação de *Bradyrhizobium japonicum* com FMA aumentou a biomassa, a clorofila foliar, a atividade enzimática (desidrogenase e fosfatase) no solo e o rendimento de grãos em soja sob estresse de seca, comparado a plantas não inoculadas (SHETEIWY, 2021).

Quanto às espécies de microrganismos mais utilizadas como promotoras de crescimento com ação de redução de estresse hídrico e aumentar a resistência a adversidades climáticas, destacam-se: bactérias como *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis* ou *B. velezensis*, *Pseudomonas* spp. e *Enterobacter* spp.; fixadores simbióticos como *Bradyrhizobium japonicum* em co-inoculação; e fungos micorrízicos arbusculares como *Rhizophagus irregularis*, *Rhizophagus clarus* e *Funneliformis mosseae*. Também há uso de endófitos e fungos bio controladores como Trichoderma spp., por seus efeitos em modulação hormonal e resistência ao estresse.

Devido aos riscos da variabilidade climática sobre os sistemas de produção agrícola busca-se estratégias de minimizar os impactos negativos do déficit hídrico na cultura da soja. Assim, este trabalho tem como objetivo de fazer uma pesquisa bibliométrica sobre o uso dos microrganismos promotores de crescimento como bactérias, fungos e as micorrizas na redução de estresse hídrico na cultura da soja.

2 Material e métodos

A análise bibliométrica foi realizada na coleção “Scopus”, considerando estudos publicados entre 2015 à 2025. Visando uma abordagem global do tema, os termos utilizados foram microorganism" AND "water-deficit" AND "soybean" OR "Trichoderma" OR "Bacillus" OR "mycorrhiza", foram selecionados 65 documentos encontrados últimos 10 anos. Todos os termos foram pesquisados pelo campo tópico, que inclui uma busca em título, resumo e palavras-chaves.

Os agrupamentos (“clusters”) e os gráficos foram elaborados utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado da Scopus. Foram selecionadas 5 figuras as

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

quais demonstram a quantidade de artigos publicados durante os últimos dez anos, período de maior concentração (figura 1), quais área de pesquisa predominaram as publicações (figura 2), os países que mais contribuíram entre estes artigos selecionados (figura 3), os autores (figura 4) e as entidades de pesquisa (figura 5).

Observa-se na figura abaixo a distribuição destes artigos durante os 10 anos de seleção (figura 1) com aumento das publicações até 2020, posteriormente houve uma redução de publicação com o tema selecionado.

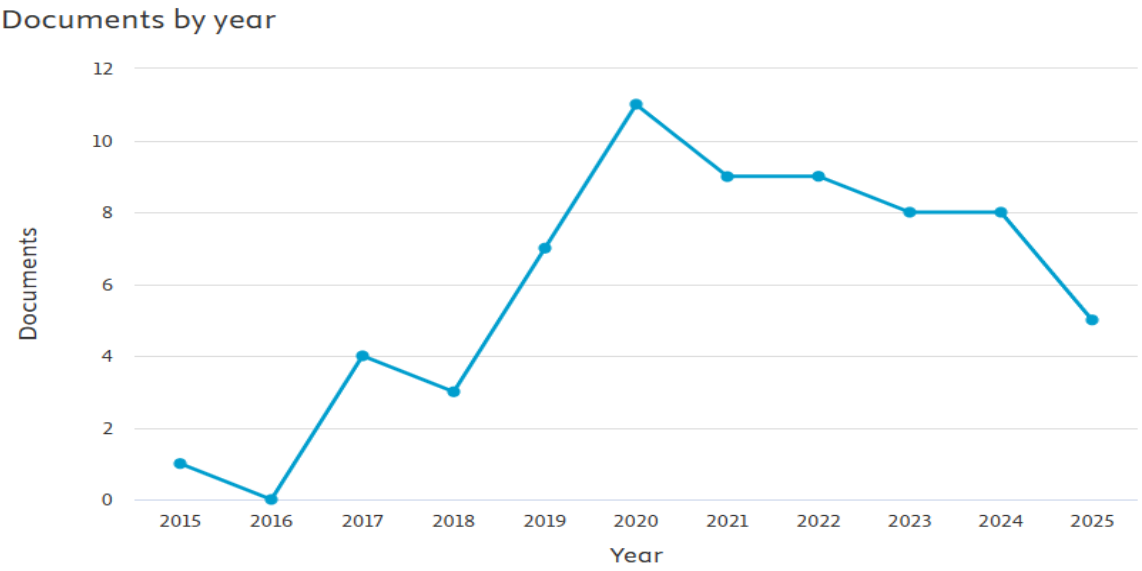

Figura 1 – Publicação de artigos selecionados durante os últimos 10 anos.
Fonte: Scopus, 2025.

Entre as áreas de pesquisa, observa-se na figura 2 que a Agricultura representou uma maior quantidade de pesquisas e publicações nos últimos 10 anos, com 45,6% dentre os 65 artigos selecionados.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

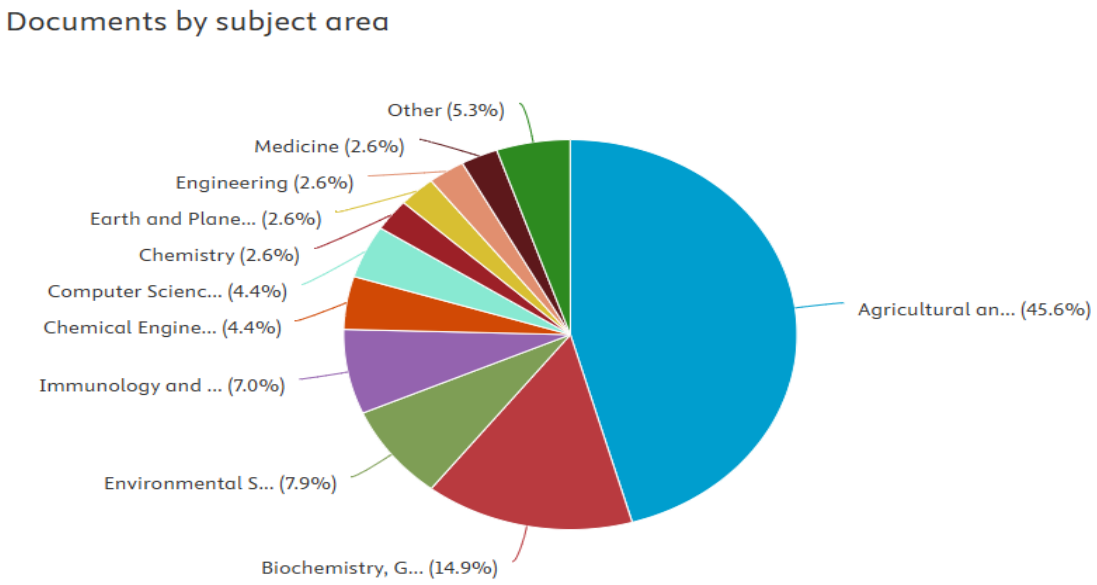

Figura 2 – Distribuição das áreas de publicação dos artigos selecionados.
Fonte: Scopus, 2025.

Esta informação demonstra a importância que este setor está dando para as pesquisas com uso de microrganismos na redução de estresse hídrico na cultura da soja. Outra área que possui grande representatividade é a biotecnologia, com 14,8% das publicações, mostrando conexão entre as áreas biológicas e produtivas. Nas áreas ambiental e imunológica com 7,9% e 7% respectivamente, já as demais áreas possuem menor representatividade (figura 2).

Entre os países (figura 3), o Irã possui maior concentração de artigos selecionados, com 20 artigos, em segundo lugar o Brasil com 16 artigos, seguido pela Índia com 8 artigos, sendo os 3 países que mais publicaram artigos nas palavras pesquisadas. Fato interessante é que são países bem diversos em características ambientais, mas todos possuem o interesse em utilizar biotecnologias para aumentar a eficiência agrícola e reduzir o estresse hídrico na cultura da soja. Outro ponto interessante é que países de climas amenos e mais desenvolvidos também tiveram participação nas publicações dos artigos selecionados na busca.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

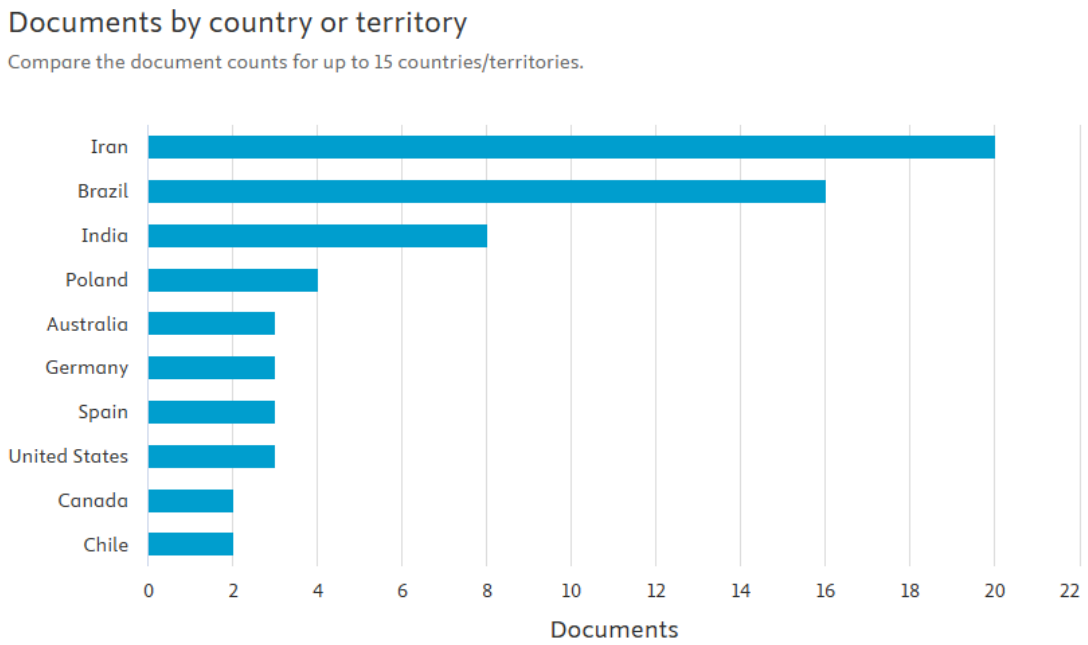

Figura 3 – Publicação de artigos selecionados entre os diferentes territórios. Fonte: Scopus, 2025.

Entre os autores, (figura 4), percebe-se que o autor com a maior quantidade de artigos nesta área de pesquisa foram 4 trabalhos publicados, demonstrando que essa linha de pesquisa tem muitas oportunidades e necessidade de obter mais pesquisas e conhecimento sobre o tema.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

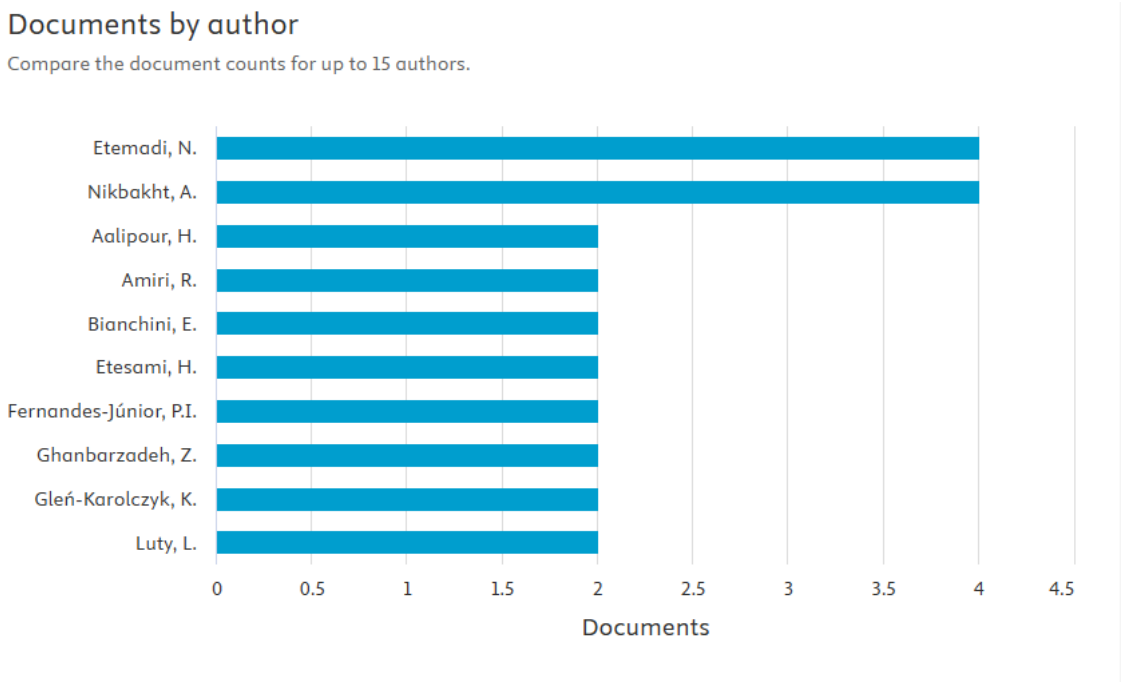

Figura 4 – Distribuição dos artigos selecionados entre os principais autores. Fonte: Scopus, 2025.

Já entre as afiliações e universidades de pesquisas, figura 5, destaca-se a EMBRAPA, empresa brasileira de pesquisa agropecuária, com 5,5 dos artigos publicados no tema pesquisado.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

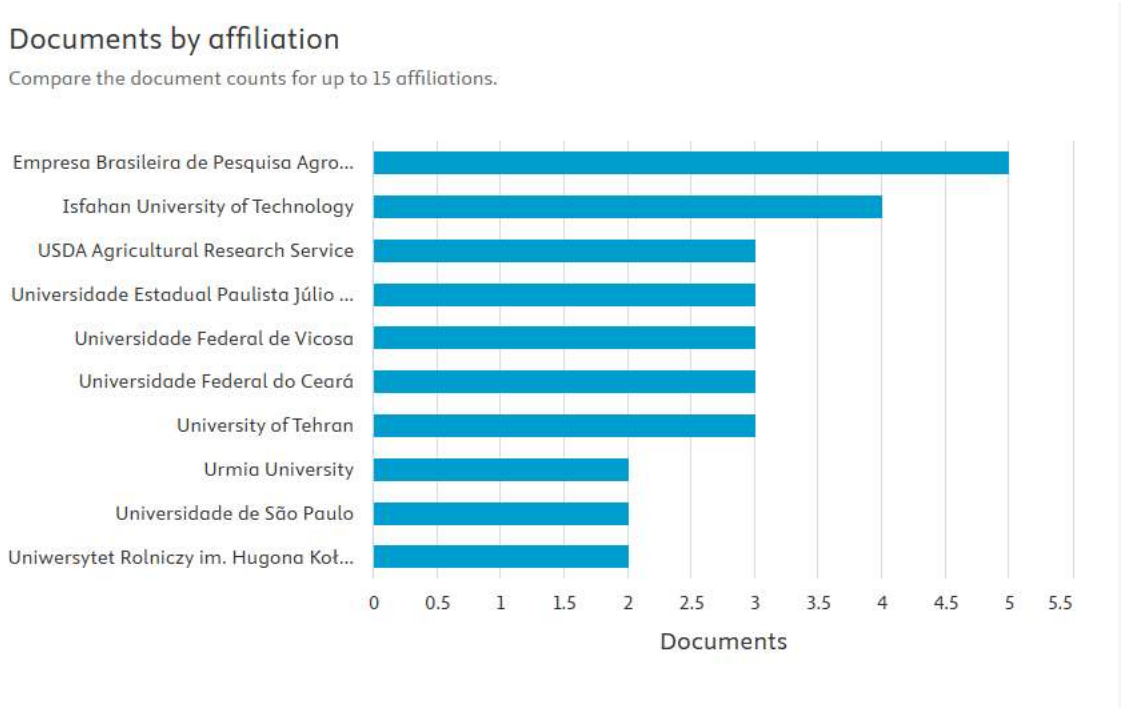

Figura 5 – Publicação de artigos selecionados entre as filiações de pesquisa. Fonte: Scopus, 2025.

Resultado interessante pela relevância que o Brasil está dando nesta área, comparando aos demais países, colocando a Embrapa que é uma empresa pública de pesquisa científica em destaque mundial sobre o tema da pesquisa em questão, que é sobre o uso de microrganismos na redução de estresse hídrico na soja.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Prejuízos do estresse hídrico na cultura da soja

A soja (*Glycine max* L.) é uma das culturas agrícolas mais importantes do mundo, destacando-se pelo elevado valor econômico e pela ampla aplicação de seus grãos na produção de óleo, ração e bioprodutos. Trata-se de uma espécie considerada sensível ao déficit hídrico, sobretudo devido à elevada demanda de água durante seu ciclo reprodutivo. Estudos indicam que a cultura necessita, ao longo do ciclo, entre 450 e 800 mm de água bem distribuídos, variando conforme ciclo da cultivar, condições edafoclimáticas e manejo adotado (MELO et al., 2022). A irregularidade das chuvas e o aumento da frequência de veranicos em regiões produtoras intensificam

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

riscos produtivos e tornam a limitação hídrica um dos principais fatores de redução de rendimento.

Durante a fase inicial de crescimento (estádios VE a V2), a soja apresenta moderada sensibilidade ao déficit hídrico. A falta de água reduz a emergência, compromete o vigor inicial e diminui a taxa de expansão foliar, o que prejudica o estabelecimento do estande e limita o potencial de interceptação luminosa nas fases seguintes. Períodos de seca no estabelecimento podem reduzir a população final de plantas e diminuir o acúmulo inicial de biomassa, comprometendo o desenvolvimento radicular e a capacidade futura da cultura de explorar água em camadas mais profundas do solo (BATTISTI et al., 2018).

Entre os estádios vegetativos avançados (V3 a V6), embora a planta ainda apresente algum nível de resiliência, o déficit hídrico pode reduzir significativamente a área foliar, a taxa fotossintética e a elongação de hastes. Reduções de até 40% no crescimento vegetativo foram registradas sob estresse hídrico moderado, ocasionando menor produção de fotoassimilados e comprometendo a formação de ramos produtivos (ZHANG et al., 2020). A limitação de água também afeta a formação de nódulos e o acúmulo de nitrogênio, o que repercute diretamente na capacidade de sustentação da fase reprodutiva.

A fase reprodutiva é reconhecida como a mais crítica para a cultura da soja em relação ao déficit hídrico. No florescimento (R1–R2), a escassez de água pode causar redução na abertura floral, menor emissão de novas flores e aumento expressivo no abortamento, reduzindo o número potencial de vagens por planta. Com déficits hídricos de curta duração nesse período podem reduzir o número final de vagens em mais de 30%, especialmente sob temperaturas elevadas. Já no enchimento de grãos (R3–R6), o estresse hídrico altera o transporte de fotoassimilados, reduz massa de grãos e compromete o índice de colheita, sendo considerado o período de maior impacto produtivo (SOUZA et al., 2021).

Sob condições de déficit hídrico severo no final do ciclo (R5.5–R7), observa-se redução drástica no peso de mil grãos, encurtamento do período de enchimento e aumento da maturação precoce. Silva et al. (2020) destacam que a redução da água nessa fase pode resultar em perdas superiores a 50% no rendimento, dependendo da intensidade e duração do estresse, pois afeta diretamente o acúmulo de matéria seca

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

no grão. Além disso, a senescência acelerada e a antecipação da maturação fisiológica diminuem o conteúdo de óleo e afetam parâmetros de qualidade industrial.

A cultura da soja aumenta o consumo e necessidade hídrica conforme seu desenvolvimento, o pico da necessidade conforme a evapotranspiração por dia é nos estádios reprodutivos, de R1 à R5, desta forma estresses durante todo o estádio R5 e início do R6 diminuem o rendimento e a produtividade. A disponibilidade de água juntamente com os nutrientes é de suma importância para o enchimento de grãos, outro fator relevante é a FBN (fixação biológica de nitrogênio). Para que ocorra a absorção de nutrientes do solo pelas raízes e a FBN, o solo necessita estar úmido. A necessidade de água pela soja, nesta fase, é de 6 a 8 mm (NEUMAIER, et al., 2020).

Assim, ao longo de todo o ciclo, a soja apresenta diferentes graus de sensibilidade ao déficit hídrico, com impactos acumulativos que variam conforme o estádio fenológico, intensidade do estresse, tipo de solo e condições térmicas. A compreensão detalhada desses efeitos é essencial para o planejamento agrícola, definição de épocas de semeadura, escolha de cultivares e implementação de estratégias de manejo voltadas à redução do risco climático, especialmente em regiões sujeitas à alta variabilidade de precipitação.

3.2 O uso de bactérias promotoras de crescimento para redução do estresse hídrico

O estresse hídrico é um dos principais fatores abióticos limitantes para a cultura da soja, provocando reduções expressivas em crescimento, fotossíntese e produtividade. Estudos recentes ressaltam que a seca compromete fortemente o potencial produtivo da cultura, causando perdas desde as fases vegetativas até o enchimento de grãos (MARINKOVIĆ et al., 2024). O déficit hídrico também interfere diretamente na eficiência das trocas gasosas e na manutenção da turgescência foliar, resultando em redução na taxa fotossintética e maior abortamento de flores e vagens. Ensaios mostram que a inoculação com *Azospirillum brasilense* pode amenizar esses efeitos, promovendo melhor controle estomático e desempenho fisiológico sob estresse moderado, reduzindo assim perdas produtivas (BULEGON et al., 2019).

A utilização de rizobactérias promotoras de crescimento tem se destacado como estratégia complementar de manejo frente à seca. A coinoculação de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

Bradyrhizobium spp. e Azospirillum spp. aumenta significativamente massa radicular, nodulação e rendimento de grãos, demonstrando potencial para mitigar impactos do déficit hídrico e fortalecer a resiliência fisiológica da soja (BARBOSA et al., 2021). Apesar dos avanços, a eficiência das inoculações depende de fatores como intensidade do estresse, condições edafoclimáticas e compatibilidade entre microrganismos e genótipos de soja. Pesquisas mostram que co inoculações podem reduzir danos celulares e melhorar a recuperação pós-estresse, mas os efeitos variam conforme ambiente e severidade do déficit hídrico, reforçando a necessidade de estudos regionais e de seleção de cepas mais tolerantes (SILVA et al., 2019).

O uso de bactérias fixadoras de nitrogênio é de suma importância para altos tetos produtivos, além das espécies de Bradyrizobium spp. e Azospirillum spp. Existe outra bactéria muito promissora no mercado a *Methylobacterium symbioticum,* em experimento com *M. symbioticum* ela sobressaiu sobre as demais bactérias, possuindo grande potencial como agente promotor de crescimento na cultura da soja (ARRUDA et al., 2025). Podendo ser utilizada para redução de estresse hídrico.

A coinoculação reduziu significativamente os efeitos do estresse hídrico nas trocas gasosas, no crescimento da planta e na produtividade, em comparação com a inoculação única. Combinações notáveis, como BRM 063574 + BRM 67205 + BRM 034008 e BRM 063574 + BRM 063573 + ESA 441, melhoraram o crescimento da raiz e da parte aérea sob condições de estresse. ALDRIGHI, et al., 2025

Além das rizobactérias tradicionais, microrganismos endofíticos têm sido identificados como aliados importantes na tolerância ao estresse hídrico. Bactérias dos gêneros *Bacillus* e *Pseudomonas* apresentam mecanismos como produção de AIA, ACC-desaminase, solubilização de fósforo e síntese de compostos osmo protetores, contribuindo para maior integridade de membranas e melhor desempenho de plantas sob seca (DUBEY et al., 2021).

Testes em estufa demonstraram que bactérias como *L. amnigena*, *L. adecarboxylata* aliviaram efetivamente os efeitos adversos da seca e do estresse térmico concomitantes no milho. Onde a tolerância induzida por bactéricas promotoras de crescimento pode envolver a modulação dos genes de resposta ao estresse *CAT2* (catalase 2) e *DHN2* (desidratina 2), que desempenham papéis no gerenciamento do estresse oxidativo e na proteção celular. Estes isolados

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

identificados representam bio inoculantes promissores para aumentar a resiliência do milho sob estresses induzidos pelo clima, oferecendo uma abordagem sustentável para melhorar a produtividade do milho, conservar água e reduzir as necessidades de irrigação em regiões propensas à seca (NOTUNUNU et al., 2024)

As mudanças climáticas agravam o estresse causado pela seca, representando desafios para o rendimento global dos grãos de soja. Inoculantes microbianos derivados de duas *cepas de Bacillus velezensis* (cepas 5D5, 6E9) e uma *de Bacillus subtilis* (cepa 1A11), foram selecionadas por promover o crescimento e aumentar a resiliência à seca na soja, ensaios de campo revelaram melhorias no rendimento de 11,3 a 18% para tratamentos inoculados, com *B. subtilis* 1A11 alcançando o maior rendimento de grãos de 620 Kg ha^{-1} em relação ao controle (VASCONCELOS et al., 2025).

3.4 O uso de fungos para redução do estresse hídrico

Trichoderma é um gênero de fungos com grande excelência no solo agrícola, sendo reconhecido por sua capacidade de colonização da rizosfera e por promover crescimento vegetal e resistência a estresses ambientais. Esses fungos são particularmente interessantes porque podem modular a fisiologia da planta por meio da produção de metabólitos, hormônios e ativação de vias de defesa, conferindo à planta uma plasticidade adaptativa diante de condições desfavoráveis.

O Trichoderma pode induzir alterações anatômicas nas plantas que favorecem a adaptação ao estresse. Oliveira et al. (2020) observaram, em soja, que a inoculação com isolados e aumentou o índice estomático abaxial, a espessura do córtex de raiz, a espessura da epiderme adaxial e o diâmetro do cilindro vascular, entre outras modificações. Essas modificações podem fornecer uma estrutura de tecido mais resistente ou mais eficiente para o transporte de água, contribuindo para a tolerância a condições deficitárias de água. Trichoderma spp. podem aumentar a tolerância das plantas à seca por meio de efeitos sobre o sistema radicular, modulação hormonal e incremento da capacidade antioxidante das plantas. Protege culturas diversas do estresse hídrico e que aplicações em sementes ou solo melhoram vigor de plântulas e parâmetros fisiológicos sob seca (AKBARI et al., 2024).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

Júnior et al. (2022) verificaram ganhos de produtividade em soja usando *Trichoderma asperellum* (“TrichoPlus”) em lavouras no Cerrado, com aumento de biomassa acima de 19 % e produtividade estimada 8,1 % maior em relação ao controle. Esses dados reforçam que, mesmo diante da variabilidade o fungo tem potencial significativo como ferramenta de manejo para reduzir os impactos do déficit hídrico na cultura da soja.

Em termos fisiológicos, *Trichoderma harzianum* também pode induzir respostas antioxidantes na planta, reduzindo os danos por espécies reativas de oxigênio (EROS) sob estresse. Pois ativa enzimas como superóxido dismutase e peroxidases, melhora a regulação osmótica e estimula a síntese de osmólitos, o que favorece a manutenção do crescimento sob estresse (AFROUZ et al., 2023; CHEPSERGON & MWAMBURI, 2024).

Um dos mecanismos mais documentados de *Trichoderma* na mitigação do estresse hídrico é a modulação do crescimento radicular: Battaglia, Martínez, Covacevich e Consolo (2024) demonstraram que inoculação de sementes de soja com cepas de *Trichoderma harzianum* (IB-J15 e IB-363) levou a um aumento expressivo na biomassa de raiz sob déficit hídrico, com até 330% de incremento em peso seco de raiz, além de maior área radicular lateral. Essas mudanças estruturais sugerem que o fungo pode ajudar a planta a explorar mais volume de solo para captar água sob seca. E *Trichoderma asperellum* em soja tem mostrado potencial para aumentar biomassa vegetal, manutenção de estande e produtividade em campo (JÚNIOR et al., 2022).

Outra espécie de fungo que pode atuar de forma benéfica sobre a resistência da soja à estresse hídrico é a *P. chlamydosporia*. Em condições de déficit hídrico da cultura da soja quando inoculadas com Pochonia apresentaram maior resistência para atingir o mesmo potencial hídrico das plantas não inoculadas. A colonização fúngica melhorou a eficiência do uso da água (A/E). O teor relativo de água (TRA) aumentou de 15% para 26% nas folhas e raízes das plantas inoculadas de ambos os genótipos sob déficit hídrico. O aumento na tolerância à seca pode estar relacionado à indução do crescimento radicular nas plantas inoculadas, embora esse aumento não tenha sido associado à condutividade hidráulica (RODRIGUES et al., 2024).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

Já os fungos endófitos (géneros como *Piriformospora* e *Serendipita*, *Clonostachys*, determinados *Fusarium* não patogénicos) mostram-se promissores para mitigação de estresse hídrico: aumentam a produção de osmólitos, elevam a atividade de sistemas antioxidantes e reduzem os níveis de etileno por atividade de ACC-desaminase, o que preserva crescimento radicular e atrasam a senescência sob déficit. Revisões e artigos de síntese destacam que esses mecanismos bioquímicos e hormonais explicam ganhos de biomassa e sobrevivência em condições de seca (MORALES-VARGAS et al., 2024; NOMBAMBA, 2024).

3.4.1 Fungos Micorrízicos arbusculares na redução de estresse hídrico na soja

Os fungos micorrízicos arbusculares (AMF) têm sido repetidamente apontados como promotores da tolerância à seca por aumentarem a capacidade de absorção de água e de nutrientes, estendendo a exploração do solo por meio de redes de hifas e melhorando a eficiência do uso da água e a condutância hidráulica radicular. Em soja, inoculações com *Rhizophagus clarus* demonstraram manutenção do estado hídrico, melhor desempenho fotossintético e maior resistência ao dano fotossintético sob déficit, indicando que FMA podem atenuar perdas fisiológicas importantes durante o estresse. (OLIVEIRA et al., 2022).

No trabalho de Vitale et al. (2025) com a cultura do algodão com uso de FMA com duas cultivares e três lâminas de água, onde os FMA aumentaram significativamente a altura da planta (68,52 cm vs. 65,85 cm), o número de bolos (+22,1%) e a produção das sementes (+12,5%), em especial a cultivar Armonia teve melhor desempenho sob estresse hídrico. O local também influenciou, pois com mais matéria orgânica, exigia 31–38% menos água e alcançou uma produtividade superior da água para irrigação (1,43 kg m^{-3}). O estresse hídrico também encurtou os estágios fenológicos, permitindo colheitas mais cedo. Esses resultados destacam o potencial de combinar irrigação adaptativa, cultivares resilientes e AMF para restaurar a produção sustentável de algodão no Mediterrâneo, enfatizando a importância do manejo específico do solo.

Ensaios combinando FMA com outras práticas (ex.: biochar, manejo de fertilidade) e Co aplicações com outros inoculantes relatam efeitos sinérgicos na manutenção da produtividade sob seca: por exemplo, estratégias que unem melhoria

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

do solo e inoculação fúngica aumentaram rendimento e estabilidade em condições de déficit, sugerindo que o contexto edáfico e a prática de manejo influenciam fortemente o sucesso das aplicações (NADER et al., 2024).

A associação entre soja e fungos micorrízicos arbusculares (AMF) tem sido consistentemente apontada como uma estratégia promissora para aumentar a tolerância da planta a períodos de déficit hídrico. Estudos experimentais mostram que a inoculação com espécies como *Rhizophagus clarus* e *R. irregularis* melhora indicadores fisiológicos (conteúdo relativo de água foliar, condutância estomática, taxa fotossintética) e reduz danos associados ao estresse por seca, traduzindo-se em melhor manutenção do vigor da planta durante veranicos. Esses efeitos foram demonstrados tanto em condições de casa de vegetação quanto em experimentos de campo, sugerindo relevância prática para sistemas de produção de soja (OLIVEIRA et al., 2022; BEGUM et al., 2023).

Os FMA contribuem para a tolerância à seca por múltiplas vias interligadas: (i) aumento da exploração do volume de solo por meio da rede extra radicular de hifas, permitindo acesso a micro capilares de água não alcançáveis pelas raízes; (ii) melhoria na aquisição de nutrientes que suporta maior atividade fotossintética e resiliência; (iii) modulação da relação osmótica e aumento da atividade de sistemas antioxidantes na planta; e (iv) efeitos sobre regulação hormonal que contribuem para a manutenção do balanço água-perda. Revisões e estudos experimentais descrevem essas vias como as mais replicadas na literatura (YANG et al., 2025; YAN et al., 2022).

Em soja especificamente, vários trabalhos dos últimos dez anos relataram resultados promissores: Lotfabadi et al. (2022) observaram que inoculação por FMA melhorou o status nutricional e o perfil de ácidos graxos de cultivares de soja sob déficit hídrico, enquanto Sheteiwy et al. (2021) mostraram efeitos benéficos sobre parâmetros fisiológicos quando FMA foi combinado com biofertilizantes como *Bradyrhizobium japonicum*.

Apesar dos resultados promissores, a literatura também destaca limitações e caminhos para pesquisa aplicada: (1) grande parte dos estudos em casa de vegetação precisa ser validada em ensaios multissítio e por safras para avaliar estabilidade; (2) há necessidade de selecionar cepas locais adaptadas às condições edafoclimáticas e de desenvolver formulações comerciais com sobrevivência e viabilidade; (3) investir

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

na compreensão molecular das respostas (marcadores de eficácia) e no efeito a longo prazo sobre a microbiota do solo; e (4) estudar a interação entre FMA e práticas agronômicas (adubação, plantio direto, irrigação suplementar) para integrar recomendações técnicas à realidade do agricultor. A pesquisa coordenada entre fisiologia, microbiologia e ensaios de campo é o caminho para transformar resultados promissores em tecnologia confiável para produtores de soja (BOUTASKNIT et al., 2021; NADER et al., 2024).

4 CONCLUSÃO

Os microrganismos promotores de crescimento possuem potencial promissor e eficaz para enfrentar os desafios impostos pelo déficit hídrico na cultura da soja. Ao promover resiliência por meio de múltiplos mecanismos fisiológicos, bioquímicos e moleculares, aumentando a eficiência de uso da água, melhorando a produtividade e contribuindo para sistemas agrícolas mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRUDA, H. C. ET AL. Avaliação de fatores produtivos de cultivares de soja com uso de fixadores biológicos de nitrogênio. **Remunom,** v. 20. 02. 2025. DOI: https://doi.org/10.61164/p4zh8d17

AFROUZ, M. et al. Seed bio-priming with beneficial *Trichoderma harzianum* improves drought tolerance in tomato. **PeerJ,** v. 11, art. 15644, 2023. DOI: https://doi.org/10.7717/peerj.15644 .

AKBARI, S. I. et al. Bioprospecting the roles of Trichoderma in alleviating plants' drought tolerance: Principles, mechanisms of action, and prospects. 2024. **Microbiological Research**. DOI: https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127665

BARBOSA, J. Z. et al. Meta-analysis reveals benefits of co-inoculation of soybean with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* spp. in Brazil. **Applied Soil Ecology,** v. 163, art. 103913, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103913.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

BATTISTI, R. et al. Soybean yield response to water deficit during vegetative and reproductive stages. **Agricultural Water Management,** v. 204, p. 16–25, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.029

BATTAGLIA, M. E.; MARTÍNEZ, S. I.; COVACEVICH, F.; CONSOLO, V. F. *Trichoderma harzianum* enhances root biomass production and promotes lateral root growth of soybean and common bean under drought stress. **Annals of Applied Biology,** v. 185, p. 36–48, 2024. DOI: https://doi.org/10.1111/aab.12909 .

BULEGON, L. G. et al. Mitigation of drought stress effects on soybean gas exchanges induced by *Azospirillum brasilense* and plant regulators. **Pesquisa Agropecuária Tropical,** v. 49, e52807, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/1983-40632019v4952807.

BEGUM, N.; et al. Arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* alleviates drought stress in soybean with overexpressing the *GmSPL9d* gene by promoting photosynthetic apparatus and regulating the antioxidant system. **Microbiological Research, v. 273,** 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127398

NEUMAIER, N**. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja.** In: BONATO, E, R. Estresses em soja. Passo fundo, 2000. https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/820371/1/Estressesemsoja.pdf Acesso em: 04 dezembro de 2025.

BOUTASKNIT, A. et al. Assemblage of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and green waste compost enhance drought stress tolerance in carob *(Ceratonia siliqua* L.) trees. **Scientific Reports** 2021. 11(1):22835. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-02018-3

CHIEB, M.; GACHOMO, E. W. The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. **BMC Plant Biology,** v. 23, p. 407, 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s12870-023-04403-8 .

DUBEY, A. et al. Bacterial root endophytes: characterization of their competence and plant growth promotion in soybean under drought stress. **International Journal of Environmental Research and Public Health,** v. 18, art. 931, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph18030931.

JÚNIOR, A. F. C. et al. Efficiency of TrichoPlus (*Trichoderma asperellum*) as a plant growth promoter in soybean in field conditions in the Cerrado. **Research, Society and Development (RSD),** v. 11, n. 5, e16111527970, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.27970 .

JABBOROVA, D.; et al. Co-inoculation of biochar and arbuscular mycorrhizae for improvement of soybean growth and soil enzyme activities under drought**. Frontiers in Plant Science,** 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.947547 .

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

LOTFABADI, Z. E. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi species improve the fatty acids profile and nutrients status of soybean cultivars grown under drought stress. **Journal of Applied Microbiology,** v. 132, n. 3, p. 2177–2188, 2022. DOI: https://doi.org/10.1111/jam.15326 .

MARINKOVIĆ, J. et al. Perspectives of *Bradyrhizobium* and *Bacillus* inoculation for improvement of soybean tolerance to water deficit. **Agronomy,** v. 14, n. 11, art. 2692, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14112692.

MELO, C. L. P. et al. Water requirements and critical periods of soybean under different climatic conditions. **Field Crops Research,** v. 287, 108668, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108668

NADER, A. A. et al. Drought-tolerant bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi improve soybean tolerance to drought: synthesis and experimental results. **Microorganisms,** 2024. v. 12, n. 6, art. 1123, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms12061123 .

NGUMBI, E.; KLOEPPER, J. Bacterial-mediated drought tolerance: current and future prospects. **Applied Soil Ecology,** v. 105, p. 109–125, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.04.009 .

NOMBAMBA, A. Exploring the role of endophytic fungi in the amelioration of drought stress. **Plant Protection Science,** 60, 2024 (3): 213–228. DOI: https://doi.org/10.17221/25/2024-PPS

NOTUNUNU, I. et al. Enhancing maize drought and heat tolerance: single vs combined plant growth promoting rhizobacterial inoculation. **Front. Plant Sci**., 09 December 2024. Sec. Plant Symbiotic Interactions**,** volume 15 – 2024. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1480718

OLIVEIRA, T. C. et al. The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus* improves physiological tolerance to drought stress in soybean plants**. Pubmed** 31;12(1):9044. 2022. https://doi.org/10.1038/s41598-022-13059-7

OLIVEIRA, C. M.; ALMEIDA, N. O.; ROCHA, M. R.; REZENDE, M. H.; CARNEIRO, R. G. d. S.; ULHOA, C. J. Anatomical changes induced by isolates of *Trichoderma* spp. in soybean plants. **PLoS ONE,** v. 15, n. 11, e0242480, 2020. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242480 .

ORALES-VARGAS, A. T. et al. Endophytic fungi for crops adaptation to abiotic stresses. **Microorganisms**, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms12071357

PORTO, D. L. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and water stress on the physiology and quality of Parkia platycephalic benth. **Cerne**, v. 30. 2024 https://doi.org/1590/01047760202330013402

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

RIGOBELO, E. C. et al. Growth promotion and modulation of the soybean metabolic profile by *Trichoderma harzianum*. **Scientific Reports**, v. 14, 71565, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-71565-2 .

RODRIGUES, J. M. et al. The nematophagous root endophyte *Pochonia chlamydosporia* enhances tolerance to drought in soybean. Springer Nature, 09 July 2024, Volume 36, pages 727–746. DOI: https://doi.org/10.1007/s40626-024-00341-4

SILVA, A. F. et al. Grain filling, yield components and productivity of soybean under water restriction at reproductive stages. **Agricultural Water Management**, v. 239, 106263, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106263

SILVA, E. R. et al. Can co-inoculation of *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* alleviate adverse effects of drought stress on soybean? **Archives of Microbiology,** v. 201, p. 325–335, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s00203-018-01617-5.

SHETEIWY, M. S. et al. Physiological and biochemical responses of soybean plants inoculated with Arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium japonicum* under drought stress. **BMC Plant Biology**, v. 21, art. 195, 2021. DOI: https://doi.org/10.1186/s12870-021-02949-z

SOLIMAN, E. R. S.; ABDELHAMEED, R. E.; METWALLY, R. A. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in drought-resilient soybeans (*Glycine max* L.): unraveling the morphological, physio-biochemical traits, and expression of polyamine biosynthesis genes. **Botanical Studies,** v. 66, art. 9, 2025. DOI: https://doi.org/10.1186/s40529-025-00455-1 .

SOUZA, R. P. et al. Drought during flowering affects soybean yield through flower abortion and pod formation. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 5, p. 798–808, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/jac.12511

VASCONCELOS, J. C. S. et al. *Bacillus*-based inoculants enhance drought resilience in soybean: agronomic performance and remote sensing analysis from multi-location trials in Brazil. **Front. Plant Sci**., 22 July 2025, volume 16 – 2025. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1630127

VITALE, G. S. et al. Sustainable cotton production in sicily: yield optimization through varietal selection, mycorrhizae, and efficient water management. **Agronomy,** 2025, *15*(8), 1892; https://doi.org/10.3390/agronomy15081892

ZHANG, Z. et al. Physiological responses and growth reduction in soybean under drought stress: a controlled-environment study. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 150, p. 147–155, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.039

ZIRAK-QOTURBULAGH, M. A.; MEHRI, S.; SOLEIMANZADEH, H.; ANSARI, M. H. Co-Inoculation of *Bradyrhizobium* and Arbuscular Mycorrhizal Fungus Alleviates the

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 04/12/2025 - **Accepted:** 04/12/2025
Vol: 21.01
DOI: 10.61164/pdkg3g34
Pages: 1-21

Effects of Drought Stress in Soybean (*Glycine max* L.). **Turkish Journal of Field Crops,** v. 30, n. 1, p. 235–248, 2025. DOI: https://doi.org/10.17557/tjfc.1519684 .