

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO TRIÂNGULO MINEIRO – CAMPUS UBERABA
MESTRADO PROFISSIONAL EM PRODUÇÃO VEGETAL**

ARTUR ARAUJO PELEGRINI

EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO EM FASE INICIAL NA CULTURA DO FEIJÃO

**UBERABA -MG
2025**

ARTUR ARAUJO PELEGRINI

EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO EM FASE INICIAL NA CULTURA DO FEIJÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mestrado Profissional Em Produção Vegetal, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Márcio José de Santana

**UBERABA - MG
2025**

Ficha Catalográfica elaborada pelo Setor de Referência do IFTM –
Campus Uberaba-MG

P361e Pelegrini, Artur Araujo
Efeito do estresse hídrico em fase inicial na cultura do feijão /
Artur Araujo Pelegrini – 2025.
53 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Márcio José de Santana.
Dissertação (Mestrado Profissional em Produção Vegetal) -
Instituto Federal do Triângulo Mineiro- *Campus Uberaba-MG*,
2025.

1. Graus-dias. 2. Soma térmica. 3. Estádios reprodutivos.
4. Déficit hídrico. I. Santana, Márcio José de. II. Título.

CDD 635.652

ARTUR ARAÚJO PELEGRINI

“EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO EM FASE INICIAL NA CULTURA DO FEIJÃO”

FOLHA DE APROVAÇÃO DEFESA DISSERTAÇÃO

Data da aprovação: 30/04/2025

MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA:

Presidente

Prof. Dr. Márcio José de Santana

IFTM Campus Uberaba

Membro Titular

Prof. Dr. Daniel Rufino Amaral

IFTM Campus Uberaba

Membro Titular

Dra. Amanda Letícia da Silveira

EMBRAPII - IFTM UBERABA

Local: Google Meet

MÁRCIO JOSÉ DE SANTANA
PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO



Documento assinado eletronicamente por MÁRCIO JOSÉ DE SANTANA, PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO, em 30/04/2025, às 17:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

DANIEL RUFINO AMARAL
PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO



Documento assinado eletronicamente por DANIEL RUFINO AMARAL, PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO, em 30/04/2025, às 17:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

AMANDA LETÍCIA DA SILVEIRA
PESQUISADORA POLO EMBRAPPII - IFTM UBERABA



Documento assinado eletronicamente por AMANDA LETÍCIA DA SILVEIRA, PESQUISADORA POLO EMBRAPPII - IFTM UBERABA, em 30/04/2025, às 18:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://iftm.edu.br/autenticacao/> informando o código verificador **AD92E96** e o código CRC **FE52AB20**.

Referência: NUP: 23200.005833/2025-72

DOCS nº 0000677651

Dedico esta dissertação, com todo o amor e respeito, à minha família, pilar fundamental em minha vida e nesta caminhada acadêmica. Em especial, dedico ao meu pai, Jairo Ferreira Pelegrini, que, mesmo partindo durante este percurso, permanece vivo em mim através de seus ensinamentos, valores e do exemplo de força e dignidade que sempre carregou. Este trabalho é também fruto do que aprendi com ele. Que esta conquista seja uma homenagem à sua memória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me sustentado com fé, coragem e saúde ao longo desta jornada.

À minha família, minha eterna gratidão pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Sem vocês, nada disso teria sido possível.

Ao meu orientador, professor Márcio José de Santana, deixo um agradecimento especial pela orientação dedicada, pela paciência e por todo o conhecimento compartilhado. Sua contribuição foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores que fizeram parte da minha formação, deixo minha sincera gratidão pela inspiração e pelos ensinamentos que levarei para a vida.

Agradeço também a toda a equipe envolvida neste trabalho, que com dedicação e comprometimento, contribuiu diretamente para a concretização deste projeto.

A todos que, de alguma forma, estiveram presentes nesta trajetória, meu muito obrigado.

RESUMO

O estresse hídrico é um fator crítico que pode influenciar tanto o desenvolvimento quanto a produtividade da planta. O estresse hídrico ocorre quando a disponibilidade de água é insuficiente para atender às necessidades da planta, resultando em efeitos negativos e positivo sobre o desenvolvimento e rendimento da cultura, dependendo da espécie e estágio de desenvolvimento. Neste contexto, este estudo teve o objetivo de avaliar os impactos agrônômicos e econômicos do estresse hídrico na cultura do feijão, destacando a importância da irrigação e da gestão eficiente da água. O estudo foi instalado e conduzido em casa de vegetação localizada no *Campus* Uberaba do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro, em Uberaba – MG. O experimento foi conduzido em blocos casualizados (DBC) com 4 tratamentos e 6 repetições, em total de 24 parcelas experimentais. Cada parcela foi composta de linhas de irrigação por gotejamento de 7 m de comprimento com 70 plantas. Os tratamentos foram três déficits hídricos de 7 dias de duração nos estádios, V2, V3 e V4, e um tratamento sem déficit hídrico (testemunha). As variáveis avaliadas foram: massa de 100 grãos, massa da planta, massa da raiz em R6, número de vagens por planta, número de grãos por planta, número de grãos por vagem, soma térmica para a cultura e produtividade. Utilizou-se o teste F para análise de variância dos tratamentos estudados e o teste de média Scott-Knott. A ferramenta utilizada para as análises foi o software Sisvar for Windows. O déficit hídrico causado, independente do estágio, não interferiu significativamente no desenvolvimento e produção do feijoeiro. A soma térmica pelo método de Arnold foi o mais preciso em relação a predição dos estádios fenológicos do feijão-comum. E ainda, o déficit hídrico causado permite que ocorra economia de água e diminuição dos custos com a irrigação, sem perda na produtividade.

Palavras – chave: graus-dias; soma térmica; estádios reprodutivos; déficit hídrico.

ABSTRACT

Water stress is a critical factor that can influence both plant development and productivity. Water stress occurs when water availability is insufficient to meet the plant's needs, resulting in both negative and positive effects on crop development and yield, depending on the species and growth stage. In this context, the objective of this study was to evaluate the agronomic and economic impacts of water stress on common bean cultivation, highlighting the importance of irrigation and efficient water management. The study was conducted in a greenhouse located at the Uberaba Campus of the Federal Institute of Education, Science and Technology of Triângulo Mineiro, in Uberaba – MG, Brazil. The experiment followed a randomized block design (RBD) with 4 treatments and 6 replications, totaling 24 experimental plots. Each plot consisted of 7-meter-long drip irrigation lines with 70 plants. The treatments included three water deficit periods of 7 days each during the V2, V3, and V4 growth stages, and one treatment without water deficit (control). The evaluated variables were: 100-grain weight, plant biomass, root mass at R6, number of pods per plant, number of grains per plant, number of grains per pod, thermal sum for the crop, and yield. The F-test was used for analysis of variance of the treatments, and the Scott-Knott test was applied for mean comparison. The software used for the analyses was Sisvar for Windows. The imposed water deficit, regardless of the growth stage, did not significantly affect the development and yield of the bean crop. The thermal sum calculated using the Arnold method proved to be the most accurate for predicting the phenological stages of common beans. Furthermore, the induced water deficit allows for water savings and reduced irrigation costs without yield loss.

Keywords: degree days; thermal sum; reproductive stages; water deficit.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 O feijão, sua classificação botânica e sua importância econômica no Brasil	12
2.2 Fatores que interferem no desenvolvimento e produtividade do feijão no Brasil	13
2.2.1 Pragas e Doenças	13
2.2.2 Cultivares	15
2.2.3 Adubação	16
2.2.4 Nível Tecnológico.....	17
2.2.5 Estresse hídrico	19
2.3 Impactos do estresse hídrico na cultura do feijão e respostas fisiológicas	20
2.3.1 Impactos do estresse hídrico nas fases iniciais do feijão e respostas fisiológicas.....	22
2.4 Soma térmica e sua importância para os cultivos	23
2.5 Déficit hídrico x viabilidade econômica da irrigação do feijão	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5 CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das leguminosas mais cultivadas e consumidas no mundo, desempenhando um papel fundamental na alimentação humana e na segurança alimentar (Souza *et al.*, 2020). Este cultivo é amplamente adaptado a diferentes condições climáticas e de solo, o que o torna uma cultura importante em regiões com variabilidade hídrica.

No Brasil, a cultura é comumente cultivada em três épocas, sendo que o ciclo mais produtivo é o realizado na safra de inverno, com uso da irrigação. A irrigação não apenas aumenta a produtividade, mas também pode melhorar a qualidade do grão, o que é essencial para atender às demandas do mercado (Almeida *et al.*, 2021).

Embora em ambiente irrigado, é comum relatos de áreas produtoras de feijão que tiveram a oferta de água restringida pela escassez de chuvas e nesse sentido a gestão da irrigação torna-se crucial em cenários de estresse hídrico. Segundo Silva *et al.* (2020), o investimento em tecnologias de irrigação pode ser um fator determinante na eficiência do uso da água, permitindo que os agricultores maximizem a produtividade enquanto reduzem custos operacionais.

O estresse hídrico é um fator crítico que pode influenciar tanto no desenvolvimento quanto na produtividade da planta, e ocorre quando a disponibilidade de água é insuficiente para atender suas necessidades, resultando em efeitos negativos sobre seu desenvolvimento e rendimento (Silva, 2019). Porém, embora o déficit hídrico seja frequentemente associado a efeitos prejudiciais às plantas, quando aplicado de forma controlada, ele pode promover efeitos benéficos no desenvolvimento do sistema radicular do feijoeiro. Essa estratégia, conhecida como "déficit hídrico controlado", visa estimular o aprofundamento das raízes no solo, aumentando a capacidade das plantas de acesso a água e nutrientes em camadas mais profundas (Nhanombe, 2019; Toaldo, 2012).

A plasticidade radicular em resposta ao déficit hídrico pode ser considerada uma adaptação importante para garantir a sobrevivência das plantas em ambientes com disponibilidade hídrica limitada. Estudos indicam que o déficit hídrico leve a moderado pode promover o aumento do comprimento e da densidade radicular, contribuindo para a maior eficiência no uso da água e na aquisição de nutrientes (Silva *et al.*, 2001)

O desenvolvimento das plantas através dos estádios fenológicos pode ser estimado por meio dos graus dias e a soma térmica, ferramentas fundamentais para compreender o crescimento das culturas e sua resposta às condições climáticas (Silva *et al.*, 2018). O uso adequado dessas métricas contribui para a estimativa precisa do ciclo da cultura, além de favorecer uma gestão mais eficiente da irrigação e a otimização da produtividade.

Sabe-se que a produtividade do feijão, uma das leguminosas mais consumidas no Brasil e no mundo, é fortemente influenciada pelo estresse hídrico em diferentes estádios fenológicos da planta. Estudos mostram que déficits no início do ciclo vegetativo e durante a floração podem reduzir a produtividade entre 50% e 65%, enquanto em outros estádios os efeitos são menos intensos, chegando a cortes de 30% da produção (Miorini; Saad, 2012). Em particular, o estresse hídrico durante os estádios críticos, como a floração e a formação de vagens, pode resultar em perdas consideráveis na produção.

Estudos indicam que a resposta do feijão ao estresse hídrico é complexa, envolvendo diversos mecanismos bioquímicos e fisiológicos (Almeida *et al.*, 2020). A modulação de processos como a fotossíntese e a transpiração pode contribuir para o aumento da eficiência no uso da água, mesmo em condições de seca (Ferreira *et al.*, 2021). Dessa forma, compreender as respostas da cultura ao déficit hídrico é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo que minimizem os impactos negativos e aproveitem os possíveis efeitos adaptativos.

Além disso, o uso eficiente da água é um objetivo crescente na agricultura moderna, especialmente em regiões onde a escassez hídrica é uma preocupação constante. A implementação de técnicas de manejo adequado pode permitir que os agricultores maximizem a produtividade do feijão, mesmo em condições de estresse (Pereira *et al.*, 2022).

Neste contexto, este estudo tem o objetivo de avaliar os impactos agronômicos e econômicos do estresse hídrico na cultura do feijão, destacando a importância da irrigação e da gestão eficiente da água.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O feijão, sua classificação botânica e sua importância econômica no Brasil

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa pertencente à família Fabaceae, com origem nas Américas, especialmente nas regiões da Mesoamérica e dos Andes (Pereira, 1990), tendo sido domesticado há milhares de anos. De acordo com a Embrapa (2021), a planta é herbácea, anual e pode ser classificada nos tipos I, II, III e IV, apresentando crescimento determinado ou indeterminado, com hábitos de crescimento ereto, semiereto, prostrado ou trepador, dependendo do genótipo. As sementes variam em forma, tamanho e coloração, características fundamentais para a classificação comercial das cultivares (Embrapa, 2021).

No Brasil, a classificação do feijão é dividida em dois grandes grupos: o feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) e o feijão caupi (*Vigna unguiculata*). Dentro do grupo do feijão comum, destacam-se os tipos carioca e preto, que juntos correspondem a aproximadamente 81% da produção nacional. O feijão carioca é o mais cultivado e consumido no país, sendo responsável por cerca de 60% da produção total (CNA Brasil, 2025). Os grãos se destacam por sua alta densidade nutricional, apresentando elevados teores de proteínas (20–45%), fibras, vitaminas do complexo B (folato, tiamina e riboflavina) e minerais como ferro e zinco (Lisciani *et al*, 2024)

O feijão é uma das culturas mais significativas no Brasil, tanto do ponto de vista econômico quanto social (Fuscaldi; Prado, 2005). A produção é integrada majoritariamente à agricultura familiar, representando cerca de 70% da oferta nacional (IBGE, 2006). Em termos de consumo, o Brasil é um dos principais mercados mundiais, com o feijão sendo um componente básico da alimentação diária, especialmente na combinação com arroz, formando a base da dieta brasileira (Conab, 2023).

A produção brasileira distribui-se em três safras anuais: safra das águas, safra da seca e safra de inverno, permitindo um suprimento contínuo do mercado interno (Landau; Moura, 2018). Os principais estados produtores são Paraná, Minas Gerais, Goiás, São Paulo e Bahia (Agrosustentar, 2024). A safra das águas, cultivada entre outubro e dezembro, é responsável pela maior parte da produção, enquanto a safra de inverno é mais comum no cerrado (IBGE, 2022; Embrapa, 2021).

Apesar da relevância, o setor enfrenta desafios, como flutuações nos preços, mudanças climáticas e incidência de pragas e doenças (Agroreceita, 2024). Para mitigar esses fatores, o governo implementa políticas de preço mínimo e incentiva o uso de sementes certificadas, manejo integrado de pragas e técnicas de cultivo sustentável (Embrapa, 2021; Conab, 2023). Além disso, programas de melhoramento genético têm desenvolvido cultivares mais resistentes a estresses bióticos e abióticos, visando maior eficiência produtiva e sustentabilidade (IFSC, 2023; Pereira *et al.*, 2022).

A produção de feijão no Brasil para a safra 2023/2024 está estimada em aproximadamente 3,25 milhões de toneladas, representando um aumento de 7% em relação à safra anterior (CONAB, 2024). Esse crescimento é atribuído principalmente ao desempenho positivo da segunda safra, que registrou um incremento de 18,5%, alcançando 1,5 milhão de toneladas. No entanto, a produtividade média das lavouras foi afetada por adversidades climáticas, especialmente no Rio Grande do Sul, maior estado produtor do grão (CONAB, 2023)

2.2 Fatores que interferem no desenvolvimento e produtividade do feijão no Brasil

2.2.1 Pragas e Doenças

No cultivo agrícola vários fatores podem interferir na produção de uma cultura em campo, no caso do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) enfrenta desafios significativos relacionados a pragas e doenças que afetam diretamente seu desenvolvimento e produtividade (Coperaguas, 2021). Entre as principais pragas estão a cigarrinha-verde (*Empoasca kraemerii*), a mosca-branca (*Bemisia tabaci*), as vaquinhas (*Diabrotica speciosa* e *Cerotoma arcuata*), a mosca-minadora (*Liriomyza* spp.), os ácaros (*Tetranychus urticae*) e os percevejos (*Euschistus heros* e *Nezara viridula*) (Embrapa, 2021). Essas pragas causam danos diretos e indiretos às plantas, resultando em perdas econômicas consideráveis (Aegro, 2024; BAYER, 2024).

A cigarrinha-verde é uma praga sugadora que afeta diretamente o feijoeiro ao retirar seiva das folhas, causando murcha, amarelecimento e redução na capacidade fotossintética das plantas (Aegro, 2024). Além disso, essa praga pode transmitir doenças, como o enfezamento. Estudos recentes mostram que o manejo adequado

da cigarrinha-verde inclui práticas culturais, como o plantio escalonado e o uso de cultivares resistentes (Oliveira *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022; Embrapa, 2023).

A mosca-branca é outra praga importante que interfere na produção de feijão no Brasil (BAYER, 2024). Técnicas de manejo integrado da mosca-branca — como o uso de armadilhas adesivas amarelas para monitoramento, controle biológico via resistência natural de cultivares (antixenose/antibiose) e inclusão de práticas culturais preventivas — têm se mostrado eficazes no controle dessa praga no feijão (Silva, 2019).

As vaquinhas são besouros que atacam as folhas do feijoeiro, provocando desfolhamento e prejudicando o crescimento das plantas (Aegro, 2022). Essas pragas são particularmente prevalentes em regiões tropicais, onde encontram condições favoráveis de desenvolvimento. Medidas preventivas, como o uso de barreiras físicas e o controle químico criterioso, são recomendadas para minimizar os danos (Silva *et al.*, 2023; Embrapa, 2023).

Os ácaros, especialmente *Tetranychus urticae*, causam danos severos ao feijoeiro, incluindo a descoloração e necrose das folhas (Silva *et al.*, 2021). Essas pragas são frequentemente associadas a condições de baixa umidade relativa e altas temperaturas. Estudos indicam que o uso de acaricidas biológicos e o monitoramento constante das lavouras podem reduzir significativamente a infestação (Embrapa, 2023).

Os percevejos, como *Euschistus heros* e *Nezara viridula*, atacam as vagens e grãos do feijão, resultando em perdas quantitativas e qualitativas (BAYER, 2024). O manejo desses insetos inclui o controle biológico com predadores naturais e o uso racional de inseticidas (Oliveira *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2023).

Além das pragas, doenças como a antracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*) e o crestamento bacteriano (*Xanthomonas axonopodis* pv. *phaseoli*) são grandes desafios fitossanitários (BAYER, 2024). A antracnose, uma das doenças mais devastadoras, ataca folhas, hastes e vagens, sendo disseminada principalmente por sementes infectadas (. O crestamento bacteriano, por sua vez, se intensifica em condições de alta umidade, resultando na necrose dos tecidos foliares e comprometendo o rendimento das lavouras (Silva *et al.*, 2022; Embrapa, 2024; AEGRO, 2024). Estratégias de manejo integrado de doenças, incluindo o uso de sementes certificadas e práticas culturais adequadas, são essenciais para mitigar seus efeitos.

Além delas, a murcha de *Fusarium* é um problema recorrente em solos mal manejados, e pobres em matéria orgânica, que impacta diretamente na produção do feijão. Esse fungo afeta o sistema vascular das plantas, causando murcha, amarelecimento e morte prematura. Técnicas de manejo integrado, como a solarização do solo, a adubação equilibrada e o uso de biocontroladores, são recomendadas para mitigar os danos (Silva *et al.*, 2023).

2.2.2 Cultivares

A escolha de cultivares desempenha um papel essencial, influenciando diretamente o desempenho das lavouras em diferentes condições climáticas, edáficas e fitossanitárias (Silva *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2023; Embrapa, 2024). Segundo Embrapa (2024), a seleção de cultivares adaptadas às condições específicas de cada região é crucial para maximizar os rendimentos e reduzir os riscos associados à produção.

Com os avanços no melhoramento genético é possível observar o desenvolvimento de cultivares mais produtivas, resistentes a doenças e adaptadas a diferentes sistemas de manejo. Cultivares como BRS Estilo e BRS Pérola, amplamente utilizadas no Brasil, têm demonstrado maior tolerância a condições de estresse hídrico e resistência a doenças como o mosaico dourado e a antracnose (Embrapa, 2024). Além disso, a escolha de cada cultivar pode influenciar características como o ciclo de maturação e o porte da planta, fatores que impactam diretamente a eficiência do manejo e a produtividade (Oliveira *et al.*, 2023).

De acordo com Leal *et al.* (2023), a escolha da cultivar pode influenciar a produtividade em sistemas irrigados: as cultivares IAC Milênio e IAC Alvorada apresentaram rendimentos até 17% superiores em relação a outras, demonstrando a importância de estudos regionais para identificar materiais mais adaptados às condições locais. Em regiões com solos de baixa fertilidade, por exemplo, cultivares como BRS Esteio têm se destacado pela eficiência no uso de nutrientes, contribuindo para a viabilidade econômica de pequenos produtores (Silva *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2022).

A adaptação climática também é um fator determinante na escolha de cultivares. Em regiões sujeitas a altas temperaturas, como o Cerrado brasileiro, cultivares desenvolvidas para tolerância ao calor tem mostrado desempenho superior. Santos *et al.* (2022) afirmam que a adoção dessas cultivares pode mitigar os impactos

das mudanças climáticas na produção de feijão. Por outro lado, em áreas com alta incidência de chuvas, como o Sul do Brasil, o uso de cultivares com resistência à podridão radicular tem se mostrado eficaz na redução das perdas (Oliveira *et al.*, 2023).

Segundo Embrapa (2024), além do rendimento agrônômico, é fundamental considerar atributos como cor, tamanho e tempo de cozimento dos grãos na escolha da cultivar. Dessa forma, a seleção de cultivares deve equilibrar fatores produtivos e comerciais para atender às expectativas dos consumidores (Oliveira *et al.*, 2023). Pesquisas recentes apontam que o uso de cultivares específicas para sistemas conservacionistas pode aumentar a retenção de água no solo e reduzir a necessidade de insumos químicos (Santos *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2021). Essa abordagem não apenas melhora a produtividade, mas também contribui para a preservação ambiental e a redução de custos de produção.

2.2.3 Adubação

A adubação também é um dos fatores determinantes para o sucesso da produção de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) no Brasil, onde o manejo adequado da fertilidade do solo é essencial para atender às exigências nutricionais da cultura, considerando a variabilidade das condições edafoclimáticas no país (Silva *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2023; Embrapa, 2024). Como destacado por Silva *et al.* (2021), que relata que a aplicação correta de nutrientes, baseada em análises de solo, é fundamental para maximizar o potencial produtivo do feijoeiro.

O feijão é uma cultura exigente em nutrientes, especialmente nitrogênio, fósforo e potássio. O nitrogênio, em particular, desempenha um papel crucial no crescimento vegetativo e na formação de grãos. A fixação biológica de nitrogênio (FBN), realizada por bactérias simbióticas do gênero *Rhizobium*, tem se mostrado uma prática sustentável e econômica, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados químicos. Estudos indicam que a inoculação com estirpes eficientes de *Rhizobium* pode aumentar a produtividade em até 20% (Santos *et al.*, 2022; Embrapa, 2024).

O fósforo é outro nutriente essencial para o desenvolvimento do feijoeiro, pois está diretamente relacionado à formação de raízes e ao metabolismo energético. Em solos brasileiros, geralmente pobres em fósforo disponível, a adubação fosfatada é indispensável para garantir altas produtividades. Oliveira *et al.* (2023) afirmam que a aplicação de fósforo na semeadura, em doses adequadas, melhora a eficiência do

uso desse nutriente e reduz as perdas por fixação no solo. Além disso, práticas como o uso de fertilizantes de liberação lenta têm sido adotadas para aumentar a eficiência do manejo fosfatado (Silva *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2022).

O potássio, por sua vez, é fundamental para a regulação hídrica e a resistência a estresses abióticos no feijoeiro. Solos deficientes nesse nutriente resultam em plantas mais suscetíveis a doenças e com menor capacidade produtiva. A aplicação de potássio, muitas vezes realizada via cobertura, deve ser equilibrada com outros nutrientes para evitar desbalanços nutricionais que possam comprometer a produtividade. Segundo Embrapa (2024), a adubação potássica é indispensável para cultivos em sistemas intensivos, especialmente aqueles com altas demandas nutricionais.

A integração de práticas como a adubação verde, o uso de resíduos orgânicos e a rotação de culturas tem ganhado espaço no manejo da fertilidade do solo em sistemas de produção de feijão. Essas práticas não apenas melhoram a disponibilidade de nutrientes no solo, mas também promovem a sustentabilidade ambiental e a redução de custos com insumos químicos (Oliveira *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2022).

Outro fator relevante é a aplicação de tecnologia para o manejo da adubação. O uso de ferramentas como a agricultura de precisão permite identificar variabilidades dentro das lavouras, possibilitando uma aplicação localizada de nutrientes. Como destaca Santos *et al.* (2022), essas inovações tecnológicas têm potencial para aumentar a eficiência do uso de fertilizantes e reduzir os impactos ambientais. E como enfatizam Oliveira *et al.* (2023), o manejo nutricional eficiente, baseado em boas práticas agrícolas e no uso de tecnologias, é o alicerce para o futuro competitivo da cultura do feijão.

2.2.4 Nível Tecnológico

O nível tecnológico aplicado ao cultivo do feijão tem se destacado como um fator determinante onde, tecnologias como sementes geneticamente melhoradas, sistemas de irrigação eficientes e o uso de insumos de alta qualidade têm permitido aos produtores enfrentar os desafios climáticos e biológicos. Segundo Oliveira *et al.* (2021), o uso de variedades resistentes a pragas e doenças tem contribuído para um aumento significativo na produtividade, especialmente em regiões onde o feijão enfrenta condições adversas. Além disso, o manejo adequado do solo com práticas

de conservação, como o plantio direto, tem mostrado resultados positivos na sustentabilidade da produção (Silva *et al.*, 2021).

A adoção de tecnologias de monitoramento, como drones e sensores de umidade, é outro aspecto que tem promovido avanços na cultura do feijão. Silva *et al.* (2007) destacaram que, com base em dados históricos e na frequência de temperaturas críticas, é possível planejar a semeadura do feijão para minimizar perdas produtivas e otimizar os insumos aplicados ao longo do ciclo. Estudos recentes indicam que agricultores que utilizam tecnologias de agricultura de precisão obtêm um aumento médio de 20% na produtividade em comparação aos métodos tradicionais (Silva *et al.*, 2022; Embrapa, 2023). Essas inovações também contribuem para a economia de insumos, tornando o cultivo mais sustentável e rentável.

Outro fator tecnológico relevante é a integração de sistemas de manejo integrado de pragas (MIP). O MIP combina práticas biológicas, culturais e químicas para controlar pragas de forma eficiente, minimizando o impacto ambiental. Oliveira e Souza (2022) destacam que o manejo integrado reduz os custos de produção em até 30%, além de preservar a biodiversidade. Além disso, as tecnologias digitais, como aplicativos de monitoramento, têm facilitado a adoção do MIP por pequenos e médios agricultores, ampliando seu alcance (Aegro, 2024).

Por outro lado, a mecanização é um ponto de destaque na modernização do cultivo do feijão. Máquinas especializadas, como semeadoras e colheitadeiras adaptadas para pequenos grãos, têm aumentado a eficiência no plantio e na colheita. Segundo Silva *et al.* (2023), a mecanização reduz o tempo de colheita em até 40%, permitindo maior controle sobre a qualidade do produto final. Apesar disso, a adoção de maquinário ainda enfrenta desafios, principalmente em pequenas propriedades, devido aos altos custos iniciais de investimento (IBGE, 2022; Conab, 2023).

O acesso à tecnologia no Brasil é desigual, o que reflete nas diferenças de produtividade entre as regiões. Enquanto grandes produtores utilizam práticas altamente tecnológicas, os pequenos agricultores enfrentam limitações financeiras e falta de assistência técnica. Isso se alinha à visão de Oliveira *et al.* (2023), que apontam a necessidade de um enfoque integrado para aumentar a competitividade do setor.

2.2.5 Estresse hídrico

O estresse hídrico é uma das principais limitações para o desenvolvimento e produtividade do feijão no Brasil, especialmente devido às características climáticas de regiões produtoras. A irregularidade na distribuição das chuvas durante o ciclo de crescimento da cultura impacta negativamente o estabelecimento das plantas e o enchimento dos grãos. Segundo Silva *et al.* (2022), o déficit hídrico durante a fase de florescimento pode reduzir a produtividade em até 60%, uma vez que afeta diretamente processos fisiológicos, como a fotossíntese e a translocação de nutrientes. Além disso, práticas inadequadas de manejo hídrico amplificam os efeitos negativos do estresse, especialmente em sistemas de cultivo não irrigados (Embrapa, 2023;).

O feijão é particularmente sensível à falta de água em estádios críticos, como a emergência das plântulas e o florescimento. Estudos recentes mostram que mesmo déficits moderados de água durante esses períodos podem comprometer severamente o rendimento. Oliveira e Souza (2022) destacam que a redução na biomassa das plantas e na área foliar, causada pelo estresse hídrico, diminui a capacidade das culturas de captar luz solar e realizar a fotossíntese de forma eficiente. Em experimentos realizados no semiárido brasileiro, onde o estresse hídrico é mais severo, as perdas de produtividade chegaram a 80% em cultivos de sequeiro (Santos *et al.*, 2022).

A irrigação é uma estratégia essencial para mitigar os impactos do estresse hídrico, especialmente em áreas com chuvas mal distribuídas. Conforme relatado por Silva *et al.* (2023), o uso de tecnologias de irrigação eficiente, como gotejamento e aspersão, pode reduzir o consumo de água em até 40%, garantindo altos índices de produtividade. No entanto, apenas uma pequena parcela dos agricultores brasileiros tem acesso a sistemas de irrigação adequados. Isso se deve, em parte, ao alto custo de instalação e manutenção desses sistemas, além da falta de incentivos governamentais para sua adoção (Conab, 2023; Embrapa, 2024).

Outro fator agravante é a degradação do solo, que reduz a capacidade de armazenamento de água e aumenta a vulnerabilidade das culturas ao estresse hídrico. Práticas como o cultivo convencional sem técnicas de conservação têm levado à compactação do solo, dificultando a infiltração da água. Segundo Ponciano *et al.* (2021), a adoção de práticas de manejo sustentável — como adubos verdes e

cobertura do solo — melhora a estrutura física do solo e aumenta significativamente sua capacidade de retenção de água. Em estudo realizado no Cerrado, o uso de capim Mavuno elevou o armazenamento de água em cerca de 200 L/ha na camada superficial, o que contribui decisivamente para mitigar os efeitos do estresse hídrico no feijão. Além disso, a cobertura vegetal ajuda a reduzir a evaporação, mantendo o solo mais úmido por períodos mais longos (Embrapa, 2023).

As mudanças climáticas também têm intensificado o impacto do estresse hídrico na cultura do feijão. Aumento das temperaturas, períodos prolongados de estiagem e eventos climáticos extremos são fatores que agravam ainda mais a escassez de água. Segundo Antolín *et al.* (2021), as projeções climáticas até 2050 indicam que o aumento da frequência e intensidade das secas poderá comprometer significativamente a produção de culturas sensíveis ao estresse hídrico, como o feijão, exigindo a adoção de estratégias de manejo mais resilientes e adaptadas às novas condições ambientais. Nesse contexto, a pesquisa para o desenvolvimento de cultivares mais tolerantes à seca tem sido uma das principais estratégias para garantir a sustentabilidade da produção (Silva *et al.*, 2022).

Por fim, a integração entre manejo adequado do solo, tecnologias de irrigação e o desenvolvimento de cultivares resistentes à seca é essencial para enfrentar os desafios impostos pelo estresse hídrico. A adoção de práticas integradas, como o manejo da irrigação com base em sensores de umidade e modelos climáticos, tem mostrado potencial para aumentar a eficiência no uso da água e, conseqüentemente, a produtividade do feijão (Oliveira; Souza, 2022).

2.3 Impactos do estresse hídrico na cultura do feijão e respostas fisiológicas

O estresse hídrico é uma das limitações para o crescimento, desenvolvimento e da produção de feijão principalmente quando afeta severamente processos fisiológicos e metabólicos da planta. A escassez de água durante estágios críticos, como germinação, florescimento e enchimento de grãos, pode resultar em perdas de produtividade superiores a 70% em algumas regiões (Silva *et al.*, 2022). De acordo com Silva (2019), a diminuição da fotossíntese em condições de estresse hídrico foi observada em diferentes fases do ciclo do feijão-fava, com impactos negativos na assimilação de carbono e na produtividade final.

Durante o estresse hídrico, as plantas de feijão apresentam alterações no metabolismo, como o aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs),

que causam danos às células e tecidos. Segundo Oliveira *et al.* (2023), a produção excessiva de EROs pode levar à oxidação de proteínas, lipídios e ácidos nucleicos, reduzindo a viabilidade celular e a funcionalidade dos órgãos vegetais. Para mitigar esses efeitos, as plantas ativam mecanismos antioxidantes, como a produção de enzimas superóxido dismutase e catalase, que ajudam a neutralizar o impacto das EROs. No entanto, em condições de estresse prolongado, esses mecanismos podem ser insuficientes, resultando em danos irreversíveis (Santos *et al.*, 2022; Embrapa, 2024).

O crescimento vegetativo do feijão também é significativamente impactado pela falta de água. Estudos demonstram que o déficit hídrico leva à redução da área foliar, do número de folhas e da taxa de expansão das mesmas, afetando diretamente a interceptação de luz solar e a eficiência do uso da radiação (Oliveira; Souza, 2023). Essa redução no crescimento vegetativo compromete a capacidade da planta de competir por recursos no ambiente, como luz e nutrientes, e prejudica o desenvolvimento das estruturas reprodutivas, diminuindo o número e o peso dos grãos colhidos (Silva *et al.*, 2022).

A sensibilidade do feijão ao estresse hídrico é particularmente elevada durante a fase de florescimento. Segundo Silva (2019), a deficiência hídrica nesse estágio resulta em alto índice de aborto floral e má formação de vagens, fatores que contribuem significativamente para a redução da produtividade final da cultura. Além disso, o estresse hídrico afeta a translocação de fotoassimilados para os órgãos de reserva, diminuindo o enchimento dos grãos e a qualidade final da produção (Santos *et al.*, 2022).

Outro impacto significativo é a redução na absorção e transporte de nutrientes. A falta de água diminui o fluxo de solução no solo, dificultando a absorção de nutrientes essenciais como nitrogênio, fósforo e potássio (Oliveira *et al.*, 2023; Embrapa, 2024). Como resultado, a deficiência nutricional agrava os efeitos do estresse hídrico, comprometendo a formação e funcionalidade dos tecidos vegetais.

O impacto fisiológico do estresse hídrico no feijão é amplificado em regiões onde as temperaturas são elevadas, como nas áreas semiáridas do Brasil. Nessas condições, o déficit hídrico e o estresse térmico frequentemente ocorrem simultaneamente, aumentando a evapotranspiração e agravando a escassez de água disponível (Silva *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2022). A alta temperatura acelera o metabolismo da planta, intensificando a demanda por água e nutrientes, enquanto a

oferta é limitada. Essa combinação pode resultar em colapsos fisiológicos e morte das plantas em casos extremos (Embrapa, 2024).

2.3.1 Impactos do estresse hídrico nas fases iniciais do feijão e respostas fisiológicas

O estresse hídrico nas fases iniciais do cultivo do feijão compromete significativamente o desenvolvimento da cultura, afetando processos fisiológicos essenciais para o estabelecimento das plantas. Durante a germinação, a falta de água reduz a absorção hídrica pelas sementes, limitando a ativação das enzimas que regulam o metabolismo inicial. Segundo Custódio, Salomão e Machado Neto (2013), a escassez de água durante a germinação reduz a velocidade de germinação e acelera o declínio no vigor das plântulas, por conta da baixa capacidade de recuperação do feijão e do sistema radicular pouco desenvolvido; isso prejudica diretamente a densidade populacional do cultivo. Essas falhas iniciais comprometem o crescimento vegetativo subsequente, com impactos negativos na produtividade final (Oliveira *et al.*, 2023).

Nas fases de emergência e plântula, o déficit hídrico reduz a expansão radicular, dificultando a absorção de água e nutrientes. Conforme observado por Silva *et al.* (2023), a limitação no desenvolvimento das raízes compromete a ancoragem das plantas no solo, tornando-as mais suscetíveis ao tombamento e a outros estresses ambientais. Além disso, a redução do crescimento radicular prejudica a exploração de camadas mais profundas do solo, agravando os impactos do estresse hídrico prolongado (Santos *et al.*, 2022; Embrapa, 2024).

Fisiologicamente, a redução da disponibilidade hídrica afeta a abertura dos estômatos nas folhas, o que limita a fotossíntese e a troca gasosa. Em estágios iniciais, essa limitação reduz a produção de carboidratos necessários para o crescimento celular. De acordo com Silva (2019), a elevação das EROs em plantas de feijão-fava sob déficit hídrico provoca alterações na integridade de proteínas, lipídios e ácidos nucleicos, afetando negativamente os processos fisiológicos essenciais. Para mitigar esses danos, as plantas ativam mecanismos antioxidantes que, embora eficazes em curto prazo, demandam energia que poderia ser direcionada para o crescimento (Oliveira *et al.*, 2023).

A falta de água afeta diretamente a divisão e a expansão celular nas fases iniciais do feijão. A redução da pressão de turgor nas células vegetais limita o

crescimento das folhas e dos caules, resultando em plantas de menor porte e menor área foliar disponível para a fotossíntese (Santos *et al.*, 2022). Esses efeitos são particularmente críticos em regiões onde o déficit hídrico coincide com temperaturas elevadas, que aumentam a transpiração e aceleram a perda de água (Silva *et al.*, 2023; Embrapa, 2024).

Outro impacto significativo do estresse hídrico nas fases iniciais é a redução na eficiência de absorção de nutrientes. Durante a fase de plântula, a água é essencial para o transporte de nutrientes no xilema. Em condições de déficit hídrico, a menor disponibilidade de solução no solo prejudica a absorção de elementos essenciais, como fósforo e potássio, que são fundamentais para a formação dos tecidos iniciais da planta (Santos *et al.*, 2022). Além disso, o déficit hídrico reduz a nodulação e a fixação biológica de nitrogênio em cultivares de feijão, o que compromete ainda mais o desenvolvimento inicial (Silva *et al.*, 2012).

2.4 Soma térmica e sua importância para os cultivos

A soma térmica é um conceito fundamental na agricultura, permitindo prever e acompanhar o desenvolvimento de culturas agrícolas, como o feijão, com base na acumulação de graus-dia. Segundo Oliveira *et al.* (2022), essa métrica possibilita o planejamento eficaz do manejo agrícola, fornecendo informações sobre o tempo necessário para o feijão atingir diferentes estágios fenológicos, como emergência, floração e maturação. Além disso, estudos como feitos por Miranda e Campelo Júnior (2010) que a utilização da soma térmica contribui para minimizar os impactos de variações climáticas no desenvolvimento da cultura do feijão.

O cálculo da soma térmica é amplamente utilizado no Brasil e envolve o uso de temperaturas mínimas e máximas diárias, considerando uma temperatura-base específica para cada cultura. Para o feijão, essa temperatura geralmente está entre 8 °C e 10 °C. Segundo Santos *et al.* (2022), o método tem demonstrado eficácia em prever o tempo ideal para operações como irrigação e adubação. Por outro lado, desvios dessa faixa térmica podem comprometer o crescimento das plantas e a produtividade (Silva *et al.*, 2023; Embrapa, 2024).

A aplicação da soma térmica é particularmente relevante nas fases iniciais do feijão, como a germinação e o crescimento inicial. Durante a germinação, a temperatura afeta a velocidade de absorção de água e a ativação enzimática. Segundo estudos de Santos *et al.* (2022), a soma térmica é uma ferramenta confiável

para prever o tempo de emergência das plântulas, garantindo uniformidade no campo e melhor utilização de insumos. Essa etapa é crucial para o estabelecimento de uma cultura vigorosa e produtiva (Silva *et al.*, 2023).

O impacto da soma térmica no crescimento vegetativo do feijão também é significativo. De acordo com Oliveira *et al.* (2022), a acumulação térmica ideal promove a expansão foliar, aumentando a área disponível para a fotossíntese e a produção de biomassa. No entanto, desvios na soma térmica podem levar a estresses fisiológicos, como crescimento desuniforme, redução de biomassa e menor produtividade (Embrapa, 2024).

A floração e a formação de vagens são fases críticas do ciclo do feijão que também dependem diretamente da soma térmica. Temperaturas extremas durante a floração podem interferir na polinização, reduzindo o número de grãos formados (Santos *et al.*, 2022). O uso do método residual de Arnold (1959), que considera as variações térmicas ao longo do dia a partir da soma dos graus-dia acima da temperatura basal, auxilia na identificação de períodos de risco térmico. Renato *et al.* (2013) demonstram que esse método permite prever a aceleração ou redução do ciclo do feijão em cenários de calor extremo, viabilizando a aplicação de estratégias como irrigação suplementar em regiões mais quentes.

Segundo Silva *et al.* (2023), ao combinar essa métrica com informações climáticas regionais, é possível reduzir o risco de exposição a eventos extremos, como geadas e secas prolongadas. Isso é especialmente relevante em cenários de mudanças climáticas, onde a previsibilidade do clima se torna cada vez mais desafiadora.

Tecnologias baseadas na soma térmica também contribuem para a sustentabilidade do cultivo de feijão. O uso racional de recursos, como água e fertilizantes, pode ser aprimorado com o monitoramento térmico, reduzindo custos e impactos ambientais. A integração da soma térmica com ferramentas digitais, como sensores e softwares agrícolas, amplia as possibilidades de manejo preciso e eficiente, promovendo a sustentabilidade do setor agrícola (Santos *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023).

O método de estimativa para o cálculo da soma térmica é amplamente utilizado na agricultura para prever o desenvolvimento das culturas com base em dados climáticos, especialmente as temperaturas diárias. Este método envolve o cálculo dos graus-dia acumulados (GD), que representam o somatório das temperaturas

favoráveis ao crescimento da planta, a partir de uma temperatura-base (T_{base}) abaixo da qual o desenvolvimento cessa. Segundo Silva *et al.* (2022), o funcionamento básico do método de estimativa é dado pela equação:

$$GD = \frac{(T_{max} - T_{min})}{2} - T_{base}$$

Neste cálculo, T_{max} é a temperatura máxima diária, T_{min} é a temperatura mínima diária, e T_{base} corresponde à temperatura mínima para o crescimento da cultura, que no feijão varia geralmente entre 8 °C e 10 °C. A fórmula é aplicada de forma cumulativa ao longo do ciclo da planta, permitindo determinar as necessidades térmicas específicas para cada fase fenológica.

Além de ser simples, o método de estimativa é adaptável. Ele permite ajustes em situações em que a temperatura ultrapassa valores críticos para a planta, como extremos de calor ou frio. Segundo Oliveira *et al.* (2022), a adaptação do método é feita por meio de limites superiores ($T_{limite superior}$) e inferiores ($T_{limite inferior}$), desconsiderando temperaturas que poderiam causar estresse térmico ou inatividade metabólica.

O método de Arnold é uma abordagem mais avançada que leva em consideração variações diárias de temperatura com maior precisão. Segundo Renato *et al.* (2013), essa técnica é especialmente eficaz em regiões brasileiras com grande amplitude térmica, como o Cerrado e o Sul do país. O método de Arnold permite ajustar estratégias de manejo conforme as necessidades térmicas do feijão em diferentes fases fenológicas, promovendo um controle mais eficiente do ciclo da cultura (Oliveira *et al.*, 2022).

O método de Arnold leva em consideração tanto as temperaturas máximas quanto mínimas diárias, ponderando o impacto dessas variações térmicas ao longo do ciclo da cultura. Segundo Renato *et al.* (2013), o cálculo da soma térmica pelo método de Arnold é baseado na fórmula:

$$GD = \frac{(T_{max} - T_{base})}{2} + \frac{(T_{min} - T_{base})}{2}$$

na equação, o T_{\max} representa a temperatura máxima diária, T_{\min} a temperatura mínima diária e T_{base} a temperatura mínima necessária para o desenvolvimento da cultura do feijão e calcula os graus-dia separadamente para as temperaturas máxima e mínima, proporcionando uma análise mais detalhada da contribuição térmica diária para o desenvolvimento da planta.

Diferente de outros métodos, o método de Arnold considera somente as temperaturas dentro da faixa favorável ao crescimento da planta. Quando as temperaturas ultrapassam um limite superior (geralmente próximo a 35 °C), o cálculo é ajustado, desconsiderando valores que possam indicar estresse térmico.

Além disso, o método de Arnold também pode ser adaptável a diferentes fases fenológicas do feijão. Por exemplo, durante a germinação, temperaturas muito baixas ou muito altas podem retardar o processo. Segundo Oliveira *et al.* (2022), o uso do método permite identificar o momento ideal para o plantio, garantindo que as plântulas emerjam uniformemente e com vigor. Isso é essencial para estabelecer uma cultura homogênea e produtiva. No estágio vegetativo, o método de Arnold ajuda a monitorar o crescimento foliar e a formação de biomassa. Estudo de Sobral (2024) confirma essa abordagem: ao integrar graus-dia e radiação solar acumulada, foi possível estimar com precisão a evapotranspiração e os coeficientes de cultura do feijão-caupi, identificando os momentos mais adequados para irrigação e adubação.

Além disso, durante a floração e a formação de vagens, a soma térmica calculada pelo método de Arnold auxilia no ajuste das estratégias de irrigação e adubação. Segundo Santos *et al.* (2022), essas fases são extremamente sensíveis às condições térmicas, e o uso da soma térmica permite mitigar riscos, como abortamento floral e redução do número de grãos por vagem.

2.5 Déficit hídrico x viabilidade econômica da irrigação do feijão

O manejo hídrico é um fator crítico para o sucesso da produção, especialmente em regiões sujeitas ao déficit hídrico. A viabilidade econômica da irrigação tem sido amplamente discutida, considerando que o uso eficiente da água pode aumentar a rentabilidade sem comprometer a sustentabilidade ambiental (Ávila *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2021).

A irrigação é uma prática agrícola indispensável em áreas de baixa disponibilidade hídrica. Contudo, estudos indicam que a irrigação parcial pode ser uma estratégia eficiente para reduzir custos sem prejuízos significativos à produtividade.

Segundo De acordo com Soares *et al.* (2021), essa estratégia pode reduzir significativamente o consumo hídrico sem comprometer a produtividade do feijão-caupi, destacando-se como alternativa viável em regiões com escassez hídrica.

O impacto do déficit hídrico sobre o feijoeiro varia conforme o estágio de desenvolvimento da cultura (Oliveira *et al.*, 2021). Na fase vegetativa, o feijão apresenta certa tolerância ao déficit hídrico, devido ao ajuste osmótico e à capacidade de recuperação após o estresse (Ávila *et al.*, 2022). No entanto, durante floração e enchimento de grãos, o déficit hídrico pode provocar uma redução significativa na taxa de fotossíntese, fechamento estomático e queda de produtividade em até 50 %. Pérez *et al.* (2009) demonstraram que, após apenas três dias de estresse hídrico, a fotossíntese líquida caiu cerca de 67 % em floração e 87 % durante o enchimento de vagens, resultando em declínios de produtividade de 10 %, 57 % e até 50 % nos estágios F, PF e SF, respectivamente

Estratégias de manejo que promovam a eficiência no uso da água, como o uso de cultivares tolerantes ao estresse hídrico, têm sido apontadas como soluções promissoras. Essas variedades são capazes de manter uma melhor estabilidade fisiológica em condições adversas (Alves *et al.*, 2023), visto que a maioria da produção de feijão no Brasil é feita por agricultores com baixos recursos e o seu custo eleva o valor total que deva ser investido na produção.

O custo da irrigação, quando mal gerido, pode comprometer a rentabilidade da produção. Estudos mostram que sistemas automatizados de irrigação por gotejamento, embora representem um investimento inicial elevado, proporcionam uma redução significativa no uso de água e energia a longo prazo. Oliveira *et al.* (2021) destacam que o retorno financeiro pode ser alcançado em até três safras, desde que a irrigação seja realizada de forma eficiente.

Além disso, a disponibilidade de água também influencia diretamente a viabilidade econômica. Em regiões com restrição hídrica, a irrigação deficitária, aliada à adoção de cultivares adaptadas, pode gerar um balanço positivo entre custo e benefício, aumentando a produtividade em até 30% (Silva *et al.*, 2021).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi instalado e conduzido em casa de vegetação no *Campus* Uberaba do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro localizado, no município de Uberaba – MG, situado a 19° 39' 19" S e 47° 57' 27" W e de 795 m acima do nível do mar com pluviosidade média anual de 1600 mm, temperatura média anual de 22,6 °C e umidade relativa média de 68%. O clima é classificado como AW tropical quente, segundo a classificação de Köppen, apresenta inverno frio e seco (Valle Junior *et al.*, 2010)

O experimento foi conduzido em blocos casualizados (DBC) com 4 tratamentos e 6 repetições, em total de 24 parcelas experimentais. Cada parcela foi composta de linhas de irrigação por gotejamento de 7 m de comprimento com 70 plantas. Cada bloco teve 4 tratamentos, os tratamentos foram três déficits hídricos de 7 dias de duração nos estádios, V2, V3 e V4, e um tratamento sem déficit hídrico (testemunha).

Para correção do solo pré-instalação do experimento, foi retirada amostra de solo referente a camada de 0-20 cm e encaminhada para o Laboratório de Análise de Solo da EPAMIG em Uberaba, MG. As características do solo foram: textura Franco Arenosa; Matéria Orgânica (1,6 dag kg⁻¹); pH (6,4); Fósforo (119,9 mg dm⁻³); Potássio (150 mg dm⁻³); Cálcio (5,5 cmolc dm⁻³); Magnésio (0,8 cmolc dm⁻³); Alumínio (0,0 cmolc dm⁻³); Hidrogênio + Alumínio (1,6 cmolc dm⁻³); Capacidade de Troca de Cátions (S.B.) (6,7 cmolc dm⁻³); e Percentual de Saturação por Bases (V%) (80,7 %).

A semeadura ocorreu em 19/03/2024 e a cultivar utilizada foi a BRS ESTILO que possui grão do tipo carioca, com porte semiereto a prostrado e ciclo normal. Apresenta resistência ao mosaico comum e uma reação intermediária à antracnose e à ferrugem. É adequada para o cultivo em diversos estados, incluindo Minas Gerais (Embrapa 2009). As adubações foram realizadas de acordo com as recomendações de Alvarez (1999). Na semeadura foram utilizados 1,6 kg de ureia e 2,7 kg de super simples. Na adubação de cobertura foram 2,66 kg de ureia e 2 kg de cloreto de potássio. Para realizar a colheita (21/06/2024), foi previamente realizada a dessecação (13/06/2024) com dessecante dibrometo de diquat, na dose recomendada na bula, para uniformizar a umidade dos grãos para a colheita.

O sistema de irrigação utilizado foi gotejamento com intensidade de aplicação de 9,7 mm h⁻¹; para melhorar a uniformidade na irrigação foram utilizadas duas linhas de irrigação, paralelas com emissores intercalados. Para a determinação das variáveis

de temperatura e umidade do ar foi instalado um termo-higrômetro no interior da casa de vegetação para determinação de valores diários.

O manejo da irrigação foi realizado a partir dos valores diários de evapotranspiração de referência (ET_o) conforme equação 1 (modelo de Hargreaves). Os dados referentes à radiação solar foram obtidos seguindo a recomendação de Doorenbos e Pruitt (1975).

$$ET_o = 0,0023(T_{med} + 17,8)(T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot 0,408 \cdot Ra \quad (1)$$

Em que,

ET_o= evapotranspiração da cultura de referência calculada de acordo com a metodologia de Hargreaves (mm dia⁻¹); T_{med}= temperatura média diária, em °C; T_{max}= temperatura máxima diária, em °C; T_{min}= temperatura mínima diária, em °C; Ra= radiação no topo da atmosfera (MJ m⁻² dia⁻¹).

A temperatura média foi obtida através da equação 2.

$$T_{med} = (T_{max} + T_{min}) / 2 \quad (2)$$

Para obter a evapotranspiração da cultura, utilizou-se a equação 3.

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \cdot K_l \cdot K_s \quad (3)$$

Em que,

ET_c= evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹); K_c= coeficiente da cultura; K_l = coeficiente de localização; K_s= coeficiente de umidade do solo.

O valor de K_c varia de acordo com a cultura e região. O K_c utilizado (adaptado) foi proposto segundo recomendação de Santana *et al.*, (2008) em que: até o estágio da primeira folha trifoliada (V3) usou-se 0,6; de V3 até o início da formação de botões florais (R5), 0,85; de floração até formação de vagem (R7), 1,07; e após maturação (R9), coeficiente da cultura de 0,78. O coeficiente de localização (K_l) utilizado foi de 0,6 e foi adotado o valor de 1 para o coeficiente de umidade do solo (K_s). Para os parâmetros de eficiência de aplicação e coeficiente de uniformidade do sistema, foram considerados os valores de 0,82 e 0,95, respectivamente, (equação 4).

As lâminas de irrigação foram determinadas por meio da equação 4.

$$LB = \frac{ETc}{Ea \times CU} \quad (4)$$

Em que,

LB= lâmina bruta (mm h⁻¹); ETc= evapotranspiração da cultura (em mm dia⁻¹);
CU= uniformidade de aplicação do sistema de irrigação (0,88).

As variáveis avaliadas foram: massa de 100 grãos, massa da planta, massa da raiz em R6, número de vagens por planta, número de grãos por planta, número de grãos por vagem e produtividade os valores de produtividade e massa de 100 grãos foram corrigidos para a umidade de 13% conforme (Carvalho, 2005).

Também foi realizado o estudo para cálculo de Graus-dia e soma térmica. Nas parcelas foram considerados três métodos de cálculos para estimar GD: GD1 é Arnold (1959), GD2 Lindsey e Newman (1956) adaptado por Villa Nova *et al.* (1972) e GD3 Ometto (1981). Foi registrado em cada parcela quando pelo menos 20% das plantas tenham mudado de fase fenológica do feijoeiro. A temperatura base superior considerada foi de 35°C e inferior de 10°C. O método de Arnold (1959) foi calculado conforme equação 5.

$$GD = \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - T_{base} \quad (5)$$

Em que,

GD = graus-dia acumulado; T max = a temperatura diária média máxima do ar (°C); T min = a temperatura diária média mínima do ar (°C); Tbase= a temperatura abaixo da qual as plantas não se desenvolvem.

Já o método de Lindsey e Newman (1956) adaptado por Villa Nova *et al.* (1972) existem condições e o uso das equações 6 e 7.

$$T_{min} > T_{base} \text{ e } T_{max} < T_{B} \quad GD = \left(\frac{T_{max} - T_{min}}{2} \right) + (T_{min} - T_{base}) \quad (6)$$

$$T_{min} < T_{base} \text{ e } T_{max} < T_{B} \quad GD = \frac{(T_{max} - T_{base})^2}{2T_{max} - T_{min}} \quad (7)$$

Em que,

TB = temperatura base superior.

O método de Ometto (1981) considera cinco condições e equações de 8 a 12.

$$TB > T_{max} > T_{min} > T_{base} GD = \left(\frac{T_{max} - T_{min}}{2} \right) + T_{min} - T_{base}$$

(8)

$$TB > T_{max} > T_{base} > T_{min} GD = \frac{(T_{max} - T_{base})^2}{2 \cdot (T_{max} - T_{min})} \quad (9)$$

$$TB > T_{base} > T_{max} > T_{min} GD = 0 \quad (10)$$

$$T_{max} > TB > T_{min} > T_{base} GD = \frac{2(T_{max} - T_{min})(T_{min} - T_{base}) + (T_{max} - T_{min})^2 - (T_{max} - TB)^2}{2(T_{max} - T_{min})}$$

(11)

$$T_{max} > TB > T_{base} > T_{min} GD = 1/2 \frac{(T_{max} - T_{base})^2 - (T_{max} - TB)^2}{T_{max} - T_{min}} \quad (12)$$

Utilizou-se o teste F para análise de variância dos tratamentos estudados e o teste de média Scott-Knott. A ferramenta utilizada para as análises foi o software Sisvar for Windows.

Ao final do experimento também foi realizada uma análise econômica descritiva, onde verificou-se a economia em água e monetária (em reais) inerente aos tratamentos, para realizar a simulação foram feitas inferências com valores de mercado atuais, foi considerado que a área irrigada seria em um pivô de 80 hectares, com custo de implantação de R\$1.200.000,00, custo de oportunidade de R\$640.000,00, custo de manutenção de R\$100.000,00, lâmina anual de 900 milímetros e vida útil de 20 anos, através desses parâmetros foi estimado e calculado um custo total de R\$ 3,50 por milímetro irrigado, considerando custos fixos e variáveis na composição do custo.

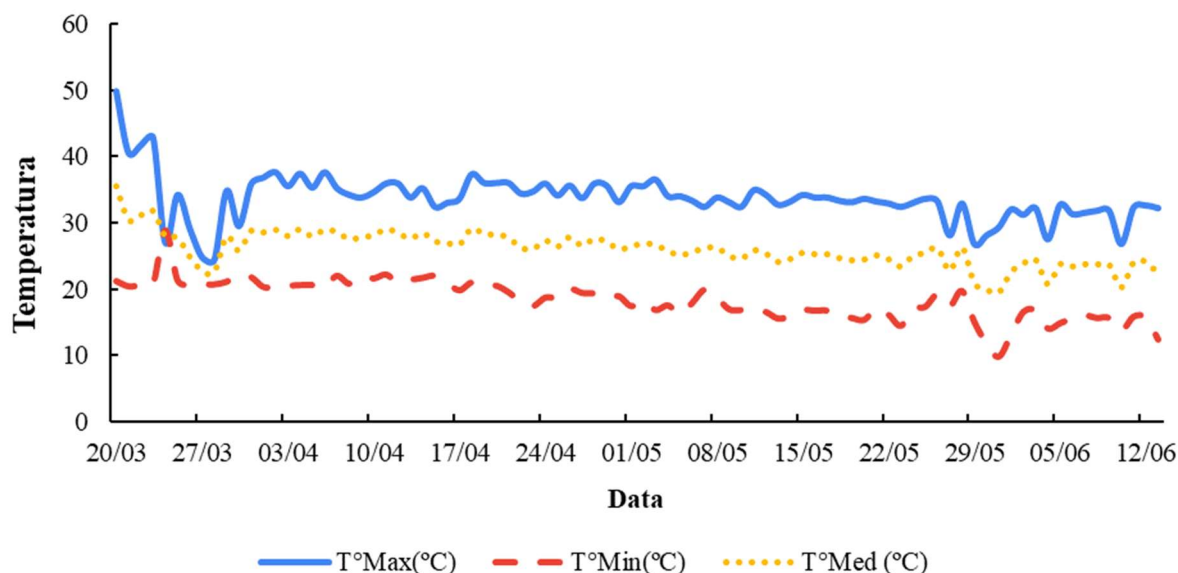
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a condução do experimento as temperaturas do ar foram muito extremas, a mínima foi de 9,7 °C e a máxima de 49,8 °C, já a temperatura média foi de 26,01°C. A temperatura média foi dentro do considerado ideal para o cultivo do feijão (Silva *et al.*, 2006), entretanto por ser ambiente de casa-de-vegetação, o efeito estufa causado pela cobertura promoveu temperaturas muito elevadas durante o dia, a amplitude da temperatura chegou a 28,1 °C, sendo a amplitude média de 15 °C, o que pode ter prejudicado o desenvolvimento da cultura.

A temperatura é um dos principais fatores que afetam o crescimento e a produtividade do feijão. Segundo Hoffmann Júnior *et al.* (2007), a faixa de temperatura ideal para o cultivo do feijão varia entre 18°C e 24°C. Temperaturas abaixo de 10°C podem causar atraso no desenvolvimento, enquanto temperaturas acima de 35°C podem levar a uma redução significativa na produção. A temperatura do ar atua diretamente sobre processos fisiológicos como a germinação, desenvolvimento vegetativo e a produção de grãos em leguminosas, influenciando a expressão fenotípica de características de interesse agrônomo (Pereira *et al.*, 2007).

Segundo Sobral *et al.* (2024), o ambiente protegido favorece a emergência e o crescimento inicial do feijoeiro, com melhores respostas fisiológicas e produtivas quando comparado ao cultivo a céu aberto, principalmente em regiões com alta variação de temperatura. A variação de temperatura durante o ciclo de cultivo pode impactar a maturação e a qualidade dos grãos, sendo fundamental monitorar as condições climáticas para garantir o sucesso da cultura. Entretanto, nas conduções do experimento (Gráfico1), não foi possível moderar as oscilações termais.

Gráfico 1 – Temperatura máxima, média e mínima durante a condução experimental, Uberaba-MG, 2024.



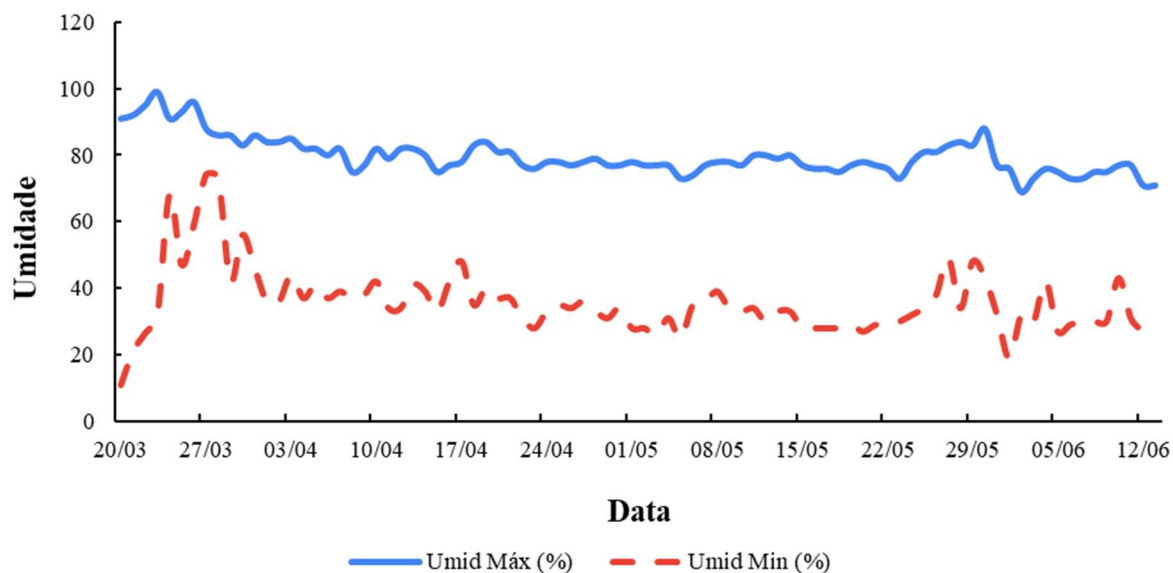
Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Embora o ambiente de condução tenha sido em casa-de-vegetação a umidade relativa do ar (Gráfico2), se comportou de maneira muito extrema, similar a temperatura (Gráfico1), a umidade variou de 11 a 99% sendo a média verificada de 57,81%. A amplitude da variação da umidade chegou a 80% em um único dia, sendo que na média a amplitude foi de 44 %.

A umidade relativa do ar influencia diretamente a taxa de transpiração das plantas, influencia processos fisiológicos, como a transpiração e a fotossíntese, além de impactar a incidência de doenças e a qualidade dos grãos (Silva, 2019). Estudos indicam que a umidade relativa do ar ideal para o cultivo do feijão varia entre 50% e 80%, valores próximos dos verificados no experimento (Gráfico2).

Segundo Almeida *et al.* (2020), níveis de umidade acima de 80% podem favorecer o desenvolvimento de doenças fúngicas, como a antracnose e o oídio, que comprometem a produtividade e a qualidade do feijão. Quando a umidade relativa do ar cai abaixo de 50 %, há aumento na demanda evaporativa da atmosfera, o que eleva a taxa de evapotranspiração da cultura e incrementa o estresse hídrico sobre a planta (Paula, 2018).

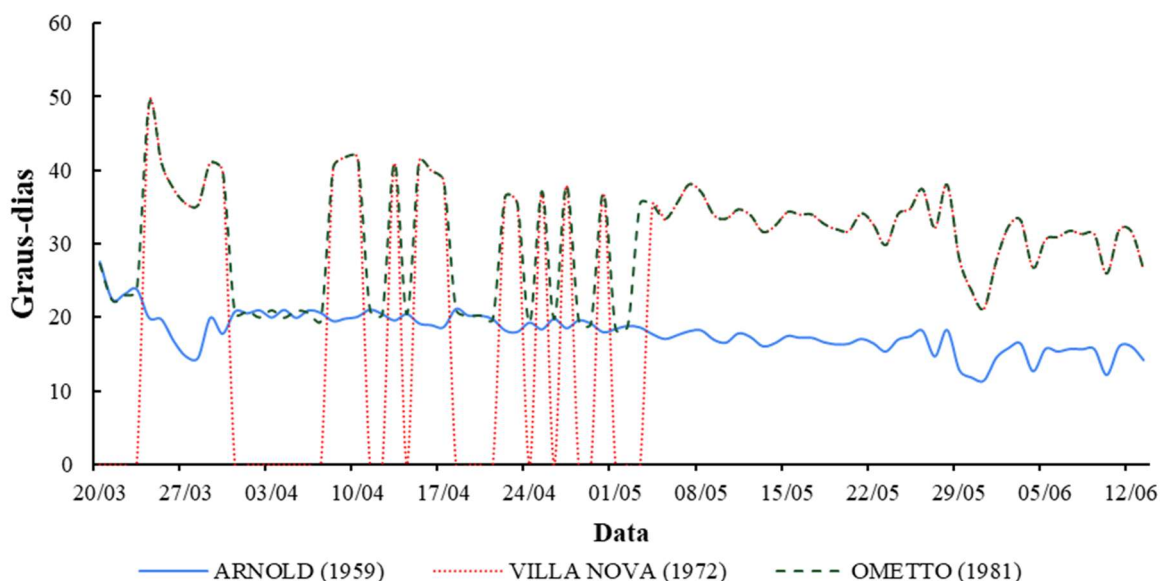
Gráfico 2 – Umidade máxima e mínima durante a condução experimental, Uberaba-MG, 2024.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Os graus-dias (GD) obtidos com os métodos tiveram comportamento distinto, nota-se que o método de Vila Nova (1977) é o mais extremo, levando o valor de GD a zero em diversas datas, o método proposto por Ometto (1981) já possui menos valores próximos a zero, mas similar ao de Vila Nova (1977) possui acúmulos elevados (Gráfico3 e Tabela 1), o método mais equilibrado foi o de Arnold (1959), por esse motivo foi o método escolhido para avaliar se os tratamentos propiciaram diferentes durações nos estádios reprodutivos do feijão (Tabela 2 e 3).

Gráfico 3 – Graus-dias ao longo do ciclo da cultura do feijão, Uberaba-MG, 2024.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

A soma térmica, expressa em graus-dias (GD), é uma ferramenta crucial para a estimativa do desenvolvimento fenológico das culturas. Araújo (2022) validou métodos de cálculo térmico em espécies florestais, destacando que abordagens que penalizam extremos de temperatura oferecem maior precisão no acompanhamento fenológico, contribuindo para o planejamento agrícola em cenários de estresse térmico, enquanto Araújo (2022) demonstrou que métodos que consideram extremos térmicos apresentam maior precisão fenológica, reforçando a utilidade dessa abordagem no manejo agrícola.

Tabela 1 – Soma térmica para a cultura do feijão comum de acordo com os métodos estudados, Uberaba-MG, 2024.

Estádios	Soma térmica (Graus-dias acumulados)			Duração (dias)
	Arnold (1959)	Villa Nova (1972)	Ometto (1981)	
V0 (19/03/2024)	96,87	0	96,14	04
V1 (23/03/2024)	241,25	279	395,63	09
V2 (01/04/2024)	343,72	279	498,24	05
V3 (06/04/2024)	465,77	402,75	683,13	06
V4 (12/04/2024)	604,26	563,29	905,61	07
R5 (19/04/2024)	738,515	672,19	1093,9	07
R6 (26/04/2024)	907,31	782,29	1335,2	10
R7 (06/05/2024)	1079,86	1125,9	1678,9	09
R8 (15/05/2024)	1474,51	1914,4	2467,3	25

R9 (09/06/2024)	1548,86	2061,7	2614,7	04
Total	1525,74	2061,7	2591,7	82

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Segundo Cardoso *et al.* (2019), o método de Ometto se mostrou eficiente para refletir o impacto das variações climáticas sobre o acúmulo de graus-dia, permitindo ajustes no manejo em função das exigências térmicas da cultura do feijão-comum.

Semelhante ao verificado nesse estudo (Gráfico3, Tabela 1 e 2), a pesquisa de A abordagem proposta por Arnold (1959) mostrou-se útil na estimativa dos graus-dia acumulados para o desenvolvimento fenológico do feijoeiro, especialmente nas fases de germinação, floração e maturação. De acordo com Cardoso *et al.* (2019), o método de Arnold foi um dos mais precisos entre os avaliados, permitindo ajustes no manejo agrícola com base nas previsões térmicas em diferentes regimes hídricos e estratégias de adubação. No presente estudo (Tabela 2 e 3) o método foi utilizado para verificar se os tratamentos poderiam trazer alterações na soma térmica dos estádios reprodutivos do feijão.

Tabela 2 – Análise de variância resumida relativa aos acúmulos térmicos nos estádios reprodutivos de R5, R6, R7 e R8 com o método de Arnold (1959), Uberaba, MG, 2024.

FV¹	GL²	R5	R6	R7	R8
Déficits Hídrico	3	0,1229 ^{ns}	0,2223 ^{ns}	0,0178*	0,4926 ^{ns}
CV ³ (%)	-	3,49	1,35	1,55	1,43
Média geral	-	731,971	910,03	1060,432	1450,18

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Nota: ¹ fontes de variação; ² grau de liberdade; ³ coeficiente de variação; * significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F; ^{ns} não significativo pelo teste F.

Notou-se que o tratamento que apresentou maior soma térmica foi o sem a interrupção da irrigação (Tabela 3), enquanto os outros tratamentos (V2, V3 e V4) que tiveram a irrigação interrompida por sete dias em diferentes estádios obtiveram valores menores de soma térmica por estádio. A diferença foi notada apenas no tratamento R7 (formação das vagens), isso mostra que os déficits hídricos aceleraram o ciclo da cultura nesse estádio, e como consequência poderiam acarretar vagens menores. Contudo, esse efeito não foi comprovado (Tabela 4), e mesmo com o encurtamento do estádio R7, a produção de vagens, grãos e consequente produtividade não tiveram reduções estatisticamente significativas.

Tabela 3 – Soma térmica dos estádios reprodutivos de R5, R6, R7 e R8 com o método de Arnold (1959), Uberaba-MG, 2024.

Tratamento	R5	R6	R7	R8
SI	725,36 a	918,89 a	1080,06 b	1454,04 a
V2	722,04 a	907,24 a	1059,66 a	1438,86 a
V3	755,37 a	910,09 a	1045,71a	1456,08 a
V4	725,10 a	903,89 a	1056,30 a	1451,73 a

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Nota: Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem entre si estatisticamente, ao nível de 5% de significância, pelo teste de Skott Knott.

Sabe-se que o estresse hídrico pode se tornar um fator limitante para a produção de feijão. De acordo com Silva *et al.* (2019), a deficiência hídrica durante as fases iniciais de desenvolvimento pode resultar em perdas de produtividade que chegam a 50%. Segundo Silva (2019), a restrição hídrica no feijão-fava levou à diminuição da condutância estomática e da fotossíntese líquida, associada à adaptação morfológica das raízes e à queda no acúmulo de matéria seca.

Tabela 4 – Análise de variância resumida para as variáveis, número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP), número de vagens por planta (NVP), peso de raiz (PDR), peso parte área (PPA), massa de 100 grãos (MCG) e produtividade estimada (PRE). Uberaba -MG, 2024.

FV ¹	GL ₂	NGV	NGP	NVP	PDR (g)	PPA (g)	MCG	PRE (kg ha)
Déficits Hídrico	3	0,2013 ⁿ _s	0,2998 ⁿ _s	0,3341 ⁿ _s	0,4912 ⁿ _s	0,1033 ⁿ _s	0,4263 ⁿ _s	0,2753 ⁿ _s
CV ³ (%)	-	26,25	15,03	24,05	48,51	42,27	5,87	27,00
Média geral	-	5,93	129,77	22,44	1,72	34,13	29,19	7604

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Nota: ¹ fontes de variação; ² grau de liberdade; ³ coeficiente de variação; ^{ns} não significativo pelo teste F.

Contudo, o déficit aplicado neste estudo não foi capaz de prejudicar o desenvolvimento da cultura a ponto de causar prejuízos ao desenvolvimento do feijão e por fim da sua produção (Tabela 4). O déficit hídrico, geralmente considerado um estressor negativo para o crescimento das plantas, também pode apresentar efeitos positivos em certas condições. A resposta das plantas ao estresse é complexa e envolve adaptações fisiológicas e morfológicas que podem resultar em melhorias na

eficiência do uso da água e na resistência a estresses ambientais (CAMPOS *et al.*, 2018).

Quando submetidas a condições de escassez hídrica, as plantas podem ativar mecanismos de adaptação que promovem a tolerância ao estresse. Sob déficit hídrico, a síntese e o acúmulo de ácido abscísico (ABA) são intensificados no xilema, promovendo o fechamento estomático antes mesmo da redução grave no fluxo de água foliar. Em estudo com *Phaseolus vulgaris*, observou-se que esse mecanismo reduz a transpiração e preserva a umidade do solo, permitindo que a planta mantenha suas funções fisiológicas essenciais durante a seca (Trevo; Davies 1991) Segundo Kane e McAdam (2023), em angiospermas como o feijoeiro, a elevação do déficit de pressão de vapor induz rapidamente a síntese de ABA, promovendo o fechamento estomático mesmo antes da ocorrência de perdas significativas de água, o que contribui para a manutenção da homeostase hídrica sob condições adversas.

O déficit hídrico pode também estimular o crescimento das raízes. Segundo Santos *et al.* (2020), sob condições de escassez hídrica, as plantas tendem a desenvolver um sistema radicular mais profundo e extenso em busca de água, o que pode melhorar a absorção de nutrientes e aumentar a resiliência da planta a futuros períodos de estresse.

Outro efeito positivo do déficit é a melhoria na eficiência do uso da água (EUA). Segundo Silva *et al.* (2021), plantas que experimentam o déficit tendem a se tornar mais eficientes na absorção e utilização da água disponível. Em estudo com feijão-caupi, Souza *et al.* (2024) demonstraram que, ao aplicar lâminas de irrigação entre 80 e 100 % da ET_c via gotejamento pulsado, foi observado aumento tanto na produtividade quanto na eficiência hídrica em comparação ao sistema contínuo, confirmando a eficácia da fertirrigação pulsada para culturas sob déficit hídrico.

A aplicação dos déficits hídricos altera o uso da água e o custo da irrigação da lavoura (Tabela 5). No presente estudo, o período sem irrigação foi de apenas 7 dias aproximadamente, portanto não propiciaram diferenças substanciais entre os tratamentos, contudo, em relação ao consumo de água do pivô (simulado) a aplicação dos déficits propiciaria uma economia de 20.000 m³ de água durante o ciclo da cultura, sem alterar a produção da cultura, o que é ambientalmente útil, pois economizaria água, e sem prejudicar a produção da cultura. Além disso, embora a diferença seja pequena o custo da irrigação foi menor nos tratamentos com déficits, a economia ao final do ciclo dos tratamentos V2, V3 e V4 variaram de R\$5.880,00 a R\$7.000,00 reais.

Tabela 5 – Análise econômica descritiva de área hipotética de feijão irrigado sob os déficits estudados Uberaba -MG, 2024.

TRATAMENTOS	LÂMINA BRUTA NO CICLO (mm)	DIFERENÇA NO CICLO (mm)
S1	228	0
V2	207	21
V3	204	24
V4	203	25
CONSUMO ÁGUA NO CICLO (m³ ha)	CONSUMO DE ÁGUA PIVÔ (m³)	DIFERENÇA NO CICLO PIVÔ (m³)
2280	182400	0
2070	165600	16800
2040	163200	19200
2030	162400	20000
CUSTO DA IRRIGAÇÃO (ha)	CUSTO NO CICLO POR PIVÔ (80 ha)	DIFERENÇA POR PIVÔ NO CICLO (R\$)
R\$ 798,00	R\$ 63.840,00	R\$ 0,00
R\$ 724,50	R\$ 57.960,00	R\$ 5.880,00
R\$ 714,00	R\$ 57.120,00	R\$ 6.720,00
R\$ 710,50	R\$ 56.840,00	R\$ 7.000,00

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

A estratégia de irrigação com déficit hídrico controlado tem ganhado destaque como uma solução eficaz para aumentar a eficiência no uso da água em sistemas de pivô central. Além de reduzir o consumo de água, essa prática contribui para a diminuição dos custos operacionais, especialmente em regiões com tarifas elevadas de energia elétrica. Estudos apontam que o manejo do déficit hídrico deve ser cuidadosamente planejado para evitar perdas significativas na produtividade.

Silva *et al.* (2021) observaram que a aplicação de 75% da necessidade hídrica total da cultura do milho resultou em uma economia de água de 25%, com reduções de apenas 10% na produtividade. Isso demonstra que a irrigação com déficit hídrico pode ser uma alternativa viável em condições de escassez hídrica ou custos elevados de irrigação.

A cultura do feijão apresenta tolerância moderada ao estresse hídrico em determinadas fases fenológicas, como o estágio vegetativo, o que permite a aplicação de déficit sem grandes perdas de produtividade (Oliveira *et al.*, 2021). Estudos de Silva e Carvalho (2020) demonstraram que a redução de 20% na irrigação total durante a fase vegetativa do feijão resultou em economia de água de 25% e redução dos custos com energia em até 15%, mantendo perdas de produtividade abaixo de 8%. Esses

resultados reforçam a viabilidade econômica e ambiental do manejo com limitação hídrica.

Além disso, a adoção do manejo de déficit hídrico também está associada à sustentabilidade econômica e ambiental. Pereira *et al.* (2023) destacam que, além de economizar recursos hídricos, essa prática reduz a lixiviação de nutrientes, contribuindo para a conservação do solo e a proteção de corpos hídricos. Esse efeito é particularmente relevante em regiões onde o manejo inadequado da irrigação pode levar à contaminação por nitratos e outros compostos.

5 CONCLUSÃO

O déficit hídrico, independente do estágio, não interfere significativamente no desenvolvimento e produção do feijão-comum.

O método de Arnold foi o mais preciso em relação a predição dos estágios fenológicos do feijão-comum.

O déficit hídrico causado permite que ocorra economia de água e diminuição dos custos com a irrigação, sem perda na produtividade.

REFERÊNCIAS

AEGRO SOFTWARE DE GESTÃO RURAL. **Cigarrinha-verde: como combater essa praga do feijão**. Porto Alegre, RS: AEGRO, 2024. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/cigarrinha-verde/>. Acesso em: 2 dez. 2024.

AEGRO SOFTWARE DE GESTÃO RURAL. **Tecnologias para monitoramento de culturas**. Porto Alegre, RS: Aegro. 2024. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br>. Acesso em: 2 dez. 2024.

AGRORECEITA. **Quais são os principais desafios na cultura do feijão brasileiro?** Florianópolis, SC: Agroreceita, 2024. Disponível em: <https://agroreceita.com.br/cultura-do-feijao/>. Acesso em: 2 dez. 2024.

AGROSUSTENTAR. **Maiores produtores de feijão no Brasil**. São Paulo, SP: Agrosustentar, 2024. Disponível em: <https://agrosustentar.com.br/agronegocio/maiores-produtores-feijao-brasil/>. Acesso em: 1 jan. 2025.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Documento de irrigação e drenagem da FAO nº 56. Roma: **Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura**, v. 56, n. 97, p. e156, 1998.

ALMEIDA, J. C.; SILVA, T. R.; PEREIRA, F. R. Viabilidade econômica da irrigação em culturas de feijão. **Revista Brasileira de Agricultura**, v.12, n.3, p. 456-469, 2021.

ALMEIDA, R. B.; MORAIS, P. C. Mecanismos de adaptação ao estresse hídrico em leguminosas. **Revista de Biologia Tropical**, v. 68, n. 3, p. 321-335, 2020.

ALVAREZ V., H. V.; RIBEIRO, A. C. **Calagem**. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., H. V. (ed). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999.

ALVES, L. M.; CUNHA, F. L.; MACHADO, P. R. Sistemas de irrigação eficiente para o cultivo de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 4, 2022.

ARAÚJO, L. M. de. **Estimativa da evapotranspiração e coeficientes de cultura do feijão-caupi utilizando imagens orbitais**. 2022. 97 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2022. Disponível em: <https://rima.ufrrj.br/jspui/bitstream/20.500.14407/6105/1/Lais%20Mello.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2025.

ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v. 74, n.1 p. 430-445, 1959.

BAYER. **De olho nas principais pragas do feijão**. 2024. Disponível em: <https://www.agro.bayer.com.br/conteudos/de-olho-nas-principais-pragas-do-feijao>. Acesso em: 2 dez. 2024.

CAMPOS, A. J. M.; SANTOS, S. M.; NACARATH, I. R. Efeitos do déficit hídrico em plantas: uma revisão. **Plantas e Climas**, v. 12, n. 1, p. 55-66, 2018.

CARDOSO, G. A.; SANTANA, M. J. de; VAN KEMPEN, J. C. Métodos para cálculo de graus-dias para cultura do feijão-comum em função de lâminas de irrigação e adubação nitrogenada. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 48., 2019, Campinas. **Anais** [...]. Campinas: SBEA, 2019.

CARVALHO, A. J. **Desempenho técnico-econômico de sistemas intercalares do feijoeiro-comum em lavouras de café (*Coffea arabica*) adensado**. 2005. 187 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CNA BRASIL. **Feijão**. Disponível em: <https://cnabrazil.org.br/feijoes>. Brasília, DF: CNA, 2024. Acesso em: 1 jan. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília, DF: CONAB, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras>. Acesso em: 2 dez. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Último levantamento da safra 2023/2024 estima produção de grãos em 298,41 milhões de toneladas**. Brasília, DF: CONAB, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5728-ultimo-levantamento-da-safra-2023-2024-estima-producao-de-graos-em-298-41-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 2 dez. 2024.

COPERAGUAS. **Principais doenças do feijão**. 2021. Disponível em: <https://coperaguas.com.br/blog/2021/04/15/principais-doencas-feijao/> Acesso em: 2 dez. 2024.

CUSTÓDIO, C. C.; SALOMÃO, G. R.; MACHADO NETO, N. Estresse hídrico na germinação e vigor de sementes de feijão submetidas à diferentes soluções osmóticas. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 4, p. 617–623, 2009. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=195317450020>. Acesso em: 22 abr. 2025.

PAULA, A.C.P de. **Estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja e do feijoeiro pelo método da razão de bowen e pelo modelo SSEBop**. 2018. 88 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2018. Disponível em: <http://repositorio2.unb.br/handle/10482/32379> .Acesso em: 22 abr. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Feijão**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao>. Acesso em: 2 dez. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manejo da Irrigação do Feijoeiro considerando critérios técnicos e econômicos em ambiente de Cerrado**. Planaltina, DF: EMBRAPA, 2008. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/571891/1/bolpd221.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Recomendações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) nas regiões Norte e Nordeste do Brasil**. Santo Antonio de Goiás, GO: EMBRAPA, 2011. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/916406/1/CIRCTECNICA89.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2024.

FERREIRA, A. G.; LIMA, V. H. Eficácia do uso da água em cultivos de feijão sob estresse. **Agricultura e Meio Ambiente**, v. 30, n. 4, p. 450-460, 2021.

FUSCALDI, K. da C.; PRADO, G. R. Análise econômica da cultura do feijão. **Revista de Política Agrícola**. 2005. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/download/527/477>. Acesso em: 1 jan. 2025.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applying Engineering Agriculture**, v.2, n.1, p. 96-99. 1985.

HOFFMANN JÚNIOR, L.; RIBEIRO, N. D.; ROSA, S. S. da; JOST, E.; POERSCH, N. L.; MEDEIROS, S. L. P. Resposta de cultivares de feijão à alta temperatura do ar no período reprodutivo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 6, p. 1543–1548, nov.–dez. 2007. DOI: 10.1590/S0103-84782007000600006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal**. Rio de Janeiro, RJ:IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em: 1 jan. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores climáticos e impacto no cultivo do feijão**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção de feijão no Brasil: integração à agricultura familiar**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2006. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/663541/1/comt173.pdf>. Acesso em: 1 jan. 2025.

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Melhoramento genético do feijão**. IFSC, 2023.

KANE, C. N.; McADAM, S. A. M. Abscisic acid driven stomatal closure during drought in anisohydric *Fagus sylvatica*. **Journal of Plant Hydraulics**, v. 9, e-002, 2023.

LANDAU, E. C.; MOURA, L. **Evolução da produção de feijão (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae)**. In: LANDAU, E. C. (ed.). Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Cap. 23. Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1122676/1/Cap23-EvolucaoProducaoFeijao.pdf>. Acesso em: 1 jan. 2025.

LEAL, F. T.; NUNES, H. D.; COELHO, A. P.; FILLA, V. A.; SANTIS, F. P. de; MORELLO, O. F.; LEMOS, L. B. Selection of common bean cultivars for the irrigated production system. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 11, p. 882–891, 2023.

LINDSEY, A. A.; NEWMAN, J. E. Use of official weather data in springtime temperature analysis of an Indiana phenological record. **Ecology**, v. 37, n. 4, p. 812–813, 1956.

MIRANDA, M. N.; CAMPELO JÚNIOR, J. H. Soma térmica para o subperíodo semeadura-maturação de feijão cv. Carioca em Colorado do Oeste. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 2, p. 180–185, 2010.

MIORINI, M. S.; SAAD, J. C. C. Produtividade e supressão hídrica em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 6, n. 4, p. 253–262, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/123172>. Acesso em: 9 jul. 2025.

NHANOMBE, E. A. L. P. **Efeitos de restrição hídrica em feijoeiro cultivado em plantio direto e convencional**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019. Disponível em: <<https://locus.ufv.br/items/de155d8d-503f-4af3-aa6d-c365af2f47ab>>. Acesso em: 20 de junho de 2025.

SILVA, A. O. da; SILVA, B. A. da; SOUZA, C. F.; AZEVEDO, B. M. de; BASSOI, L. H.; VASCONCELOS, D. V.; BONFIM, G. V. do; JUAREZ, J. M.; SANTOS, A. F. dos; CARNEIRO, F. M. Irrigation in the age of agriculture 4.0: management, monitoring and precision. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 51, n. 5 (supl.), e20207695, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348776299_Irrigation_in_the_age_of_agriculture_40_management_monitoring_and_precision. Acesso em: 9 jul. 2025.

OLIVEIRA, M.; SANTOS, J.; SILVA, T. Irrigação com déficit hídrico controlado na produção de feijão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 210–222, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/gJSxzhKTskkBsBg9wmHhKG/>. Acesso em: 9 jul. 2025.

OLIVEIRA, M.; SILVA, J. R.; SANTOS, L. F. Temperaturas ótimas para o desenvolvimento inicial do feijão. **Revista Brasileira de Fitotecnia Tropical**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 87–99, 2022. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/490418/1/Circ86.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2025.

OLIVEIRA, P. H.; SILVA, J. A. Custo da irrigação e sua relação com a eficiência do uso da água. **Agricultural Economics Review**, v. 14, n. 1, p. 78–85, 2019.

Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/490418/1/Circ86.pdf>.

Acesso em: 9 jul. 2025.

OLIVEIRA, T. S. ALVES, L. M.; CUNHA, F. L.; MACHADO, P. R. Comportamento de plantas em resposta ao déficit hídrico. **Revista Brasileira de Horticultura**, v. 15, n. 1, p. 101–108, 2020. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rceres/a/wKhf8dPBf3RBQN8VZhcNj9c/>. Acesso em: 9 jul.

2025.

OMETTO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: **Agronômica Ceres** 1981. 440p.

PEREIRA, F. L. *et al.* Cultivares resistentes e a produção de feijão no Brasil. **Revista de Agricultura**, 2022.

PEREIRA, F.; SOUZA, D.; MOURA, E. Internet das coisas e sistemas de irrigação: inovações tecnológicas no manejo hídrico. **Tecnologia Rural**, v. 7, n. 1, p. 85-94, 2023.

PEREIRA, F.; SOUZA, D.; MOURA, E. Qualidade de grãos e manejo da irrigação em pivôs centrais. **Ciência Agrária**, v. 20, n. 2, p. 95-104, 2023.

PEREIRA, P. A. A. Evidências de domesticação e disseminação do feijoeiro comum e consequências para o melhoramento genético da espécie. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 25, n. 1, p. 19-23, 1990.

PEREIRA, T. J.; MARTINS, A. L. Manejo hídrico em cultivos de feijão: práticas e resultados. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 17, n. 1, p. 112-120, 2022.

PONCIANO, V. F. G.; PONCIANO, I. M.; VALICHESKI, R. R.; OLIVEIRA, S. S. C.; CRUZ, S. J. S.; VIEIRA FILHO, W. C. Retenção da água no solo sob diferentes adubos verdes como cobertura vegetal em Neossolo Litólico Distrófico. **Ciência Agrícola**, v. 20, n. 2, p. 1–9, 2022.

RENATO, N. dos S.; SILVA, J. B. L.; SEDIYAMA, G. C.; PEREIRA, E. G. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 382–388, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000400009>. Acesso em: 22 abr. 2025.

SANTANA, M.J.; CARVALHO, J.A.; ANDRADE, M. J. B. de; BRAGA, J. C.; GERVÁSIO, G. G. Coeficiente de cultura e análise do rendimento do feijoeiro sob regime de irrigação. **Irriga**, v. 13, n. 1, p. 92-112, 2008.