

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS CERES
BACHARELADO EM AGRONOMIA
THIAGO DO NASCIMENTO BORGES MARQUES**

**DOSES DE ÓXIDO DE GRAFENO NOS FATORES BIOFÍSICOS DO FEIJOEIRO-
COMUM**

**CERES – GO
2025**

THIAGO DO NASCIMENTO BORGES MARQUES

**DOSES DE ÓXIDO DE GRAFENO NOS FATORES BIOFÍSICOS DO FEIJOEIRO-
COMUM**

Trabalho de curso apresentado ao curso de Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Agronomia, sob orientação do Prof. Dr. Henrique Fonseca Elias de Oliveira.

**CERES – GO
2025**

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

M357d Marques, Thiago do Nascimento Borges
DOSES DE ÓXIDO DE GRAFENO NOS FATORES
BIOFÍSICOS DO FEIJOEIRO-COMUM / Thiago do
Nascimento Borges Marques. Ceres 2025.

27f. il.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Fonseca Elias de Oliveira.
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0320024 -
Bacharelado em Agronomia - Ceres (Campus Ceres).
1. Feijão. 2. Taxa Fotossintética. 3. Irrigação. 4. Nanomaterial. I.
Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem resarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- Tese (doutorado) Artigo científico
 Dissertação (mestrado) Capítulo de livro
 Monografia (especialização) Livro
 TCC (graduação) Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Thiago do Nascimento Borges Marques

Matrícula:

2021103200240235

Título do trabalho:

Doses de óxido de grafeno nos fatores biofísicos do feijoeiro-comum

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 12 /12 /2025

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
gov.br THIAGO DO NASCIMENTO BORGES MARQUES
Data: 04/12/2025 15:43:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ceres
Local

04 / 12 / 2025
Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Documento assinado digitalmente
gov.br HENRIQUE FONSECA ELIAS DE OLIVEIRA
Data: 04/12/2025 19:49:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Cliente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

ANEXO IV - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao(s) 26 dia(s) do mês de novembro do ano de dois mil e Vinte e cinco realizou-se a defesa de Trabalho de Curso do(a) acadêmico(a) Thiago do Nascimento Borges Marques, do Curso de Bacharelado em Agronomia, matrícula 2021103200240235, cujo título é “Doses de grafeno nos fatores biofísicos do feijoeiro-comum.”

”. A defesa iniciou-se às 13 horas e 30 minutos, finalizando-se às 15 horas e 10 minutos. A banca examinadora considerou o trabalho APROVADO com média 6,9 no trabalho escrito, média 7,7 no trabalho oral, apresentando assim média aritmética final 7,3 de pontos, estando o(a) estudante APTO para fins de conclusão do Trabalho de Curso.

Após atender às considerações da banca e respeitando o prazo disposto em calendário acadêmico, o(a) estudante deverá fazer a submissão da versão corrigida em formato digital (.pdf) no Repositório Institucional do IF Goiano – RIIF, acompanhado do Termo Ciência e Autorização Eletrônico (TCAE), devidamente assinado pelo autor e orientador.

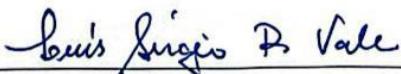
Os integrantes da banca examinadora assinam a presente.



Assinatura Presidente da Banca



Assinatura Membro 1 Banca Examinadora



Assinatura Membro 2 Banca Examinadora

Dedico este trabalho a Deus, fonte de força e sabedoria, aos meus pais, por cada sacrifício e gesto de amor, à minha família e amigos, por acreditarem em mim e tornarem esta conquista possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder o dom da vida, saúde, sabedoria e força para enfrentar e superar cada desafio durante esta jornada acadêmica.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, pela oportunidade de cursar o ensino superior em uma instituição de excelência, que proporcionou conhecimento, experiências e crescimento pessoal e profissional.

Ao corpo docente do IF Goiano – Campus Ceres, pela dedicação, paciência e por compartilharem seus saberes, contribuindo significativamente para minha formação.

Ao professor Dr. Jhon Lennon Bezerra da Silva, pela coorientação, incentivo constante, confiança, ensinamentos e contribuições durante o desenvolvimento deste trabalho e em toda a trajetória de iniciação científica.

Ao professor Dr. Henrique Fonseca Elias de Oliveira, pela orientação, apoio, conselhos e importantes ensinamentos que contribuíram para meu aprendizado e amadurecimento profissional.

À minha família, especialmente aos meus pais Cristiane do Nascimento Borges Marques e Junio Marques de Souza, pelo amor, esforço, incentivo e exemplo de dedicação, que foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À minha companheira, pelo carinho, compreensão e apoio em todos os momentos, e aos amigos e colegas que estiveram ao meu lado, compartilhando desafios, conquistas e aprendizados ao longo dessa caminhada.

Por fim, expresso meus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal, e para a concretização deste trabalho, especialmente os amigos Gabriel Batista Sousa, Luiz Enrick Rocha de Lima, Matheus Augusto Vieira Gomes, Aleksander Samuel Fidelis Pereira e Rangell Martins Gontijo.

*“Quanto mais me aprofundo na ciência mais me
aproximo de Deus”.*

Albert Einstein

RESUMO

O uso do óxido de grafeno tem despertado interesse na agricultura como estimulador do crescimento vegetal e componente de fertilizantes. Objetivou-se investigar doses e épocas e aplicação de óxido de grafeno nas respostas fisiológicas e morfológicas durante o desenvolvimento inicial do feijoeiro-comum irrigado. O ensaio em casa de vegetação foi realizado nas instalações do IF Goiano - Campus Ceres, entre o período de outubro a dezembro de 2023. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em arranjo fatorial com parcelas subdivididas de 2x5, com quatro repetições, sendo: duas fases fenológicas (V3 e R5) e cinco doses de óxido de grafeno (0, 250, 500, 750 e 1000 g ha⁻¹). Foram realizadas análises fisiológicas e morfológicas, incluindo trocas gasosas, teor de clorofila; altura de planta, diâmetro de caule no terço médio, número de galhos, distância entre nó, massa seca da parte aérea e da raiz. Nas diferentes doses e épocas de aplicação, o óxido de grafeno não promoveu efeitos morfológicos expressivos no desenvolvimento inicial do feijoeiro, exceto pela interação fase × dose na massa fresca de raiz. Contudo, houve respostas fisiológicas pontuais, como aumento de 20,27% na fotossíntese e redução de 15,11% na transpiração. Assim, o óxido de grafeno demonstrou sensibilidade fisiológica, mas sem gerar benefícios agronômicos consistentes.

Palavras-chave: Feijão; Taxa Fotossintética; Irrigação; Nanomaterial.

ABSTRACT

The use of graphene oxide has attracted interest in agriculture as a plant growth stimulator and fertilizer component. The objective was to investigate doses, timing, and application of graphene oxide on physiological and morphological responses during the initial development of irrigated common beans. The greenhouse trial was conducted at the IF Goiano - Ceres Campus facilities between October and December 2023. The experimental design was randomized blocks, in a factorial arrangement with 2x5 subdivided plots, with four replicates, namely: two phenological stages (V3 and R5) and five doses of graphene oxide (0, 250, 500, 750, and 1000 g ha⁻¹). Physiological and morphological analyses were performed, including gas exchange, chlorophyll content, plant height, stem diameter in the middle third, number of branches, distance between nodes, and dry mass of the aerial part and root. At different doses and application times, graphene oxide did not promote significant morphological effects on the initial development of the bean plant, except for the phase × dose interaction in fresh root mass. However, there were specific physiological responses, such as a 20.27% increase in photosynthesis and a 15.11% reduction in transpiration. Thus, graphene oxide demonstrated physiological sensitivity but did not generate consistent agronomic benefits.

Keywords: Bean; Photosynthetic Rate; Irrigation; Nanomaterial.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – A) Irrigação localizada (gotejador marca Irritec, vazão 2 l h-1); B) Vista do experimento.....	7
Figura 2 – Dados de evapotranspiração da cultura obtida a partir do Tanque Classe A instalado no interior da casa de vegetação.....	8
Figura 3 – Temperatura máxima e mínima (°C) e umidade máxima (%) no interior da casa de vegetação, ao longo do período experimental.....	9
Figura 4 – Condutância estomática para doses de óxido de grafeno e épocas de aplicação na cultura do feijoeiro comum.....	18
Figura 5 – Déficit de pressão de vapor para doses de óxido de grafeno e épocas de aplicação na cultura do feijoeiro comum.....	19
Figura 6 – Temperatura foliar obtida com a câmera termográfica Compact Thermal Imaging, Flir CX - Series® em plantas de feijoeiro comum submetida a doses de óxido de grafeno, aplicados em distintas fases fenológicas.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do solo utilizado para a experimentação.....	5
Tabela 2 – Análise de variância das características morfológicas do feijoeiro comum submetido a diferentes doses de óxido de grafeno aplicadas nas fases V3 e R5.....	11
Tabela 3 – Altura de plantas, comprimento de raiz, massa fresca de parte aérea e massa fresca de raiz para diferentes doses de óxido de grafeno e épocas de aplicação na cultura do feijoeiro comum.....	12
Tabela 4 – Análise de variância das características fisiológicas do feijoeiro comum submetido a diferentes doses de óxido de grafeno aplicadas nas fases V3 e R5.....	14
Tabela 5 – Temperatura foliar, fotossíntese líquida, transpiração e teor relativo de clorofila (SPAD) para diferentes doses de óxido de grafeno e épocas de aplicação na cultura do feijoeiro comum.....	17

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
REVISÃO DE LITERATURA	3
MATERIAL E MÉTODOS	5
RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
CONCLUSÃO	21
REFERÊNCIAS.....	22

INTRODUÇÃO

Nos últimos 20 anos a nanotecnologia tem promovido uma revolução significativa no campo científico e tecnológico (Malik *et al.*, 2023). Esta ciência concentra-se na criação e manipulação de estruturas em escala atômica e nanométrica, resultando em avanços expressivos e aplicações inovadoras.

Entre esses avanços, destaca-se o uso do grafeno na formulação de fertilizantes, que tem demonstrado potencial para minimizar perdas e ampliar a disponibilidade de nutrientes às plantas, reforçando a importância de aprofundar as pesquisas sobre a aplicação de nanomateriais em culturas de elevado valor econômico (May *et al.*, 2021).

Este nanomaterial pode ser empregado como promotor do crescimento de plantas e aditivo em fertilizantes (May *et al.*, 2021; May *et al.*, 2024), atuar como agente antifúngico e antibacteriano (Chen *et al.*, 2016; Gottardo *et al.*, 2023), além de ser utilizado em sistemas de nanoencapsulação e liberação controlada de compostos (Ferrari *et al.*, 2022)

Dentre as culturas anuais cultivadas em maior escala o feijoeiro é uma das mais sensíveis ao déficit hídrico e dado a sua relevância no cenário agrícola brasileiro torna-se ainda mais urgente a busca por tecnologias inovadoras que aprimorem sua performance produtiva, tais como o uso do óxido de grafeno. Essa sensibilidade pode estar relacionada ao ciclo curto e seu metabolismo (Oliveira, 2025; Silva; Heinemann, 2025). Portanto, o manejo incorreto da irrigação gera grandes desperdícios de água e nutrientes por excessos ou déficits, que impactam diretamente na produtividade (Stone; Silveira, 2023; Kraeski *et al.*, 2021).

O cultivo do feijão -comum desempenha um papel significativo no contexto agrícola do Brasil. Além de ser um dos principais grãos comercializados o feijoeiro-comum também possui um papel fundamental na dieta alimentar da população brasileira (Silva; Heinemann, 2025; CONAB, 2024).

Considerando que a fotossíntese atua como principal fonte de carbono e energia necessários para a síntese de compostos orgânicos que impulsionam o crescimento e desenvolvimento das plantas (Codreanu *et al.*, 2025; Cao *et al.*, 2025), o uso de nanomateriais que possam potencializar esse processo torna-se ainda mais relevante. Inúmeras pesquisas foram realizadas visando à intensificação dos processos relacionados à atividade fotossintética (Tong *et al.*, 2023; Singh; Das, 2024; RSC, 2024). Estas

estratégias se mostram promissoras e podem contribuir para o aumento da produção agrícola mundial.

Objetivou-se investigar o potencial da tecnologia baseada em óxido de grafeno nas respostas fisiológicas e morfológicas, no desenvolvimento inicial do feijoeiro-comum irrigado, em função de diferentes doses e épocas de aplicação.

REVISÃO DE LITERATURA

A nanotecnologia tem se consolidado como uma das áreas mais promissoras da ciência contemporânea, permitindo a manipulação de materiais em escala nanométrica (1–100 nm) e possibilitando aplicações inovadoras em diversos setores, incluindo a agricultura. Desde a década de 2000, o Brasil tem investido em redes de pesquisa voltadas para o desenvolvimento de nanomateriais aplicados ao agronegócio, com destaque para o grafeno e seus derivados (Silva et al., 2023).

O grafeno, descoberto por Geim e Novoselov em 2004, é um alótropo do carbono constituído por uma única camada bidimensional de átomos organizados em rede hexagonal. Sua estrutura confere propriedades físico-químicas únicas, como elevada condutividade elétrica, alta resistência mecânica e grande área superficial, características que o tornam atrativo para aplicações agrícolas (Geim; Novoselov, 2004).

Entre os derivados, o óxido de grafeno (OG) destaca-se por apresentar maior escalabilidade e menor custo de produção em comparação ao grafeno puro. Além disso, seus grupos funcionais oxigenados (-OH, -COOH, -O-) conferem alta dispersibilidade em água e capacidade de interação com tecidos vegetais, favorecendo seu uso em sistemas de liberação controlada de nutrientes e defensivos (May et al., 2021).

Estudos recentes demonstram que nanomateriais à base de grafeno podem atuar como bioestimuladores do crescimento vegetal, promovendo aumento da germinação, desenvolvimento radicular e eficiência fotossintética em diferentes culturas. Cao et al. (2025) observaram que concentrações de 10–20 mg L⁻¹ de OG estimularam significativamente o crescimento de *Artemisia annua*. Resultados semelhantes foram relatados em milho e arroz, onde doses baixas (<50 mg L⁻¹) favoreceram o desenvolvimento inicial (Chen et al., 2021; Shen et al., 2018).

Por outro lado, concentrações elevadas de OG podem induzir fitotoxicidade, manifestada por necrose foliar, acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS) e inibição do crescimento radicular. Esses efeitos adversos reforçam a necessidade de estabelecer faixas seguras de aplicação, considerando a variabilidade entre espécies e condições ambientais (Begum et al., 2011).

A ação bioestimuladora do OG em baixas doses é multifatorial, e os mecanismos propostos envolvem principalmente a interação físico-química com a semente e a modulação fisiológica interna. Primeiramente, as nanoestruturas do OG podem penetrar a epiderme da semente, e a combinação de seus grupos funcionais oxigenados

(hidrofílicos) e suas regiões de carbono (hidrofóbicas) facilita a absorção e o transporte de água para o embrião, acelerando a hidratação e a ativação metabólica (Zhang et al., 2015). Em um nível molecular, o OG parece atuar como um regulador fisiológico, promovendo o aumento da atividade de enzimas antioxidantes (como SOD e CAT) em doses ótimas para manter o equilíbrio celular, além de influenciar positivamente a expressão gênica de hormônios relacionados ao crescimento (como as auxinas), o que resulta na intensificação do crescimento radicular e foliar (Park et al., 2020).

Na agricultura, o grafeno e seus derivados vêm sendo explorados em diferentes frentes: Fertilizantes nanoestruturados de liberação controlada, que aumentam a eficiência no uso de nutrientes e reduzem perdas ambientais (Hammerschmidt et al., 2023); Agentes antimicrobianos, com ação antifúngica e antibacteriana, minimizando a propagação de patógenos (Romero et al., 2020); Sistemas de nanoencapsulação, que permitem a liberação gradual de compostos ativos e a entrega de biomoléculas (Chen et al., 2022; Kabiri et al., 2017); Remediação ambiental, pela elevada capacidade de adsorção de contaminantes como metais pesados e herbicidas em ambientes aquosos (kemp, 2013; Karthik et al., 2021).

No contexto brasileiro, pesquisas recentes destacam o potencial do grafeno para culturas de alto valor econômico, como o feijão e o algodão, reforçando sua relevância para a sustentabilidade e competitividade do agronegócio nacional (May et al., 2021; Santos, 2025).

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em casa de vegetação, na área experimental do Instituto Federal Goiano - Campus Ceres, em Ceres - GO, nas coordenadas geográficas 15° 20' 59.85"S e 49° 35' 54.61"W, com uma altitude de 580 metros. O clima local é Aw de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado por um inverno seco e um verão chuvoso (Alvares *et al.*, 2013). A temperatura média anual é de 25 °C e a média anual de precipitação ultrapassa 1500 mm (Lima *et al.*, 2022). O solo utilizado foi classificado como Nitossolo Vermelho Eutrófico, de grande profundidade e textura argilosa, conforme classificação de Santos *et al.* (2018). As características químicas e físicas do solo são apresentadas na Tabela 1 destacando-se a textura argilosa, o pH adequado e o teor de fósforo de 3,1 mg dm⁻³, considerado baixo para a maioria das culturas anuais. Como o solo apresentou pH 7,0, não houve acidez a ser corrigida; portanto, optou-se por não utilizar calcário, mantendo-se o solo em sua condição original.

O experimento foi realizado em vasos de 10L e em casa de vegetação no Instituto Federal Goiano – Campus Ceres.

Tabela 1 – Características do solo utilizado para a experimentação.

Areia	Silte g/kg	Argila g/kg	pH em H ₂ O	M.O. g/dm ³	Ca g/dm ³	Mg g/dm ³	Al cmol _c /dm ³	H+Al cmol _c /dm ³	K mg/dm ³	T mg/dm ³	K mg/dm ³	P mg/dm ³	V %	m
397	119	484	7,0	8,6	3,5	1,3	0,0	1,4	0,2	3,1	60,8	3,1	77,97	0,00

M.O.= Método colorimétrico; P e K= Mehlich⁻¹; Ca, Mg e Al= Kcl 1 mol/L⁻¹; H + Al= Tampão SMP a pH 7,5; SB – Soma de bases= Ca + Mg + K; T – Capacidade total de troca de cátions= Ca + Mg + K + H + Al; t – Capacidade efetiva de troca de cátions= SB + Al; V – Saturação por bases= 100*SB/T; m – Saturação por alumínio= 100 *Al/ t.

Fonte: Laboratório de solos – IF Goiano - Campus Ceres.

O experimento foi realizado em delineamento em blocos casualizados, em arranjo fatorial com parcelas subdivididas (2x5) e 4 repetições, sendo avaliadas duas fases fenológicas (V3 e R5) e cinco doses de óxido de grafeno (0, 250, 500, 750 e 1000 g ha⁻¹). As doses foram aplicadas via pulverização nas respectivas fases.

A escolha das fases V3 e R5 fundamentou-se na importância fisiológica desses estádios no desenvolvimento do feijoeiro comum. A fase V3 corresponde ao terceiro nó visível, período marcado por intensa atividade vegetativa, expansão foliar e estabelecimento do sistema radicular. Segundo a Embrapa (2025), os estádios vegetativos iniciais (V0–V4) são determinantes para o vigor da planta e para a sustentação do ciclo

reprodutivo, pois envolvem o aumento da capacidade fotossintética e a consolidação da absorção de água e nutrientes.

Já a fase R5 representa o início do enchimento de grãos, etapa crítica em que a planta apresenta elevada demanda metabólica, sensibilidade a estresses e grande influência na produtividade final. Guias técnicos reforçam que o manejo inadequado nesse período compromete severamente o rendimento, uma vez que o enchimento de grãos depende da eficiência fotossintética e da translocação de assimilados (Rehagro, 2021; Aegro, 2020).

Dessa forma, a avaliação nessas duas fases permite compreender os efeitos do óxido de grafeno tanto no crescimento vegetativo quanto no desempenho reprodutivo, apoiando-se em evidências científicas que destacam V3 como fase-chave para o vigor inicial e R5 como determinante na produtividade final.

O produto utilizado foi óxido de grafeno (OG), comercializado como “grafeno agrícola” e fornecido pela empresa Agrografeno. O material apresenta grupos funcionais oxigenados ($-COOH$, $-O-$, $-OH$), característicos do OG, que conferem elevada dispersão em água e capacidade de interação com tecidos vegetais e nutrientes. Esses atributos justificam seu uso em estudos agronômicos, visto que o OG pode atuar modulando processos fisiológicos, disponibilidade de nutrientes e respostas metabólicas das plantas. A calda de pulverização foi preparada na concentração correspondente às doses testadas, utilizando volume de calda de 300 L ha^{-1} , aplicada com pulverizador manual do tipo pressurizado, mantendo-se pressão constante e padrão uniforme de deposição foliar.

Instalou-se um sistema de irrigação por gotejamento com gotejadores de vazão de $2,0\text{ l h}^{-1}$ considerando-se uma eficiência de 80% (Figura 1A e 1B). A irrigação foi realizada considerando a evapotranspiração da cultura, obtidos pelo método do Tanque Classe A (Figura 2) e com o Kc da cultura, conforme recomendado por Albuquerque e Coelho (2021).

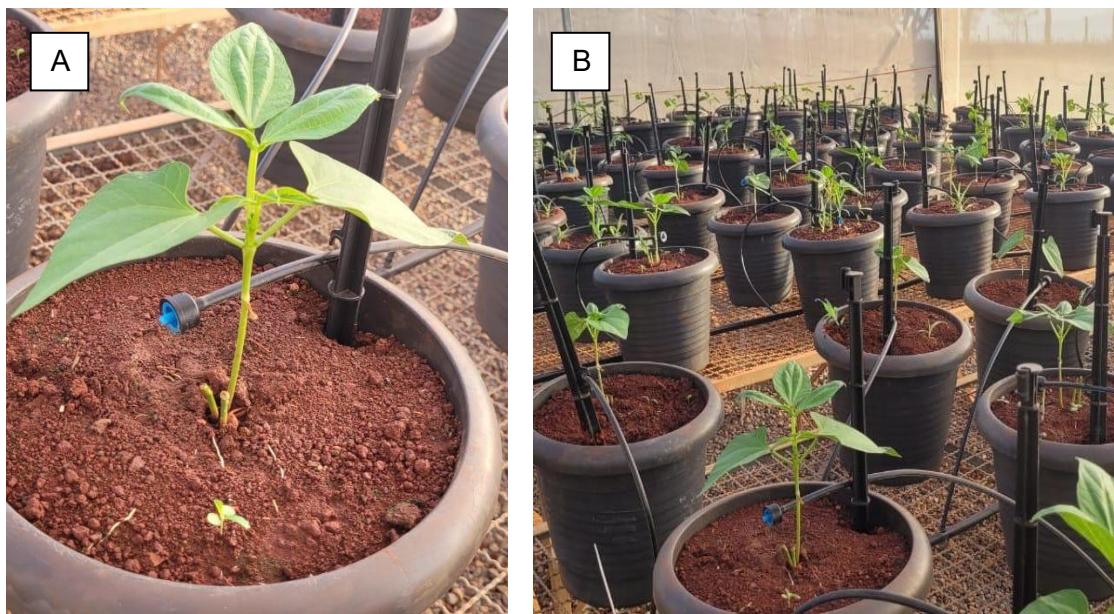


Figura 1– A) Irrigação localizada (gotejador marca Irritec, vazão $2,0 \text{ L h}^{-1}$); B) Vista geral do experimento.

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

A análise da evapotranspiração da cultura ao longo dos dias após a semeadura evidencia que a demanda hídrica do feijoeiro não se manteve constante, mas variou de acordo com o desenvolvimento fenológico e as condições ambientais da casa de vegetação. Nos estágios iniciais, os valores reduzidos refletem a baixa área foliar e a menor atividade fisiológica das plantas recém-estabelecidas. Com o avanço da fase vegetativa, observa-se um incremento gradual da evapotranspiração, associado ao aumento da biomassa aérea e da atividade fotossintética, culminando em maior transpiração e absorção de água.

No início da fase reprodutiva, a curva apresenta oscilações mais acentuadas, que podem estar relacionadas à transição entre a fase de crescimento vegetal e floração. Tais variações indicam que a evapotranspiração não seguiu um padrão linear, mas foi modulada por fatores ambientais internos e pela própria fisiologia da planta.



DIAS APÓS A SEMEADURA (DAS)

Figura 2 –Evapotranspiração da cultura obtida a partir Eto calculada pelo método do Tanque Classe A, instalado no interior da casa de vegetação.

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Com auxílio de um termo-higrômetro digital (Inconterm, modelo 7664.01.0.00[®], faixa de temperatura externa: -50°C a +70°C ±1°C; faixa de umidade: 10% a 99% ±5%) foram coletados diariamente dados referentes a temperatura (máxima e mínima) e umidade do ar (máxima).

A variação das condições microclimáticas observadas na Figura 3 evidencia o comportamento térmico e hídrico típico de ambientes protegidos. A temperatura máxima manteve-se elevada e relativamente estável ao longo do ciclo, enquanto a temperatura mínima apresentou menor amplitude, refletindo o efeito de amortecimento térmico proporcionado pela estrutura da estufa. A umidade máxima, por sua vez, oscilou de forma mais acentuada, sugerindo influência direta da ventilação, da irrigação e da densidade foliar crescente. Esses dados são fundamentais para compreender o ambiente em que se desenvolveu o feijoeiro, pois afetam diretamente processos fisiológicos como transpiração, fotossíntese e absorção de nutrientes.

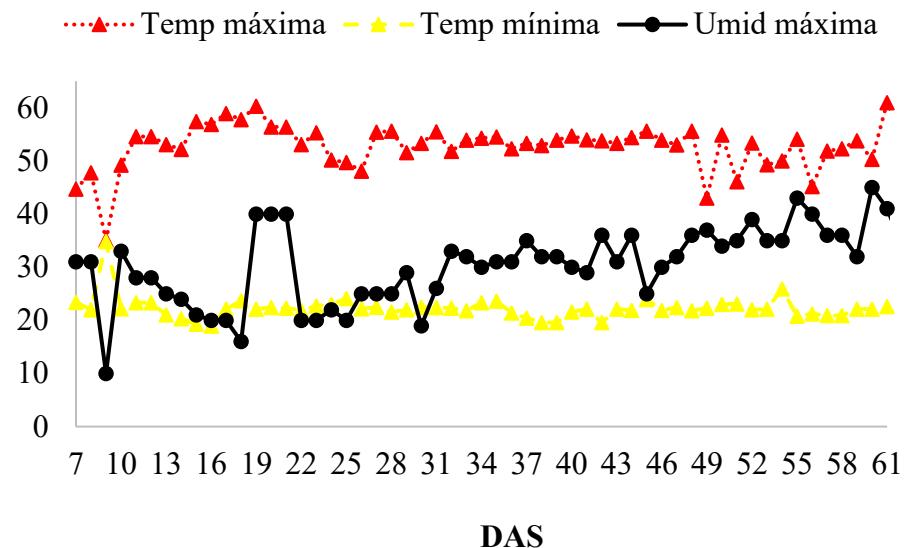


Figura 3 – Temperatura máxima e mínima ($^{\circ}\text{C}$) e umidade máxima (%) no interior da casa de vegetação, ao longo do período experimental.

DAS: Dias após sementeira.

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

A sementeira foi realizada manualmente em vasos de 10 L com três sementes por vaso, dispostas a 3 cm de profundidade. O desbaste foi efetuado 10 dias após a sementeira (DAS), retirando-se duas plantas e mantendo a mais vigorosa.

Nas análises morfológicas foram avaliados parâmetros estruturais que indicam o crescimento e o vigor das plantas. A altura de planta foi medida do colo até o ápice do caule, refletindo o desenvolvimento vegetativo e o alongamento celular. O diâmetro do caule, determinado no terço médio, permitiu avaliar a robustez e a capacidade de sustentação da planta, além de indicar possíveis alterações no transporte de água e fotoassimilados.

O número de ramos foi contabilizado para caracterizar o padrão de ramificação, o qual está diretamente relacionado à arquitetura da planta e ao potencial de formação de estruturas reprodutivas. A distância entre nós foi mensurada como indicador do ritmo de crescimento, revelando possíveis efeitos do tratamento sobre a emissão foliar.

A massa seca da parte aérea (folhas, caule e ramificações) e a massa seca da raiz foram determinadas após secagem em estufa, representando o acúmulo efetivo de biomassa e a eficiência fisiológica da planta. Essas variáveis são fundamentais para compreender como o tratamento influenciou o crescimento tanto do sistema aéreo quanto do sistema radicular (Kotz-Gurgacz et al., 2018; Leal et al., 2019; Portes et al., 2022; Hayashibara et al., 2022).

As análises fisiológicas foram realizadas em folhas sadias localizadas no terço superior da planta, mais precisamente na folha central do último trifólio totalmente expandido, uma semana após a aplicação do óxido de grafeno em cada fase fenológica. As trocas gasosas foram determinadas por meio da fotossíntese líquida, transpiração, condutância estomática, temperatura foliar e déficit de pressão de vapor, utilizando um analisador portátil de gases (IRGA, modelo BioCID 340 Handheld Photosynthesis System®, com câmara de 6,25 cm²). O teor relativo de clorofila (SPAD) foi obtido com o aparelho SPAD-502Plus® (Xiao *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022).

Foram realizadas três leituras por folha com o IRGA. Para o teor relativo de clorofila (SPAD) foram avaliadas duas plantas por parcela, com seis leituras por folha, distribuídas ao longo do limbo foliar para uma média representativa, sempre entre 8h e 11h (Trindade, 2020). Após as avaliações com o IRGA, na fase fenológica R5, a temperatura foliar também foi avaliada com uma câmera termográfica (FLIR, modelo Compact Thermal Imaging, Flir CX - Series® (Aragão *et al.*, 2023).

Os dados obtidos foram submetidos a análises estatísticas (Teste F) e as médias comparadas pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, utilizando o software SISVAR®, versão 5.6.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância apresentada na Tabela 2 indica que nenhuma das características morfológicas avaliadas foi influenciada de forma significativa pela fase fenológica ou pelas doses de óxido de grafeno, com exceção da interação fase × dose para a variável massa fresca de raiz (MFR), que apresentou significância a 5%. Isso demonstra que, de maneira geral, o óxido de grafeno não promoveu alterações expressivas na altura de plantas, diâmetro de caule, número de ramos, número de nós, comprimento ou volume de raiz, massa fresca de parte aérea, massa seca de parte aérea e massa seca de raiz.

Dessa forma, os resultados sugerem que o tratamento com óxido de grafeno não exerceu efeito consistente sobre a morfologia da cultura, com resposta restrita à massa fresca de raiz quando considerada a interação entre fase e dose, corroborando achados de Oliveira (2024), em que também não foram observadas alterações morfológicas expressivas em feijoeiro comum tratado com óxido de grafeno.

Tabela 2 – Análise de variância das características morfológicas do feijoeiro comum submetido a diferentes doses de óxido de grafeno aplicadas nas fases V3 e R5.

Fonte de variação	AP	DC	NR	NN	CR	VR	MFA	MFR	MSA	MSR
Fase	0,8769 ^{ns}	0,3882 ^{ns}	0,1043 ^{ns}	0,6945 ^{ns}	0,2647 ^{ns}	0,5644 ^{ns}	0,3203 ^{ns}	0,7708 ^{ns}	0,2317 ^{ns}	0,9868 ^{ns}
Erro A										
Dose	0,5019 ^{ns}	0,9202 ^{ns}	0,6189 ^{ns}	0,6533 ^{ns}	0,1223 ^{ns}	0,8153 ^{ns}	0,2319 ^{ns}	0,9193 ^{ns}	0,4733 ^{ns}	0,7878 ^{ns}
Fase × Dose	0,5803 ^{ns}	0,4199 ^{ns}	0,6160 ^{ns}	0,3605 ^{ns}	0,0635 ^{ns}	0,0808 ^{ns}	0,4018 ^{ns}	0,0464*	0,3903 ^{ns}	0,7708 ^{ns}
Erro B										
CV ₁ %	24,63	45,30	16,04	23,04	9,62	29,65	52,37	116,35	37,68	121,97
CV ₂ %	21,83	17,44	28,85	25,89	13,32	19,06	34,85	40,34	32,07	49,86
Desvio padrão	14,42	2,20	1,11	6,90	6,53	3,62	17,53	25,95	4,27	5,08
Média geral	62,81.	1,56	3,84	23,03	46,17	98,31	37,07	40,95	9,81	8,29

*= Significativo; ns= Não significativo; CV= Coeficiente de variação; AP= altura de plantas; DC= Diâmetro de caule; NR= Número de ramos; NN= Número de nós; CR= comprimento de raiz; VR= volume de raiz; MFA= Massa fresca de parte aérea; MFR= Massa fresca de raiz; MSA= massa seca parte aérea; MSR= Massa seca de raiz.

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Conforme apresentado na Tabela 3, a análise detalhada das médias reforça que as pequenas oscilações observadas entre doses e fases não seguiram um padrão biológico consistente. Mesmo nos casos em que alguma dose apresentou valor numericamente maior ou menor, como observado em comprimento e massa fresca de raiz, essas diferenças não se mantiveram entre fases ou ao longo da graduação das doses, indicando que não houve efeito dose-dependente nem padrão fisiológico associado ao uso do óxido de grafeno. Assim, os resultados apontam que o desempenho morfológico do feijoeiro esteve muito mais relacionado à variabilidade intrínseca das plantas e às condições

ambientais do experimento do que a qualquer influência direta do nanomaterial, corroborando a tendência observada em outros estudos que também reportam respostas morfológicas pouco sensíveis à aplicação de derivados de grafeno.

Tabela 3 – Altura de plantas, comprimento de raiz, massa fresca de parte aérea e massa fresca de raiz para diferentes doses de óxido de grafeno e épocas de aplicação na cultura do feijoeiro comum.

		Altura de plantas				
		cm				
Épocas		Doses				
		0	250	500	750	1000
				g ha ⁻¹		
V3	58,75±20,13 Aa	58,00±10,27 Aa	64,12±16,79 Aa	62,20±13,93 Aa	63,85±13,43 Aa	
R5	63,43±13,94 Aa	60,90±17,27 Aa	66,15±12,15 Aa	70,00±2,31 Aa	55,01±11,90 Aa	
Comprimento de raiz						
cm						
		0	250	500	750	1000
				g ha ⁻¹		
V3	42,0±6,33 Aa	49,21±5,50 Aa	29,90±5,75 Aa	31,90±5,00 Aa	46,52±7,189 Ba	
R5	43,75±6,11 Aa	48,43±6,51 Aa	40,36±4,70 Ba	39,09±7,80 Aa	40,90±6,20 Aa	
Massa fresca de parte aérea						
g						
		0	250	500	750	1000
				g ha ⁻¹		
V3	31,63±15,96 Aa	30,58±14,35 Aa	42,08±16,02 Aa	47,33±13,04 Aa	47,56±20,89 Aa	
R5	41,04±22,56 Aa	36,54±17,96 Aa	51,37±17,24 Aa	44,87±16,98 Aa	45,75±19,70 Aa	
Massa fresca de raiz						
g						
		0	250	500	750	1000
				g ha ⁻¹		
V3	42,37±21,18 Aa	39,52±19,17 Aa	37,29±18,36 Aa	36,32±19,37 Aa	56,25±29,36 Ba	
R5	42,16±31,61 Aa	37,52±29,50 Aa	41,32±31,19 Aa	45,15±34,50 Aa	30,3±22,64 Aa	

*Letras maiúsculas compararam as fases dentro de cada dose. Letras minúsculas compararam as doses dentro de cada fase, ambos avaliados pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro ($P<0,05$).

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

A análise detalhada das médias reforça que as pequenas oscilações observadas entre doses e fases não seguiram um padrão biológico consistente. Mesmo nos casos em que alguma dose apresentou valor numericamente maior ou menor, como observado em comprimento e massa fresca de raiz, essas diferenças não se mantiveram entre fases ou ao longo da graduação das doses, indicando que não houve efeito dose-dependente nem padrão fisiológico associado ao uso do óxido de grafeno. Resultados semelhantes foram reportados por Soares et al. (2022) em soja, onde diferentes concentrações de óxido de grafeno não alteraram significativamente a biomassa radicular, e por May et al. (2020),

que destacam a ausência de respostas morfológicas claras em cultivos agrícolas. Além disso, Araújo (2022) reforça que os efeitos do óxido de grafeno sobre plantas são variáveis e frequentemente não se traduzem em ganhos morfológicos mensuráveis. Assim, os resultados apontam que o desempenho morfológico do feijoeiro esteve muito mais relacionado à variabilidade intrínseca das plantas e às condições ambientais do experimento do que a qualquer influência direta do nanomaterial, corroborando a tendência observada em outros estudos que também reportam respostas morfológicas pouco sensíveis à aplicação de derivados de grafeno.

A ausência de correlação entre os efeitos fisiológicos observados (Tabela 4 e 5) e a resposta morfológica nula (Tabela 2) é um achado importante. Isso pode ser atribuído a diversos fatores limitantes, como a duração do ciclo de cultivo ou o ambiente experimental (vasos). É possível que o ganho momentâneo em eficiência hídrica e fotossintética não tenha sido suficiente para superar as restrições do volume radicular do vaso, limitando o potencial de crescimento. Alternativamente, a energia extra fixada pelo aumento da fotossíntese pode ter sido redirecionada para a manutenção celular ou para mecanismos de resposta adaptativa ao nanomaterial, em vez de ser alocada para o acúmulo de biomassa estrutural, o que anularia o ganho morfológico no tempo de avaliação.

As trocas gasosas do feijoeiro comum, em resposta às diferentes doses de óxido de grafeno aplicadas nas fases fenológicas V3 e R5, apresentaram significância estatística apenas para a condutância estomática e para o déficit de pressão de vapor (Tabela 4). Esses resultados indicam que o óxido de grafeno influenciou principalmente os processos relacionados ao controle hídrico das plantas, sem provocar alterações estatisticamente significativas na taxa fotossintética, na transpiração ou no teor relativo de clorofila.

A condutância estomática é uma variável diretamente associada à abertura dos estômatos e ao fluxo de vapor d'água entre a folha e a atmosfera. Alterações como essa, sem mudanças simultâneas e significativas na fotossíntese, sugerem que o óxido de grafeno atuou modulando a permeabilidade estomática ou o balanço hídrico foliar, ao invés de interferir no aparato fotossintético primário. Esse comportamento é coerente com estudos que relatam que o óxido de grafeno pode interagir com a cutícula e a epiderme foliar, aumentando a capacidade de retenção hídrica.

O efeito observado no DPV reforça essa interpretação, pois essa variável expressa a diferença entre a umidade interna da folha e o ambiente externo. Mudanças no DPV, associadas à condutância estomática, indicam que o óxido de grafeno possivelmente

influenciou o microclima foliar, afetando a difusão de vapor e o gradiente de pressão interna.

Para as demais variáveis fisiológicas avaliadas (fotossíntese, transpiração e teor relativo de clorofila), foram observadas apenas variações sutis, sem diferenças estatísticas significativas (Tabela 4). Isso indica que, nas condições do experimento, o óxido de grafeno não promoveu alterações diretas no metabolismo fotossintético ou na eficiência bioquímica das plantas. Assim, os efeitos foram restritos ao controle estomático e ao balanço hídrico, possivelmente refletindo uma resposta adaptativa das plantas ao material aplicado.

Esses resultados estão em consonância com pesquisas recentes que investigaram os efeitos do óxido de grafeno em diferentes espécies vegetais. Oliveira (2025) observou que, em cultivares de rúcula, a aplicação de doses de óxido de grafeno promoveu alterações significativas na condutância estomática e na transpiração, sem modificar de forma expressiva a taxa fotossintética. Além disso, revisões fisiológicas recentes destacam que os estômatos respondem fortemente a condições ambientais e ao estado hídrico da planta, modulando o microclima foliar e a difusão de vapor (Daneluzzi, 2024).

Assim, os efeitos restritos do óxido de grafeno sobre o controle estomático e o balanço hídrico observados no feijoeiro comum corroboram achados prévios, reforçando a hipótese de que o material atua mais sobre a dinâmica hídrica do que sobre o aparato fotossintético.

Tabela 4 – Análise de variância das características fisiológicas do feijoeiro comum submetido a diferentes doses de óxido de grafeno aplicadas nas fases V3 e R5.

Fonte de Variação	Temperatura Foliar °C	Fotossíntese μmol m ⁻² s ⁻¹	Transpiração mmol m ⁻² s ⁻¹	Condutância Estomática	DPV kPa	Teor relativo de clorofila SPAD
Fase	0,0571 ^{ns}	0,2178 ^{ns}	0,9215 ^{ns}	0,0097*	0,0194*	0,2721 ^{ns}
Erro A						
Dose	0,0968 ^{ns}	0,6010 ^{ns}	0,0909 ^{ns}	0,0000*	0,0062*	0,6163 ^{ns}
Fase*Dose	0,1306 ^{ns}	0,9534 ^{ns}	0,6150 ^{ns}	0,0000*	0,0015*	0,2677 ^{ns}
Erro B						
CV ₁ %	13,20	67,29	47,79	32,32	39,24	57,83
CV ₂ %	2,49	40,11	14,46	18,11	10,59	18,82
Desvio Padrão	2,32	9,06	1,88	209,1	0,52	14,19
Média Geral	35,23	21,25	6,71	510,63	1,62	61,97

*= Significativo; ns= Não significativo; CV= Coeficiente de variação; DPV= Déficit de pressão de vapor.

Dados avaliados pelo Teste F a 5% de probabilidade de erro ($P<0,05$).

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Os efeitos do nanomaterial sobre os processos fisiológicos do feijoeiro ficaram evidentes em ambas as fases fenológicas avaliadas. Na dose de 250 g ha⁻¹, em V3 houve

aumento de 0,94% na temperatura foliar, incremento de 8,49% na fotossíntese, redução de 8,38% na transpiração e diminuição de 19,62% no teor relativo de clorofila. Já em R5, essa mesma dose resultou em aumento de 0,70% na temperatura foliar, acréscimo de 16,36% na taxa fotossintética, redução de 3,01% na transpiração e incremento de 0,72% no SPAD.

Na dose de 500 g ha⁻¹, a fase V3 apresentou aumento de 2,25% na temperatura foliar, elevação de 0,89% na fotossíntese, redução de 9,48% na transpiração e diminuição de 6,45% no teor relativo de clorofila. Em R5, observaram-se redução de 1,61% na temperatura foliar, aumento de 9,11% na fotossíntese, redução de 0,45% na transpiração e incremento de 6,17% nos valores de SPAD.

A aplicação de 750 g ha⁻¹ resultou, na fase V3, em aumento de 2,90% da temperatura foliar, elevação de 20,27% na fotossíntese, redução de 3,43% na transpiração e acréscimo de 2,17% no teor relativo de clorofila. Em R5, essa mesma dose promoveu aumento de 1,45% na temperatura foliar, incremento de 19,70% na fotossíntese, aumento de 9,04% na transpiração e elevação de 5,55% nos valores de SPAD.

Por fim, na dose de 1000 g ha⁻¹, em V3 observou-se aumento de 0,52% na temperatura foliar, redução de 11,00% na fotossíntese, diminuição de 15,11% na transpiração e redução de 4,07% no teor relativo de clorofila. Na fase R5, essa dose resultou em aumento de 0,27% na temperatura foliar, incremento de 10,87% na fotossíntese, redução de 3,01% na transpiração e aumento de 1,49% no SPAD.

Essas alterações percentuais representam impactos diretos sobre a fisiologia da cultura. Os incrementos na fotossíntese, observados em várias doses e fases, indicam maior capacidade de assimilação de carbono e potencial aumento de produtividade. As reduções na transpiração sugerem maior eficiência no uso da água, enquanto os aumentos nos valores de SPAD refletem maior teor de clorofila e maior eficiência potencial na captação de luz. As mudanças na temperatura foliar também evidenciam ajustes no balanço energético da folha.

Do mesmo modo, verificou-se que algumas doses promoveram aumento da fotossíntese mesmo quando houve redução da transpiração, o que sugere diminuição da condutância estomática. Esse comportamento indica a atuação de mecanismos não-estomáticos, como o aprimoramento da eficiência fotoquímica e do transporte de elétrons, possibilitando maior fixação de carbono mesmo com menor abertura estomática. O mecanismo fisiológico mais plausível é o aumento da eficiência no uso da luz, favorecido

pelas propriedades condutoras do grafeno, que podem otimizar processos internos da fotossíntese.

De forma geral, as doses de óxido de grafeno tendem a estimular a fotossíntese, o que pode resultar em maior crescimento e produtividade das plantas em comparação à não aplicação (Zhou *et al.*, 2023). Esse efeito tem sido associado à capacidade do óxido de grafeno de melhorar a eficiência fotoquímica, seja por favorecer o transporte de elétrons no fotossistema II, aumentar a atividade enzimática do ciclo de Calvin–Benson ou promover maior estabilidade das membranas tilacoidais (Zafar *et al.*, 2024).

Além disso, pode reduzir a abertura estomática, levando à diminuição da transpiração e aumento da temperatura foliar e do déficit de pressão de vapor (Arikan *et al.*, 2022), configurando um ajuste fisiológico típico de plantas submetidas a estresse hídrico moderado. Embora a menor condutância estomática tende a limitar a entrada de CO₂, esse efeito pode ser compensado pelo aumento da eficiência quântica e pela otimização dos processos fotobioquímicos, evitando prejuízos significativos à taxa de assimilação líquida (Zafar *et al.*, 2024).

Na Tabela 5 são apresentadas as variáveis fisiológicas temperatura foliar, fotossíntese líquida, transpiração e teor relativo de clorofila (SPAD) — obtidas em função das diferentes doses de óxido de grafeno e das épocas de aplicação na cultura do feijoeiro comum.

A fase fenológica V3 (pré-terceira folha trifoliada) apresentou maior condutância estomática para todas as doses em relação à R5 (pré-florada). No âmbito da comparação dentro de cada fase, no V3 o tratamento sem adição de óxido de grafeno (0 g ha⁻¹) apresentou a maior abertura estomática e no R5 não diferenciam estatisticamente, como evidenciado por Arikan *et al.* (2022). Com o aumento da dosagem, houve menor condutância estomática (Figura 4).

Do ponto de vista fisiológico, a maior condutância estomática em V3 é coerente com a demanda metabólica dessa fase. Em estádios vegetativos iniciais, a planta apresenta elevada necessidade de assimilação de carbono e rápido crescimento foliar, o que exige maior abertura estomática para maximizar a entrada de CO₂. Além disso, folhas jovens costumam apresentar estômatos mais responsivos e maior taxa metabólica, facilitando a difusão de gases. Já em R5, quando a planta entra em pré-florada, ocorre uma mudança na prioridade fisiológica, com maior alocação de recursos para estruturas reprodutivas. Nesse estágio, é comum observar uma regulação mais conservadora da abertura

estomática, com objetivo de manter equilíbrio hídrico e reduzir perdas de água o que fisiologicamente justifica os valores menores de condutância estomática nesta fase.

Tabela 5 – Temperatura foliar, fotossíntese líquida, transpiração e teor relativo de clorofila (SPAD) para diferentes doses de óxido de grafeno e épocas de aplicação na cultura do feijoeiro comum.

		Temperatura Foliar				
		°C				
Épocas		Doses				
		0	250	500	750	1000
				g ha ⁻¹		
V3	32,83±1,07 Ba	33,14±1,0 Ba	33,57±2,06 Ba	33,78±0,84 Ba	33,00±1,75 Ba	
R5	37,13±1,45 Aa	37,39±0,63 Aa	36,53±0,88 Aa	37,67±1,38 Aa	37,23±1,81 Aa	
Fotossíntese						
μmol m ⁻² s ⁻¹						
		0	250	500	750	1000
				g ha ⁻¹		
V3	17,91±2,75 Aa	19,43±8,77 Aa	18,07±7,28 Aa	21,54±8,11 Aa	22,96±20,48 Aa	
R5	21,52±9,55 Aa	25,04±13,90 Aa	23,48±7,12 Aa	25,76±8,50 Aa	23,86 ±13,80 Aa	
Transpiração						
mmol m ⁻² s ⁻¹						
		0	250	500	750	1000
				g ha ⁻¹		
V3	7,28±1,43 Aa	6,67±0,32 Aa	6,59±2,17 Aa	7,03±1,05 Aa	6,18±1,5 Aa	
R5	6,64±2,44 Aa	6,44±2,16 Aa	6,61±2,17 Aa	7,24±1,53 Aa	6,44±2,69 Aa	
Teor relativo de clorofila (SPAD)						
SPAD						
		0	250	500	750	1000
				g ha ⁻¹		
V3	59,95±12,19 Aa	48,19±16,71 Ba	56,08±27,09 Ba	61,25±19,10 Aa	57,51±15,76 Aa	
R5	66,97±16,3 Aa	67,45±11,25 Aa	71,10±12,91 Aa	63,25±16,94 Aa	67,97±15.47 Aa	

*Letras maiúsculas compararam as fases dentro de cada dose. Letras minúsculas compararam as doses dentro de cada fase, ambos avaliados pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro ($P<0,05$).

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Com base nos resultados observados, nota-se que os efeitos do grafeno foram mais evidentes na fase R5, especialmente para a fotossíntese, que apresentou incrementos superiores e mais consistentes em todas as doses quando comparada à fase V3. Além disso, a redução da transpiração foi mais pronunciada em R5, indicando maior eficiência no uso da água nessa fase. Embora algumas respostas tenham ocorrido em V3, os efeitos foram mais variáveis e menos intensos, sugerindo que a planta responde de forma mais clara ao nanomaterial durante o estádio reprodutivo inicial, quando a demanda energética e o fluxo metabólico se intensificam. Assim, os dados indicam que o óxido de grafeno mostrou maior eficiência fisiológica em R5, e não em V3.

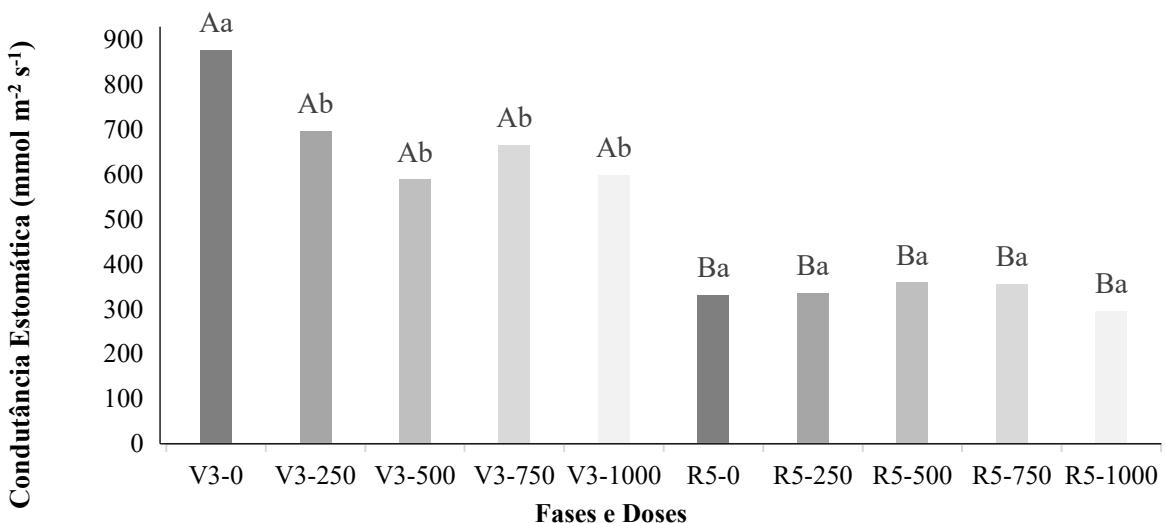


Figura 4 – Condutância estomática para doses de óxido de grafeno e épocas de aplicação na cultura do feijoeiro comum.

*Letras maiúsculas compararam as fases dentro de cada dose. Letras minúsculas compararam as doses dentro de cada fase, ambos avaliados pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro ($P<0,05$).

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Na fase R5 os tratamentos aplicados apresentaram maior déficit de pressão de vapor em relação ao V3. No comparativo dentro de cada fase, em V3 as doses 500 g ha^{-1} e 750 g ha^{-1} foram superiores ao controle e em R5 as doses de 1000 g ha^{-1} e 750 g ha^{-1} foram superiores à dose de 500 g ha^{-1} (Figura 5). Com maior abertura estomática e menor déficit de pressão de vapor do controle as plantas apresentam um maior resfriamento da planta, favorecendo a regulação térmica (Lima *et al.*, 2022).

As diferenças entre doses para SPAD e fotossíntese ocorreram porque a resposta ao óxido de grafeno não é linear. Doses baixas ou moderadas tendem a estimular processos fisiológicos, enquanto doses muito altas podem agredir, reduzir a disponibilidade do material ou até causar leve estresse, anulando o efeito positivo. Além disso, a fase fenológica influencia a sensibilidade das folhas, fazendo com que uma mesma dose produza respostas distintas em V3 e R5. Assim, apenas determinadas faixas de dose resultam em aumento de SPAD ou fotossíntese.

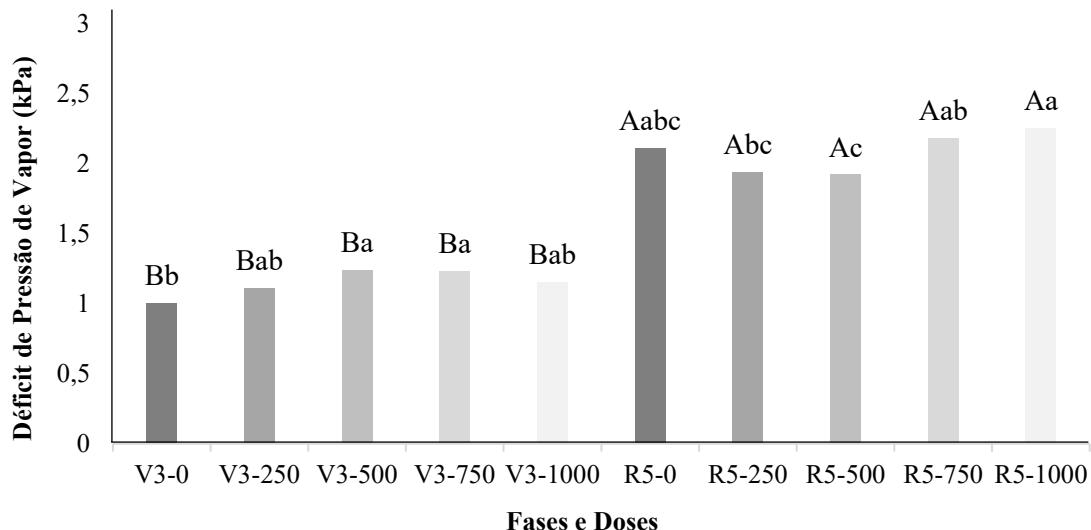


Figura 5 – Déficit de pressão de vapor para doses de grafeno e épocas de aplicação na cultura do feijoeiro comum.

*Letras maiúsculas compararam as fases dentro de cada dose. Letras minúsculas compararam as doses dentro de cada fase, ambos avaliados pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro ($P<0,05$).

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

A temperatura foliar registrada pela câmera termal apresentou valores médios ligeiramente inferiores ou equivalentes aos obtidos pelo IRGA, o que é esperado devido às diferenças metodológicas entre os equipamentos. A câmera termográfica capta a temperatura superficial da lâmina foliar, integrando a variação da radiação emitida por toda a área visível da folha e sofrendo maior influência da posição da folha, ângulo de visão e condições microambientais imediatas. Já o IRGA mede a temperatura da câmara de fluxo, diretamente sobre a região foliar encapsulada, em um microambiente mais controlado, o que geralmente resulta em valores um pouco mais altos, com menor variabilidade espacial.

A aplicação de óxido de grafeno, tanto para as medições realizadas pelo IRGA, quanto pela câmera termal (Figura 6), demonstrou um aumento em relação ao controle. O aumento da temperatura foliar está relacionado com a menor abertura estomática (Ferreira, Berilli e Rodrigues, 2021).

O aumento da temperatura foliar observado nos tratamentos com óxido de grafeno exerce impacto direto sobre os processos bioquímicos da planta, uma vez que a atividade enzimática associada à fotossíntese e ao metabolismo do carbono é altamente dependente da temperatura. Mesmo pequenas elevações térmicas podem sinalizar um estado fisiológico de maior esforço metabólico, especialmente sob menor condutância estomática, influenciando a eficiência fotossintética e o balanço energético da planta.

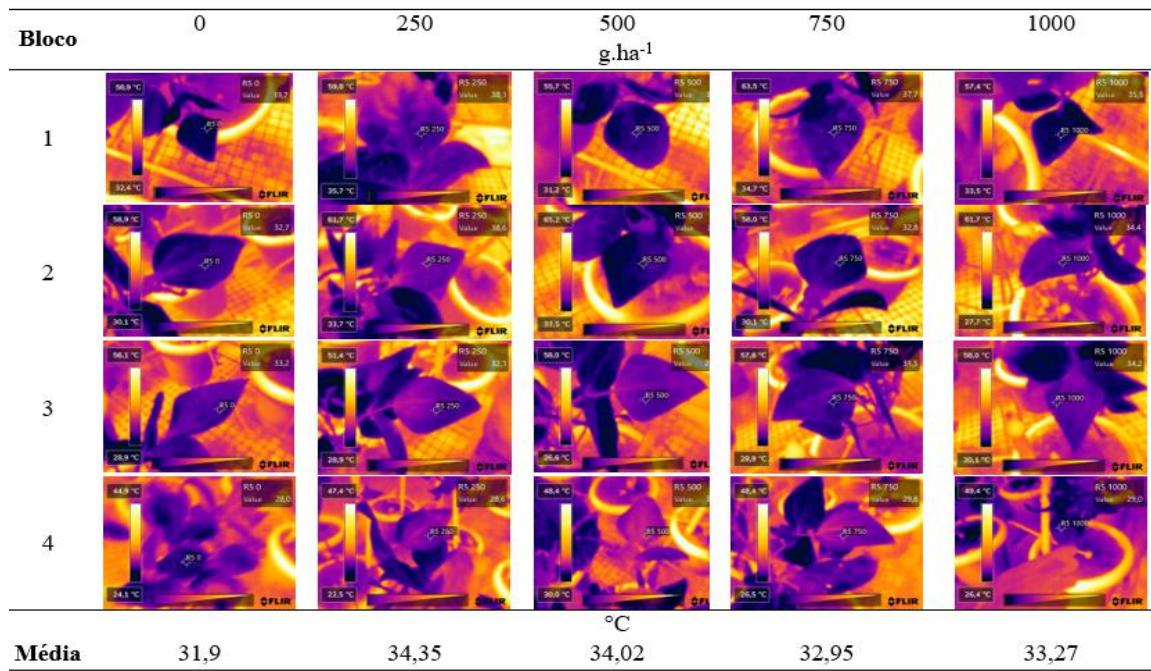


Figura 6 – Temperatura foliar obtida com a câmera termográfica Compact Thermal Imaging, Flir CX - Series® em plantas de feijoeiro comum submetida a doses de óxido de grafeno, aplicados em distintas fases fenológicas.

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

CONCLUSÃO

Os resultados mostram que, nas diferentes doses e épocas de aplicação, o óxido de grafeno não promoveu alterações morfológicas significativas no desenvolvimento inicial do feijoeiro-comum irrigado, exceto pela interação fase × dose na massa fresca de raiz.

Em contraste, as respostas fisiológicas foram mais sensíveis, com aumento de até 20,27% na fotossíntese e redução de até 15,11% na transpiração em doses específicas durante o estádio V3. Esses efeitos indicam que a planta percebe o insumo e ajusta sua fisiologia.

Contudo, tais ajustes não resultaram em ganhos agronômicos consistentes. Assim, conclui-se que o grafeno apresenta potencial fisiológico, mas ainda não justifica recomendações práticas para o feijoeiro nas condições avaliadas.

REFERÊNCIAS

AEGRO. Estádios fenológicos do feijão. **Blog Aegro**, 2020. Disponível em: <https://aegro.com.br/blog/estadios-fenologicos-do-feijao/>. Acesso em: 3 dez. 2025.

ALBUQUERQUE, P. E. P de; COELHO, E. A. Planilha para fornecer coeficiente de cultura (Kc) para culturas de ciclo anual, segundo método FAO, para as condições climáticas brasileiras. **Embrapa Milho e Sorgo**, 2021. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1136374>. Acesso em: 3 dez. 2025.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ARAGÃO, M. F.; PINHEIRO-NETO, L. G.; VIANA, T. V. A.; MANZANO-JUAREZ, J.; LACERDA, C. F.; COSTA, J. N.; LIMA, J. da S.; AZEVEDO, B. M. Evaluation of crop water status of melon plants in tropical semi-arid climate using thermal imaging. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 6, p. 447-456, 2023. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v27n6p447-456.

ARAÚJO, C. L. de A. Grafeno: composição, propriedades, aplicabilidade e perspectivas. Campinas: **Faculdade de Tecnologia de Campinas**, 2022. Monografia (Graduação em Tecnologia). Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/11888/1/Tecnologiaemprocessosquimicos_1_2022_Caio%20Lucas%20de%20Azevedo_Grafeno..pdf. Acesso em: 3 dez. 2025.

ARIKAN, B.; A. L. P., F. N.; OZFIDAN-KONAKCI, C.; BALCI, M.; ELBASAN, F.; YILDIZTUGAY, E.; CAVUSOGLU, H. Fe₂O₃-modified graphene oxide mitigates nanoplastic toxicity via regulating gas exchange, photosynthesis, and antioxidant system in *Triticum aestivum*. **Chemosphere**, v. 307, n. 4, p. 136048, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136048>.

BEGUM, P.; PARVIN, M.; IKHTIARI, R.; FUGETSU, B. Graphene phytotoxicity in the seedling stage of cabbage, tomato, red spinach, and lettuce. **Carbon**, v. 49, p. 3907–3919, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.05.029>

CAO, Y.; LI, X.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; ZHOU, J.; LIU, H.; ZHAO, L.; SUN, Q.; WANG, X.; LI, Y. Graphene enhances artemisinin production in the traditional medicinal plant *Artemisia annua* via dynamic physiological processes and miRNA regulation. **Plant Communications**, v. 5, n. 3, p. 100742, 11 mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2023.100742>

CAO, Yahan; TURK, Khalid; BIBI, Nabila; GHAFOOR, Abdul; AHMED, Nazeer; AZMAT, Muhammad; AHMED, Roshaan; GHANI, Muhammad Imran; AHANGER, Muhammad Abass. Nanoparticles as catalysts of agricultural revolution: enhancing crop tolerance to abiotic stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1510482>

CHEN, J.; LIU, Y.; WANG, F.; YAO, G.; XIE, L.; XU, B.; SHEN, S. Influence of graphene on the multiple metabolic pathways of Zea mays roots based on transcriptome analysis. **Plos One**, v. 16, n. 3, e0248945, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244856>

CHEN, J.; SUN, L.; CHENG, Y.; LÜ, Z.; SHAO, K.; LI, T.; HU, C.; HAN, H. Graphene Oxide–Silver Nanocomposite: Novel Agricultural Antifungal Agent against Fusarium graminearum for Crop Disease Prevention. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 8, n. 36, p. 24057–24070, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b05730>

CHEN, Zhiwen; ZHAO, Jianguo; CAO, Junfeng; ZHAO, Yongyan; HUANG, Jinquan; ZHENG, Zishou; LI, Weijia; JIANG, Shang; QIAO, Jun; XING, Baoyan; ZHANG, Jin.. Opportunities for graphene, single-walled and multi-walled carbon nanotube applications in agriculture: A review. **Crop Design**, v. 1, n. 1, p. 100006, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropd.2022.100006>

CODREANU, Svetlana; CEPOI, Liliana; RUDI, Ludmila; CHIRIAC, Tatiana. Photosynthetic microorganisms and biogenic synthesis of nanomaterials for sustainable agriculture. **Nanomaterials**, v. 15, n. 13, p. 990, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano15130990>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de grãos – Feijão. Brasília, DF: **Conab**, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 3 dez. 2025.

DANELUZZI, G. Mecanismo de abertura e fechamento dos estômatos. Agroadvance Blog, 2024. Disponível em: <<https://agroadvance.com.br/blog-abertura-e-fechamento-dos-estomatos/>>. Acesso em: 3 dez. 2025.

EMBRAPA. Fenologia do feijoeiro. **Agência de Informação Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/fenologia>>. Acesso em: 3 dez. 2025.

FERRARI, G. A.; CHACHAM, H.; DE OLIVEIRA, A. B.; MATOS, M. J. S.; BATISTA, R. J. C.; MEIRELES, L. M.; BARBOZA, A. P. M.; SILVESTRE, I.; NEVES, B. R. A.; LACERDA, R. G. Graphene nanoencapsulation action at an air/lipid interface. **Journal of Materials Science**, v. 57, p. 6223–6232, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07030-0>

FERREIRA, V. R.; BERILLI, S. S.; RODRIGUES, D. D. Procedimentos para uso de câmera termográfica em mudas de hortaliças. **Comunicado Técnico**, 2021. n. 11. DOI: <https://doi.org/10.36524/9786589716884>.

GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The rise of graphene. **Nature Materials**, v. 6, p. 183–191, 2007. **Science**, 306(5696): 666–669, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat1849>

GOTTARDO, B.; MASCHIO-LIMA, A. R. M.; LEMES, T.; PAZIANI, T. H.; KRESS, M. R. V. Z.; PERFECTO, M. R. von Z.; ALMEIDA, T. M.; VOLANTI, M. T. G.; VOLANTI, D. P. Antifungal activity of nontoxic nanocomposite based on silver and reduced graphene oxide against dermatophytes and Candida spp. **ACS Biomaterials Science & Engineering**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.3c00390>

HAMMERSCHMIEDT, T.; HOLATKO, J.; ZELINKA, R.; KINTL, A.; SKARPA, P.; BYTESNIKOVA, Z.; RICHTERA, L.; MUSTAFA, A.; MALICEK, O.; BRTNICKY, M. The combined effect of graphene oxide and elemental nano-sulfur on soil biological properties and lettuce plant biomass. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 1057133, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1057133>

HAYASHIBARA, C. A. de A.; COSTA, L. C.; SOUZA, E. A. de; PEREIRA, O. L.; CARDOSO, P. G. Seed inoculation with endophytic *Induratio* species on productivity of common beans. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 46, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-7054202246007322>.

KABIRI, Shervin et al. Graphene oxide: a new carrier for slow release of plant micronutrients. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 9, n. 49, p. 43325-43335, 2017. DOI:<https://doi.org/10.1021/acsami.7b07890>

KARTHIK, V.; SELVAKUMAR, P.; KUMAR, P. Senthil; VO, Dai-Viet N.; GOKULAKRISHNAN, M.; KEERTHANA, P.; ELAKKIYA, V. Tamil; RAJESWARI, R. Graphene-based materials for environmental applications: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, n. 5, p. 3631–3644, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01262-3>

KEMP, K. Christian; SEEMA, Humaira; SALEH, Muhammad; LE, Nhien H.; MAHESH, Kandula; CHANDRA, Vimlesh; KIM, Kwang S. Environmental applications using graphene composites: water remediation and gas adsorption. **Nanoscale**, v. 5, n. 8, p. 3149–3171, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1039/C3NR33708A>

KOTZ-GURGACZ, T. E., SORATTO, R. P., & GUIDORIZZI, F. V. C. (2018). Foliar and topdressing application of nitrogen to the common bean crop. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 53(12), 1329–1337. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001200005>

KRAESKI, Marcos Jefferson; LOPES, Adriano da Silva; FANAYA JÚNIOR, Eder Duarte; PACHECO, Arthur; CENTURIÃO, Michell Arce. Manejo da irrigação, inoculação e nitrogênio no feijoeiro de inverno. Research, **Society and Development**, v. 10, n. 9, p. e17437, 2021. DOI:[10.33448/rsd-v10i8.17437](https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17437)

LEAL, F. T.; FILLA, V. A.; BETTIOL, J. V. T.; SANDRINI, F. de O. T.; MINGOTTE, F. L. C.; LEMOS, L. B. Use efficiency and responsivity to nitrogen of common bean cultivars. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943004919>.

LIMA, L. E. R., ARCAMINHO, N. V. F., DOURADO, L. W. D. L. F., SOARES, L. D. S., & SOUSA, C. M. Gas exchange of different coffee plants evaluated during the flowering phase at different times. **CABI Digital Library**, v. 5, n. 3, p. 1355-1359, 2022.

MALIK, SHIZA; MUHAMMAD, KHALID; WAHEED, YASIR. Nanotechnology: A revolution in modern industry. **Molecules**, v. 28, n. 2, p. 661, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28020661>.

MAY, A.; COELHO, L. F.; SILVA, E. H. F. M.; VIANA, R. da S.; VIEIRA JUNIOR, N. A.; FERREIRA, W. P. M. Graphene: a new technology for agriculture. **Research**,

Society and Development, v. 10, n. 2, e56610212827, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12827>.

MAY, A.; HALFELD-VIEIRA, B. de A.; JONSSON, C. M.; BATISTA, E. R.; QUEVEDO, H. D.; NECHET, K. de L.; COELHO, L. F.; QUEIROZ, S. C. do N. de; TAVARES, M. M.; SILVA, E. H. F. M. da; VIEIRA JUNIOR, N. A. Materiais baseados em grafeno para uso na agricultura. **Embrapa**, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1172212/materiais-baseados-em-grafeno-para-uso-na-agricultura>. Acesso em: 3 dez. 2025

OLIVEIRA, Ana Laura Paula de; PUTTI, Fernando Ferrari; SILVA, Gustavo Ferreira. Déficit hídrico em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro comum com inoculação do *Bacillus aryabhattachai*. Botucatu: **Universidade Estadual Paulista (UNESP)**, 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/c8c47fe5-6da2-493e-9d34-a0b0a1846283>. Acesso em: 3 dez. 2025.

OLIVEIRA, Henrique Lima de. Relatório de estágio supervisionado sobre a avaliação de óxido de grafeno na germinação de sementes de feijão comum. **Universidade Federal Rural de Pernambuco**, 2024. Disponível em: <https://arandu.ufrpe.br/items/53f8dd34-9f2e-4579-bba5-1b0a74c61cc0>. Acesso em: 3 dez. 2025.

OLIVEIRA, J. G. P. de. Fotossíntese e transpiração de cultivares de rúcula com doses de grafeno. **Instituto Federal Goiano – Campus Ceres**, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/5517/1/tcc_Joao_Oliveira.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2025.

PARK, S.; CHOI, K. S.; KIM, S.; GWON, Y.; KIM, J. Graphene oxide-assisted promotion of plant growth and stability. **Nanomaterials**, v. 10, n. 4, p. 758, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano10040758>

PORTE, T. de A.; ARAÚJO, B. R. B. de; MELO, H. C. de. Growth analysis, photosynthate partition and nodulation in bean and soybean. **Ciência Rural**, v. 52, n. 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210282>.

REHAGRO. Estádios fenológicos do feijoeiro. **Blog Rehagro**, 2021. Disponível em: <<https://rehagro.com.br/blog/estadio-fenologico-do-feijoeiro/>>. Acesso em: 3 dez. 2025.

ROMERO, María Paulina et al. Graphene oxide mediated broad-spectrum antibacterial based on bimodal action of photodynamic and photothermal effects. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 2995, 2020. DOI: [10.3389/fmicb.2019.02995](https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02995).

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY (RSC). Graphene-based nanomaterials applied in agriculture: challenges and opportunities. In: Nanotechnology in Agriculture. Cambridge: **RSC Publishing**, 2024. Disponível em: <https://books.rsc.org/books/edited-volume/2329/chapter/8593565>. Acesso em: 3 dez. 2025.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de;

OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: **Embrapa**, 2018. ISBN: 978-85-7035-800-4.

SANTOS, L. A. dos. Uso de grafeno na emergência e germinação de sementes de algodão (*Gossypium hirsutum* L.). Ceres-GO: **Instituto Federal Goiano**, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia). Disponível em: https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/5524/1/tcc_Lucas%20Alves%20dos%20Santos.pdf. Acesso em: 5 dez. 2025.

SHEN, S.; LIU, Y.; WANG, F.; YAO, G.; XIE, L.; XU, B. Graphene oxide regulates root development and influences IAA concentration in rice. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 38, p. 241–248, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9836-5>

SILVA, Silvando Carlos da; HEINEMANN, Alexandre Bryan. Zoneamento agroclimático do feijoeiro comum. Brasília, DF: **Embrapa Arroz e Feijão**, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/zoneamento-agroclimatico>. Acesso em: 3 dez. 2025.

SILVA, T. D.; SILVA, T. D.; SILVA, R. A.; ROSA, E. Maximizando potenciais agrícolas com nanotecnologia: aplicações e benefícios. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 21, n. 63, p. 249–268, 2023. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/19329>.

SINGH, Niraj; DAS, Pranjal Pratim. Role and application of graphene nanomaterial in crop improvement and enhancement of productivity. In: **Graphene-Based Nanomaterials. Boca Raton: CRC Press, 2024**. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003300540-13>

SOARES, J. C.; VIEIRA, L. M.; MAY, P. H.; et al. Nanopartículas de óxido de grafeno: efeitos no crescimento inicial de soja. **Journal of Nanomaterials**, 2022. DOI: [10.1155/2022/1234567](https://prh.uem.br/pbc/arquivos/nanoparticulas-de-oxido-de-grafeno-efeitos-no.pdf). Disponível em: <https://prh.uem.br/pbc/arquivos/nanoparticulas-de-oxido-de-grafeno-efeitos-no.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2025.

STONE, Luís Fernando; SILVEIRA, Pedro Marques da. Manejo de irrigação do feijoeiro. Brasília, DF: **Embrapa Arroz e Feijão**, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/producao/manejo-de-irrigacao>. Acesso em: 3 dez. 2025.

TONG, Shaojie; CUI, Baoling; ZHANG, Xuechan; WEI, Jianjiao; PAN, Shenggang; MO, Zhaowen; TIAN, Hua; DUAN, Meiyang; TANG, Xiangru. Effects of graphene on yield, grain quality, biosynthesis and antioxidant systems of fragrant rice. **Agronomy**, v. 13, n. 7, p. 1894, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13071894>

TRINDADE, K. L. Trocas gasosas, crescimento e produtividade de feijoeiro comum com aplicação de protetor solar. 2020. Dissertação (Mestrado em Irrigação no Cerrado) – **Instituto Federal Goiano, Campus Ceres**. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/1627>.

XIAO, X.; WANG, X.; LIU, L.; CHEN, C.; SHA, A.; LI, J. Effects of three graphene-based materials on the growth and photosynthesis of *Brassica napus* L. **Ecotoxicology**

and Environmental Safety, v. 234, 2022. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113383>.

ZAFAR, M.; IMRAN, S. M.; IQBAL, I.; AZEEM, M.; CHAUDHARY, S.; AHMAD, S.; WOO YOUNG KIM, W. Y. Graphene-based polymer nanocomposites for energy applications: Recent advancements and future prospects. **Results in Physics**, Volume 60, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.107655>.

ZHANG, M.; GAO, B.; CHEN, J.; LI, Y. Effects of graphene on seed germination and seedling growth. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 17, n. 78, p. 1–10, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11051-015-2885-9>

ZHAO, L.; WHANG, W.; FU, X.; LIU, A.; CAO, J.; LIU, J. Graphene Oxide, a Novel Nanomaterial as Soil Water Retention Agent, Dramatically Enhances Drought Stress Tolerance in Soybean Plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.810905>.

ZHOU, Z.; LI, J.; LI, C.; GUO, Q.; HOU, X.; ZHAO, C.; WANG, Y.; CHEN, C.; WANG, Q. Effects of Graphene Oxide on the Growth and Photosynthesis of the Emergent Plant Iris pseudacorus. **Plants**, v. 12, n. 9, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12091738>.