

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS CERES**  
**BACHARELADO EM AGRONOMIA**  
**JOÃO GUILHERME PALLIN DE OLIVEIRA**

**FOTOSSÍNTESE E TRANSPIRAÇÃO DE CULTIVARES DE RÚCULA COM DOSES  
DE GRAFENO**

**CERES – GO**

**2025**

**JOÃO GUIHERME PALLIN DE OLIVEIRA**

**FOTOSSÍNTESE E TRANSPIRAÇÃO DE CULTIVARES DE RÚCULA COM DOSES  
DE GRAFENO**

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. Wilian Henrique Diniz Buso.

**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**

O48f Oliveira, João Guilherme Pallin de  
FOTOSSÍNTESE E TRANSPIRAÇÃO DE CULTIVARES DE  
RÚCULA COM DOSES DE GRAFENO / João Guilherme  
Pallin de Oliveira. Ceres 2025.

18f. il.

Orientador: Prof. Dr. Wilian Henrique Diniz Buso.  
Tec (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0320021 -  
Bacharelado em Agronomia - Ceres (Campus Ceres).

1. Condutância estomática. 2. Eruca sativa. 3. Fisiologia. 4.  
Nanotecnologia. 5. Trocas gasosas. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

### 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 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

#### Identificação da Produção Técnico-Científica

Tese  Artigo Científico  
 Dissertação  Capítulo de Livro  
 Monografia – Especialização  Livro  
 TCC - Graduação  Trabalho Apresentado em Evento  
 Produto Técnico e Educacional - Tipo:

Nome Completo do Autor: João Guilherme Pallin de Oliveira

Matrícula: 2019103200240447

Título do Trabalho: Fotossíntese e transpiração de cultivares de rúcula com doses de grafeno.

#### Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano:

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;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, 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;
- 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.

Ceres, 13 de junho de 2025.

*Assinatura eletrônica do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais*

Ciente e de acordo:

*Assinatura eletrônica do orientador*

Documento assinado eletronicamente por:

- **Willian Henrique Diniz Buso, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 14/06/2025 20:48:32.
- **João Guilherme Pallin de Oliveira, 2019103200240447 - Discente**, em 14/06/2025 21:57:29.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 14/06/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 717038  
Código de Autenticação: 6813aa8f0d



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Ceres

Rodovia GO-154, Km 03, SN, Zona Rural, CERES / GO, CEP 76300-000

(62) 3307-7100

ANEXO IV - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao(s) quatro dia(s) do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco realizou-se a defesa de Trabalho de Curso do(a) acadêmico(a) JOÃO GEITHEME PALLIN DE OLIVEIRA do Curso de bacharelado em Agronomia matricula 2019103100240447 cujo título é "FOTOSSÍNTESE E TRANSPIRAÇÃO DE CULTIVARES DE RÍCULA COM DOSES DE BRANCO". A defesa iniciou-se às 13 horas e 25 minutos, finalizando-se às 14 horas e 38 minutos. A banca examinadora considerou o trabalho APROVADO com média 8,3 no trabalho escrito, média 8,9 no trabalho oral, apresentando assim média aritmética final 8,6 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 todos que, com sua contribuição e apoio, tornaram essa realização possível.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus pelo dom da vida, por sua constante bênção, por me fortalecer e guiar meus passos.

Expresso minha gratidão à minha família, especialmente aos meus pais, Domingos Gomes de Oliveira e Vilma Aparecida Pallin de Oliveira, e ao meu irmão, Daniel Orlando Pallin De Oliveira. Eles são meu alicerce nesta jornada, sempre oferecendo apoio em minhas decisões, proporcionando carinho, incentivo e força.

Sou imensamente grato ao meu orientador, o Prof. Dr. Wilian Henrique Diniz Buso, pela amizade, confiança, paciência, parceria, orientações, ensinamentos e conselhos valiosos.

Agradeço também aos meus amigos, em especial àqueles que contribuíram para a execução deste trabalho: Isabella Fernandes Moreira, Kamilla Ribeiro Silva dos Reis, Maiza Katrinne Honório Souza, Yasmim Martins Camapum, Thiago Ramos Paiva, Haygo Yuri e Vinicius Ferreira.

Não posso deixar de mencionar minha esposa, Luzia Helena Duarte Rocha, pelo carinho e pelo apoio constante que me ofereceu ao longo dessa caminhada acadêmica.

Rendo homenagens ao meu avô, Orlando Pallin, e ao meu tio, Adão Gomes de Melo, que, embora não estejam presentes fisicamente, sempre me orientaram nessa jornada.

Expresso minha gratidão aos professores que compartilharam conhecimento e experiências ao longo da minha trajetória acadêmica.

Agradeço também ao Instituto Federal Goiano - Campus Ceres, pela formação acadêmica, pela residência estudantil e por todas as oportunidades concedidas ao longo desta jornada.

*"Não tenha medo de dar um grande passo quando for necessário. Lembre-se que um sonho não se torna realidade através da magia; é preciso suor, determinação e trabalho árduo."*

*Colin Powell*

## RESUMO

Este estudo avaliou as trocas gasosas em duas cultivares de rúcula (Cultivada e Gigante Folha Larga) submetidas a quatro doses de grafeno (0, 100, 200 e 300 mg/L de água). O experimento foi conduzido em campo no IF Goiano – Campus Ceres, entre agosto e outubro de 2023, utilizando delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2x4, totalizando oito tratamentos com três repetições. A análise de trocas gasosas foi realizada com um analisador portátil (IRGA), 25 dias após o desbaste, avaliando taxa fotossintética líquida ( $P_n$ ), transpiração ( $E$ ), condutância estomática ( $C$ ) e déficit de pressão de vapor ( $VPD$ ). Os resultados mostraram que o grafeno influenciou positivamente a fotossíntese e a condutância estomática. O tratamento controle (0 mg/L de água) apresentou  $P_n$  média de  $17,57 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , enquanto o tratamento com 300 mg/L de água registrou  $21,40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . A condutância estomática foi maior na dose mais alta, com  $681,10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Esses resultados indicam que o grafeno atua como um estimulante fisiológico, melhorando a eficiência fotossintética e a absorção de água e nutrientes, especialmente em doses elevadas. Os achados reforçam seu potencial na agricultura, alinhando-se a estudos que destacam sua capacidade de ativar canais de água e proteínas de extensão celular.

**Palavras-chave:** Condutância estomática. *Eruca Sativa*. Fisiologia. Nanotecnologia. Trocas gasosas.

## ABSTRACT

This study evaluated gas exchange in two arugula cultivars (Cultivada and Gigante Folha Larga) subjected to four graphene doses (0, 100, 200, and 300 mg/L of water). The experiment was conducted in the field at IF Goiano – Campus Ceres, between August and October 2023, using a completely randomized design in a 2x4 factorial scheme, totaling eight treatments with three replicates. Gas exchange analysis was performed using a portable analyzer (IRGA) 25 days after thinning, evaluating net photosynthetic rate (Pn), transpiration (E), stomatal conductance (C), and vapor pressure deficit (VPD). The results showed that graphene positively influenced photosynthesis and stomatal conductance. The control treatment (0 mg/L of water) had a mean Pn of  $17.57 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , while the treatment with 300 mg/L of water of spray recorded  $21.40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Stomatal conductance was highest at the highest dose, reaching  $681.10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . These findings indicate that graphene acts as a physiological stimulant, improving photosynthetic efficiency and the uptake of water and nutrients, especially at higher doses. The results reinforce its potential in agriculture, aligning with studies that highlight its ability to activate water channels and cell extension proteins.

**Keywords:** Stomatal conductance. *Eruca Sativa*. Physiology. Nanotechnology. Gas exchange.

## **LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 1. Efeito de diferentes doses de grafeno na taxa líquida de fotossíntese (PN) em plantas de rúcula .....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 2. Efeito de diferentes doses de grafeno na condutância estomática de folhas de rúcula.....</b>	<b>11</b>

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1. Taxa líquida de fotossíntese (PN), taxa de transpiração (E), condutância estomática da folha (C), déficit de pressão de vapor (VPD) de cultivares de rúculas com doses de grafeno.....</b>	<b>5</b>
---	----------

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>2</b>
<b>MATERIAS E MÉTODOS.....</b>	<b>3</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>5</b>
<b>TAXA LÍQUIDA DE FOTOSSÍNTESE.....</b>	<b>5</b>
<b>TAXA DE TRANSPIRAÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA.....</b>	<b>11</b>
<b>DÉFICIT DE PRESSÃO DE VAPOR .....</b>	<b>14</b>
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>15</b>

# FOTOSSÍNTESE E TRANSPIRAÇÃO DE CULTIVARES DE RÚCULA COM DOSES DE GRAFENO

## PHOTOSYNTHESIS AND TRANSPIRATION OF ARUGULA CULTIVARS WITH GRAPHENE DOSES

**João Guilherme Pallin de Oliveira**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Brasil

E-mail: joaoguilhermepallin@gmail.com

**Willian Henrique Diniz Buso**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Brasil

E-mail: wilian.buso@ifgoiano.edu.br

**Resumo:** Este estudo avaliou as trocas gasosas em duas cultivares de rúcula (Cultivada e Gigante Folha Larga) submetidas a quatro doses de grafeno (0, 100, 200 e 300 mg/L de água). O experimento foi conduzido em campo no IF Goiano – Campus Ceres, entre agosto e outubro de 2023, utilizando delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2x4, totalizando oito tratamentos com três repetições. A análise de trocas gasosas foi realizada com um analisador portátil (IRGA), 25 dias após o desbaste, avaliando taxa fotossintética líquida (Pn), transpiração (E), condutância estomática (C) e déficit de pressão de vapor (VPD). Os resultados mostraram que o grafeno influenciou positivamente a fotossíntese e a condutância estomática. O tratamento controle (0 mg/L de água) apresentou Pn média de 17,57  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , enquanto o tratamento com 300 mg/L de água de calda registrou 21,40  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . A condutância estomática foi maior na dose mais alta, com 681,10  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Esses resultados indicam que o grafeno atua como um estimulante fisiológico, melhorando a eficiência fotossintética e a absorção de água e nutrientes, especialmente em doses elevadas. Os achados reforçam seu potencial na agricultura, alinhando-se a estudos que destacam sua capacidade de ativar canais de água e proteínas de extensão celular.

**Palavras-chave:** Condutância estomática. *Eruca Sativa*. Fisiologia. Nanotecnologia. Trocas gasosas.

**Abstract:** This study evaluated gas exchange in two arugula cultivars (Cultivada and Gigante Folha Larga) subjected to four graphene doses (0, 100, 200, and 300 mg/L of water). The experiment was conducted in the field at IF Goiano – Campus Ceres, between August and October 2023, using a completely randomized design in a 2x4 factorial scheme, totaling eight treatments with three replicates. Gas exchange analysis was performed using a portable analyzer (IRGA) 25 days after thinning, evaluating net photosynthetic rate (Pn), transpiration (E), stomatal conductance (C), and vapor pressure deficit (VPD). The results showed that graphene positively influenced photosynthesis and stomatal conductance. The control treatment (0 mg/L of water) had a mean Pn of 17.57  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , while the treatment with 300 mg/L of water recorded 21.40  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Stomatal conductance was highest at the highest dose, reaching 681.10  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . These findings indicate that graphene acts as a physiological stimulant, improving photosynthetic efficiency and the uptake of water and nutrients, especially at higher doses. The results reinforce its potential in agriculture, aligning with studies that highlight its ability to activate water channels and cell extension proteins.

**Keywords:** Stomatal conductance. *Eruca Sativa*. Physiology. Nanotechnology. Gas exchange.

## Introdução

No Brasil, o cultivo de hortaliças é tradicionalmente realizado por pequenos produtores, desempenhando um papel essencial na economia e na vida social. Além de gerar empregos locais, essa prática fortalece as economias regionais e contribui para a segurança alimentar, ao garantir o abastecimento de alimentos frescos. O setor também promove sustentabilidade e preserva práticas culturais, atuando como um pilar econômico e social em várias comunidades, especialmente em tempos de crise (SILVA et al., 2021).

Segundo Silva et al., (2021) a rúcula (*Eruca sativa* L.), uma hortaliça folhosa nativa da região do Mediterrâneo e pertencente à família Brassicaceae, possui uma trajetória de introdução no Brasil que remonta à chegada de imigrantes italianos, os quais trouxeram a planta e seu consumo para o território brasileiro. Como discorre Lana (2022), com sabor picante e aroma característico, a rúcula conquistou espaço e preferência entre os brasileiros, sendo amplamente cultivada em diversas regiões do país. Além de seu valor gastronômico, ela é reconhecida por seu alto valor nutricional, sendo uma excelente fonte de ferro, essencial para a prevenção da anemia, além de fornecer cálcio, que contribui para a saúde óssea, e vitaminas A e C, nutrientes importantes para o sistema imunológico e para a manutenção da saúde da pele e da visão.

Devido ao seu método de cultivo relativamente descomplicado, ao rápido desenvolvimento vegetativo e ao ciclo de crescimento curto, a produção de rúcula tem se expandido significativamente em todo o Brasil. Essas características fazem com que a rúcula seja uma escolha popular entre os produtores, que conseguem colher mais rapidamente e responder com agilidade à crescente demanda do mercado. Com o aumento do consumo dessa hortaliça, torna-se essencial buscar métodos mais eficientes em todas as etapas da produção. Esse aprimoramento inclui a adoção de tecnologias que otimizem o plantio, o monitoramento do crescimento e a colheita, além de estratégias de manejo sustentável para garantir maior produtividade e qualidade do produto final (VERDE et al., 2022).

No final do século XX, a ascensão da nanociência e da nanotecnologia (N&N) marcou um avanço significativo, desafiando paradigmas e ampliando os horizontes do conhecimento por meio de uma abordagem pluridisciplinar. Essas tecnologias prometeram uma revolução científica e tecnológica ao possibilitar a manipulação de materiais em escala nanométrica, abrindo caminho para inovações que transformam áreas diversas como a medicina, a eletrônica e a agricultura. Caracterizadas por sua natureza altamente interdisciplinar, as N&N reúnem

conhecimentos de física, química, biologia e engenharia, permitindo a criação de produtos com aplicações em quase todos os âmbitos da vida humana. Na agricultura, por exemplo, o uso de nanopartículas pode aumentar a eficiência de fertilizantes e melhorar o controle de pragas, promovendo uma produção mais sustentável e eficaz (SALDIVAR et al., 2018).

Entre os materiais provenientes da nanotecnologia, os mais representativos são, possivelmente, os chamados nanomateriais de carbono, do qual pode se destacar grafeno (Zarbin & Oliveira, 2013). O grafeno trata-se de um subproduto do grafite composto formado por átomos de carbono dispostos em estruturas hexagonais em uma única camada bidimensional. Exibe propriedades singulares, como uma área superficial ampla, estabilidade química, alta condutividade, excelente biocompatibilidade e facilidade de funcionalização, o que o torna um material biocompatível aplicável em estruturas vegetais (LIU et al., 2013).

Segundo Alanis (2020) quando aplicado o grafeno pode ser observado o aumento de compostos fenólicos e, como consequência, a modificação do estado redox das células vegetais e ativação de dinâmicas de sinalização. Também foi constatado que o grafeno em concentrações baixas estimula tanto os canais de água quanto as proteínas de extensão da parede celular, promovendo assim a absorção de água e nutrientes, resultando em melhorias no crescimento das mudas e aceleração da fotossíntese (SAMADI et al., 2021).

Pesquisas também resumiram os possíveis mecanismos tóxicos do grafeno, como o aumento do estresse oxidativo, a inibição da atividade das enzimas antioxidantes, os desequilíbrios metabólicos no sistema antioxidante e a diminuição na produção de clorofila (WANG et al., 2019). Assim, o mecanismo pelo qual os nanomateriais afetam as plantas é complexo, pois requer consideração das propriedades dos nanomateriais e as particularidades das plantas.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo realizar avaliação comparativa das trocas gasosas em duas variedades de rúcula, submetidas a diferentes concentrações de grafeno. Sendo essa análise conduzida por meio de medições pontuais da taxa de fotossíntese e transpiração, utilizando o equipamento IRGA - Trocas Gasosas.

## **Material e métodos**

O experimento foi estabelecido em campo na área experimental do Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, situada nas coordenadas geográficas de latitude 15° 21' 03" S e

longitude 49° 35' 37" W, a uma altitude de 564 metros. O período experimental decorreu entre 31 de agosto e 15 de outubro de 2023. A área total do canteiro utilizado no experimento foi de 17,5 m<sup>2</sup>, com dimensões de 1,25 metro de largura por 14 metros de comprimento. Para avaliar a fertilidade do solo da área experimental, foi coletada uma amostra de solo, conforme método estabelecido por Gomes et al., (2019), na camada 0-20 cm de um Nitossolo em área do Bioma Cerrado, onde foram avaliadas as concentrações dos seguintes elementos químicos: : Ca = 3,01 (cmolc dm<sup>-3</sup>); Mg = 1,5 (cmolc dm<sup>-3</sup>); Al = 0,1 (cmolc dm<sup>-3</sup>); H+Al 1,3 (cmolc dm<sup>-3</sup>); P = 19,4 (mg dm<sup>-3</sup>); K = 102,5 (mg dm<sup>-3</sup>); pH = 6,3 (CaCl<sub>2</sub>); saturação por bases 71,1 % e M.O. = 17,2 g dm<sup>-3</sup>; argila 45,3 %..

Foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial 2x4, com o objetivo de avaliar os efeitos de diferentes doses de grafeno em duas cultivares de rúcula: Rúcula Cultivada e Rúcula Gigante Folha Larga. Foram aplicadas quatro doses de grafeno (0, 100, 200 e 300 mg/L de água), com três repetições. O grafeno utilizado foi proveniente da fonte Agrografeno, selecionada por suas propriedades específicas para aplicações agrícolas e potencial de promover melhorias no desenvolvimento das plantas, proporcionando uma análise comparativa dos efeitos do grafeno nas características agrônômicas das cultivares de rúcula.

As sementes foram obtidas em comércio local, semeadas no dia 23/08/2023 em bandejas plásticas de germinação e mantidas em casa de vegetação por 14 dias. O transplante das mudas para canteiro ocorreu no dia 31/08/2023. O desbaste foi no dia 04/09/2023, deixando 32 plantas por parcelas. Como fonte de adubação no momento do plantio utilizou-se 20 litros de esterco bovino curtido por metro quadrado. A adubação de cobertura ocorreu no dia 08/09/2023, aplicando-se ureia na dose de 100 mg/L de água. A irrigação foi realizada com microaspersores com turno de rega diário pela manhã e a tarde.

Vinte e cinco dias após o desbaste, foram realizadas análises das trocas gasosas utilizando um analisador portátil de gás infravermelho (IRGA). As medições ocorreram entre 9h e 12h, sendo realizadas na folha +1 das plantas. Durante o procedimento, a concentração de CO<sub>2</sub> no ar foi mantida fixa em 400 ± 5 μmol mol<sup>-1</sup>, enquanto a irradiação no interior da câmara foi ajustada para 1000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Foram determinadas as seguintes variáveis fisiológicas: taxa fotossintética líquida (Pn, μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), taxa de transpiração (E, mmol de H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), condutância estomática foliar (C, mol de H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) e o déficit de pressão de vapor (VPD, kPa). Essas medições visaram compreender os processos de troca gasosa em condições controladas, fornecendo dados detalhados sobre o funcionamento fisiológico das plantas.

Os dados foram tratados de acordo com metodologia estabelecida por Arnhold (2013). foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey com

nível de significância de 5%. Foram realizadas análises de regressão em função das doses de grafeno. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software R (R Development Core Team, 2014) com o pacote *easyanova*.

## Resultados e Discussão

Os resultados da análise de fertilidade do solo apresentaram os seguintes valores: cálcio (Ca) de  $2,65 \text{ cmolc dm}^{-3}$ , magnésio (Mg) de  $1,05 \text{ cmolc dm}^{-3}$ , alumínio (Al) de  $0,05 \text{ cmolc dm}^{-3}$  e hidrogênio (H) de  $3,5 \text{ cmolc dm}^{-3}$ . A concentração de fósforo (P) foi de  $7,65 \text{ mg dm}^{-3}$ , enquanto o potássio (K) alcançou  $81,0 \text{ mg dm}^{-3}$ . O pH do solo, medido em  $\text{CaCl}_2$ , foi de 5,1, com uma saturação por bases de 58,80% e teor de matéria orgânica (M.O.) de  $1,4 \text{ g kg}^{-1}$ . A textura foi classificada com um teor de argila de  $480 \text{ g kg}^{-1}$ , representando 48% da composição do solo, que conforme discute Klein e Klein (2015), representa um solo com alta capacidade de retenção de água e nutrientes, característica que pode influenciar diretamente a resposta das plantas aos tratamentos aplicados no experimento.

## Taxa líquida de fotossíntese

A análise da taxa líquida de fotossíntese ( $P_n$ ) em rúcula revelou variações significativas em resposta à aplicação de diferentes doses de grafeno (Tabela 1). O tratamento controle, representado pela Testemunha (T0), que não recebeu grafeno, apresentou uma média de  $P_n$  igual a  $17,57 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , sendo utilizado como referência para comparação com os demais tratamentos. Este valor indica a capacidade basal das plantas em realizar a fotossíntese na ausência do grafeno, permitindo avaliar se e como as doses aplicadas impactaram o desempenho fotossintético da rúcula em relação a esse padrão. As diferenças observadas entre os tratamentos refletem o efeito potencial do grafeno no metabolismo fotossintético das plantas, seja promovendo, inibindo ou não alterando a  $P_n$  em comparação ao controle.

**Tabela 1.** Taxa líquida de fotossíntese (PN), taxa de transpiração (E), condutância estomática da folha (C), déficit de pressão de vapor (VPD) de cultivares de rúculas com doses de grafeno.

Cultivares	PN ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	E ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	C ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	VDP (kpa)
Folha Larga	19,36a	9,30a	566,72a	1,96a

Cultivada	17,54a	9,14a	605,93a	1,73a
Dose (mg/L de água)	PN	E	C	VDP
T0 (Zero)	17,57 a	8,16 a	453,45b	2,08 a
T1 (100)	16,20 a	9,11 a	623,92a	1,73 a
T2 (200)	18,61 a	9,42 a	586,82a	1,91 a
T3 (300)	21,40 a	10,20 a	681,10a	1,66 a
CV (%)	18,57	15,13	23,68	20,99

Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T0 - Testemunha. T1 - aplicação de 100 mg de grafeno por litro de água T2 - aplicação de 200 mg de grafeno por litro de água T3 - aplicação de 300 mg de grafeno por litro de água.

Como pode ser observado na tabela 1, à medida que as doses de grafeno foram aumentadas nos tratamentos T1 (100 mg/L de água), T2 (200 mg/L de água) e T3 (300 mg/L de água), a taxa líquida de fotossíntese (Pn) das plantas de rúcula apresentou variações. No tratamento T1, com a dose inicial de 100 mg de grafeno/L de água, não houve diferença significativa em relação à testemunha (T0), pois os resultados foram praticamente iguais, e numericamente o T1 apresentou uma taxa líquida de fotossíntese menor que o T0. Isso sugere que, inicialmente, o grafeno não estimulou o metabolismo fotossintético das plantas.

No entanto, no tratamento T2 (200 mg/L de água), houve um aumento na taxa líquida de fotossíntese, e este aumento foi ainda mais pronunciado no tratamento T3 (300 mg/L de água), indicando que doses mais altas de grafeno podem ter um efeito estimulador na atividade fotossintética das plantas. Estes dados corroboram com a pesquisa de Samadi et al., (2021), observaram que o grafeno, em baixas concentrações, ativa canais de água e proteínas responsáveis pela extensão da parede celular, o que facilita a absorção de água e nutrientes, resultando em aumento no crescimento das mudas e acelerando o processo de fotossíntese.

A Figura 01 demonstra ajuste linear entre a dose de grafeno (mg/L de água) e a taxa líquida de fotossíntese (PN, em  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) em plantas de rúcula. A equação da reta obtida indica que, a cada incremento de 1 mg de grafeno/L de água aplicada, há um aumento médio de  $0,025 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  na taxa de fotossíntese. O coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,71$ ) revela que 71% da variação observada na taxa de fotossíntese é explicada pela variação na dose de grafeno, sugerindo uma correlação positiva e relativamente forte entre as variáveis.

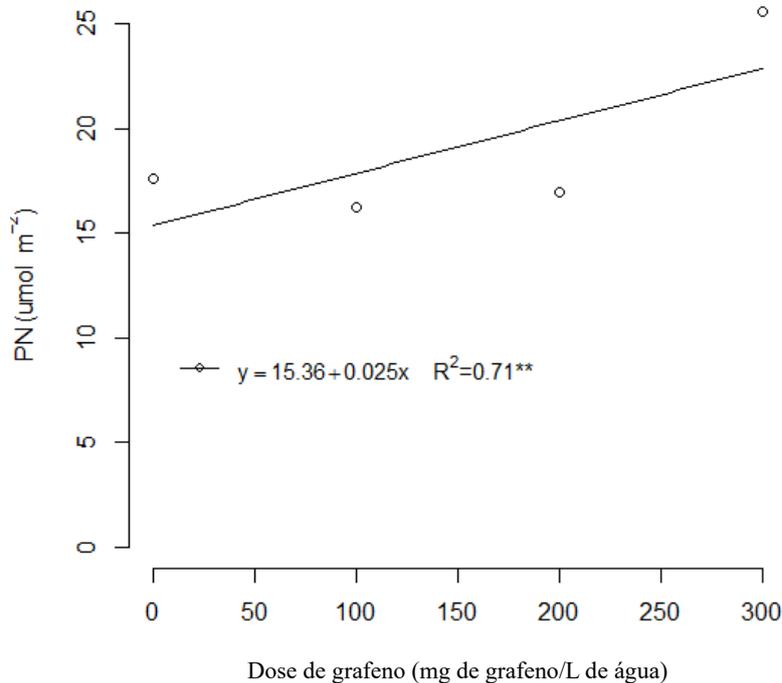


Figura 1. Efeito de diferentes doses de grafeno na taxa líquida de fotossíntese (PN) em plantas de rúcula

De acordo com May et al., (2024) o grafeno, quando aplicado em baixas concentrações, pode atuar como um estimulante do crescimento vegetal, promovendo efeitos positivos na fisiologia das plantas, como observado na cultura da rúcula. Sua estrutura bidimensional formada por átomos de carbono organizados em uma rede hexagonal confere propriedades únicas, como alta condutividade elétrica e ampla área superficial, favorecendo o transporte de elétrons e otimizando processos bioquímicos relacionados à fotossíntese.

Além disso, os autores citam que materiais derivados do grafeno, como o óxido de grafeno, apresentam boa estabilidade em meio aquoso e podem atuar na liberação controlada de nutrientes, contribuindo para uma nutrição mais eficiente e redução de perdas no ambiente. No entanto, os efeitos benéficos estão condicionados ao uso em doses adequadas, pois concentrações elevadas podem desencadear efeitos fitotóxicos, prejudicando o desenvolvimento vegetal e impactando negativamente as interações com microrganismos do solo (MAY et al., 2024).

O maior valor médio de taxa líquida de fotossíntese ( $21,40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) foi observado no tratamento T3 (300 mg/L de água), representando o patamar mais elevado entre os

tratamentos avaliados (Tabela 1). Esse valor foi aproximadamente 21,8% maior em relação à testemunha (T0), que apresentou média de  $17,57 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Apesar dessa diferença numérica, não houve distinção estatística entre os tratamentos, o que indica que o aumento observado pode não estar associado a um efeito direto e consistente da aplicação do grafeno. Portanto, embora os dados de T3 possam sugerir uma possível tendência de estímulo à fotossíntese em doses mais elevadas, essa hipótese necessita de confirmação por meio de análise de regressão ou novos ensaios com maior rigor estatístico. Assim, não se pode afirmar com segurança que houve um efeito crescente ou significativo do grafeno sobre a taxa de fotossíntese com base apenas nos valores médios.

Como afirmam Lavorato et al. (2013), o grafeno e seus derivados têm grande potencial para melhorar a fotossíntese das plantas devido às suas propriedades fotocatalíticas, otimizando reações sob luz visível ou UV. O grafeno pode ser dopado com heteroátomos<sup>1</sup> ou modificado para aprimorar sua atividade fotocatalítica, como na geração de oxigênio e hidrogênio. Isso potencializa a conversão de luz solar em energia química nas plantas, aumentando a eficiência fotossintética. Sua capacidade de melhorar a absorção de luz e gerar reações de oxidação favorece o processo biológico, e sua combinação com materiais como o dióxido de titânio pode aumentar ainda mais a eficiência sob luz visível. Esta argumentação, se adequa aos dados da pesquisa, onde a presença do grafeno, especialmente na dose mais elevada (T3), parece ter proporcionado condições mais favoráveis para as plantas, culminando em uma resposta fotossintética mais robusta.

Estudos recentes com o óxido de grafeno (GO) têm demonstrado benefícios significativos para o crescimento de plantas, especialmente em concentrações otimizadas. Por exemplo, no estudo de Guo et al., (2021) tratamentos com 50 mg/L de água de GO aumentaram em 31% a área total da superfície radicular e em 27% a área projetada total de raízes de tomate, quando comparados ao grupo controle. Além disso, o estudo de Wang et al., (2018) realizado com sementes de *Festuca arundinacea* (gramínea), comprovou que a aplicação de apenas 0,2 mg/L de água de GO melhorou significativamente a taxa de germinação. Em relação à taxa fotossintética, Zhang et al., (2018), apresentou dados sobre a *Aloe vera* (babosa), onde o uso de concentrações entre 10 e 100 mg/L de água aumentaram a eficiência fotossintética, o formato das folhas e a disponibilidade de proteínas e aminoácidos na parte aérea da planta.

---

<sup>1</sup> Átomos diferentes de carbono e hidrogênio presentes em moléculas orgânicas. Eles incluem elementos como oxigênio (O), nitrogênio (N), enxofre (S), fósforo (P), flúor (F), cloro (Cl), entre outros.

Como observado, os resultados apresentados sobre o impacto do grafeno na fotossíntese da rúcula corroboram com estudos recentes que destacam os benefícios de derivados do grafeno, como o óxido de grafeno (GO), no crescimento e metabolismo vegetal (Tabela 1). A tendência de aumento progressivo da taxa líquida de fotossíntese ( $P_n$ ) com doses crescentes de grafeno, alcançando um patamar máximo de  $21,40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  no tratamento T3 (300 mg/L de água), encontra respaldo na pesquisa de Zhang et al. (2018), que demonstrou que concentrações entre 10 e 100 mg/L de água de GO aumentaram a eficiência fotossintética em *Aloe vera*, aprimorando tanto a morfologia foliar quanto o conteúdo nutricional.

Adicionalmente, o aumento observado na  $P_n$  da rúcula se alinha com as descobertas de Samadi et al. (2021), que associaram o uso de grafeno em baixas concentrações à ativação de canais de água e proteínas envolvidas na extensão da parede celular, promovendo maior absorção de água e nutrientes e estimulando a fotossíntese. A resposta dose-dependente também foi evidenciada por Guo et al. (2021), que relataram incrementos significativos na área radicular de plantas de tomate, com 31% de aumento na superfície radicular e 27% na área projetada com 50 mg/L de água de GO. Assim, os dados sobre a rúcula reforçam a ideia de que o grafeno pode atuar como uma ferramenta promissora na otimização do desempenho fisiológico de plantas, especialmente em doses ajustadas para cada espécie.

Yang et al. (2022) destacam que o grafeno desempenha um papel importante em atividades metabólicas vegetais, como a retenção e o transporte de água, o aumento da fotossíntese e a estimulação da atividade de enzimas antioxidantes, incluindo superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT), posicionando o óxido de grafeno (GO) como um material nanocarbono promissor para aplicações agrícolas. Os resultados do presente estudo indicam que a aplicação de grafeno, especialmente em doses superiores, exerceu um impacto positivo na taxa líquida de fotossíntese na rúcula. Embora as diferenças entre os tratamentos não tenham sido estatisticamente significativas, os dados sugerem uma relação positiva entre a dosagem de grafeno e o aumento da fotossíntese, apontando para um potencial promissor que justifica investigações mais aprofundadas. Este cenário reforça a importância de explorar os benefícios do grafeno na otimização de processos fotossintéticos em culturas agrícolas, abrindo novas perspectivas para aplicações práticas e avanços na agricultura sustentável.

## Taxa de Transpiração

A avaliação da taxa de transpiração (E), (Tabela 01), revelou que tanto os cultivares quanto as doses de grafeno aplicadas não promoveram diferenças estatisticamente significativas entre si. Os cultivares "Folha Larga" e "Cultivada" apresentaram médias muito próximas, de 9,30 e 9,14  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ s, respectivamente, demonstrando respostas fisiológicas semelhantes em termos de perda de água pelas folhas. Entre os tratamentos com diferentes doses de grafeno, observou-se um aumento gradual da taxa de transpiração com o incremento das doses: o tratamento controle (T0) apresentou uma média de 8,16  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , enquanto o maior valor foi registrado no tratamento T3 (300 mg/L de água), com 10,20  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Apesar da ausência de diferença estatística entre os tratamentos, essa tendência crescente sugere um possível estímulo do grafeno sobre a abertura estomática ou sobre a atividade fisiológica das plantas, aumentando a transpiração. O coeficiente de variação de 15,13% indica uma variação moderada entre os dados, reforçando que, embora as médias sejam numericamente diferentes, a variabilidade experimental pode ter contribuído para a não significância estatística observada.

Embora os resultados obtidos não tenham apresentado diferença estatística significativa, a tendência de aumento da taxa de transpiração com o incremento das doses de grafeno sugere um possível efeito fisiológico positivo, possivelmente relacionado à estimulação estomática. Essa argumentação encontra respaldo no trabalho de Lan et al., (2020) que demonstrou o uso de sensores à base de óxido de grafeno capazes de monitorar em tempo real a transpiração foliar, indicando alta compatibilidade do grafeno com os tecidos vegetais e até mesmo potencial influência na dinâmica hídrica da planta. Dessa forma, os dados observados podem refletir efeitos sutis ainda não capturados estatisticamente, mas fisiologicamente relevantes.

Outro estudo com Grafeno, conduzido por Li et al., (2022) investigou o uso de sensores à base de óxido de grafeno para monitorar a transpiração em plantas de alface e observaram que a variação na condutividade elétrica do material estava fortemente correlacionada à taxa de perda de água pelas folhas. Os resultados apontam que sensores de grafeno são sensíveis a mudanças na umidade foliar, podendo ser utilizados como ferramenta indireta de mensuração da transpiração. Considerando que alface, assim como outras hortaliças folhosas, como a rúcula, são suscetíveis a variações hídricas, o emprego dessa tecnologia pode ser promissor para avaliar respostas fisiológicas sob diferentes condições de manejo e estresse ambiental.

## Condutância estomática

A condutância estomática revelou-se um indicador essencial na avaliação da resposta fisiológica das plantas aos tratamentos com grafeno. Os resultados da tabela 1, mostraram variações significativas entre os tratamentos T0, T1, T2 e T3, evidenciando o impacto do grafeno nas trocas gasosas das plantas de rúcula. O destaque foi o tratamento T3, que apresentou a maior média de condutância estomática ( $681,10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), indicando uma resposta positiva à dose mais elevada de grafeno no experimento.

A Figura 02 mostra a relação entre a dose de grafeno aplicada ao solo (mg/L de água) e a condutância estomática (C, em  $\text{mmol m}^{-2}$ ) das folhas de rúcula. A equação da regressão linear ajustada ( $C = 489,45 + 0,73x$ ) indica uma tendência de aumento da condutância estomática à medida que se elevam as doses de grafeno, com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,7028$ , o que revela que aproximadamente 70% da variação na condutância pode ser explicada pela variação nas doses de grafeno

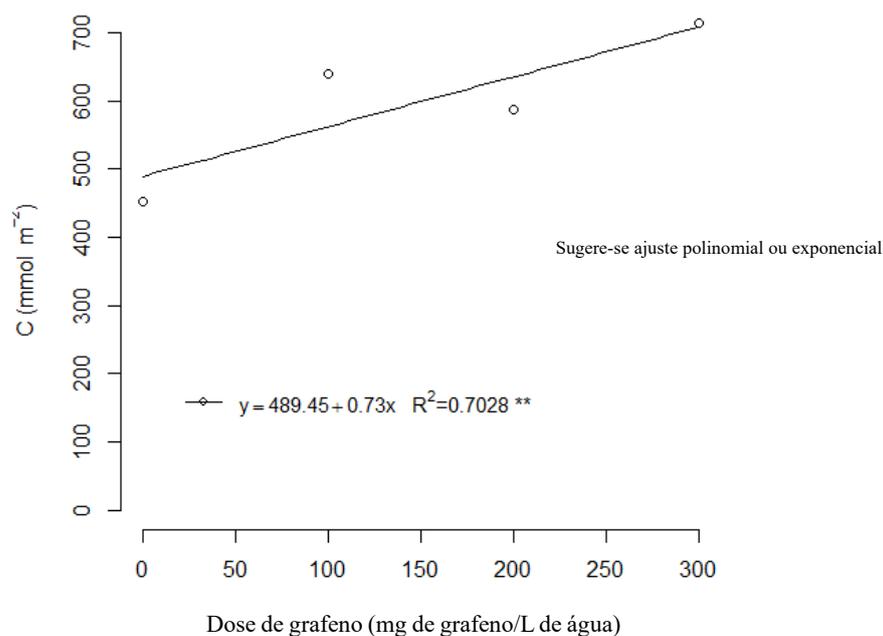


Figura 2. Efeito de diferentes doses de grafeno na condutância estomática de folhas de rúcula.

Esses resultados sugerem que o grafeno pode atuar positivamente na regulação estomática da rúcula, possivelmente melhorando a abertura estomática e, conseqüentemente, os processos de trocas gasosas e transpiração. Esse aumento da condutância pode estar relacionado a uma maior eficiência no uso da água ou ao estímulo à atividade fisiológica das plantas, como dados apresentados no estudo de Gao et al., (2020) onde o óxido de grafeno (GO) apresentou resultados positivos em melhorar a condutância estomática em plantas sob condições de estresse, incluindo a toxicidade por metais pesados como o cádmio ( $Cd^{2+}$ ).

Os autores argumentam que o grafeno auxilia na mitigação do estresse oxidativo ao reduzir a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) e melhorar a atividade de enzimas antioxidantes como a superóxido dismutase (SOD) e a catalase (CAT). No estudo, a aplicação foliar de 30 mg/L de água de GO em alface (*Lactuca sativa*) exposta ao  $Cd^{2+}$  aumentou significativamente a biomassa, reduziu a produção de ROS e promoveu a fotossíntese, o que, indiretamente, contribuiu para uma maior eficiência dos estômatos na regulação das trocas gasosas e na absorção de  $CO_2$ . Esses resultados destacam o potencial do GO para otimizar processos fisiológicos, como a condutância estomática, mesmo em condições adversas (Gao et al., 2020).

A pesquisa de Ozfidan-Konacki et al., (2021) realizada com plantas de trigo (*Triticum aestivum*), indica que o óxido de grafeno sulfonado (SGO) contribui para a melhoria da condutância estomática (gs) sob condições de estresse por nitrato (NS) e amônio (AS). Ao testar ambas as condições de estresse, foram reduzidas significativamente as taxas de condutância estomática, a taxa de assimilação de carbono (A), a concentração intercelular de  $CO_2$  (Ci) e a taxa de transpiração (E), enquanto aumentaram a limitação estomática, impactando negativamente a capacidade fotossintética das plantas. No entanto, a aplicação de SGO melhorou esses parâmetros de troca gasosa.

Em estudo recente, realizado com milho (*Zea mays* L.) os autores Wang et al., (2024), apontaram que o grafeno pode influenciar a condutância estomática em plântulas de milho, e que seu impacto depende diretamente da concentração utilizada. Em concentrações baixas a moderadas (25 e 50 g/kg por solo), o grafeno promoveu melhorias significativas nos parâmetros relacionados à fotossíntese, incluindo a taxa fotossintética líquida ( $P_n$ ), a condutância estomática (Cond), a taxa de transpiração (Tr) e a concentração intercelular de  $CO_2$  (Ci). Esses resultados indicam que o grafeno, em níveis adequados, pode estimular a abertura estomática e a eficiência do transporte de  $CO_2$ , resultando em uma maior capacidade fotossintética. Além disso, o grafeno aumentou a espessura das folhas e a área dos feixes vasculares, promovendo

um melhor transporte de água e nutrientes em concentrações moderadas. Esses fatores contribuíram para o aumento do acúmulo de biomassa, altura das plantas e diâmetro do caule, sendo a concentração de 50 g kg<sup>-1</sup> a mais eficaz.

Por exemplo, concentrações moderadas de SGO (50 e 250 mg/ L de água) atenuaram os efeitos negativos do estresse, aumentando a eficiência estomática e protegendo os processos fisiológicos das plantas. Em contraste, concentrações mais altas (500 mg/L de água) não foram eficazes para reduzir a produção de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e os danos associados, mostrando sinais de toxicidade. Assim, o SGO, em concentrações adequadas, demonstrou ser uma ferramenta eficaz para mitigar os impactos do estresse abiótico e melhorar a condutância estomática, contribuindo para a recuperação da capacidade fotossintética e o equilíbrio redox nas plantas.

A condutância estomática emergiu como um indicador essencial na avaliação da resposta fisiológica das plantas aos tratamentos com grafeno, apresentando variações significativas entre os tratamentos. O tratamento T3, (Tabela 1) com a maior concentração de grafeno evidenciou uma resposta positiva à dose elevada de grafeno, promovendo uma melhoria nas trocas gasosas e na absorção de CO<sub>2</sub>. Este resultado corrobora com as descobertas de Gao et al. (2020), que demonstraram que o óxido de grafeno (GO) pode melhorar a condutância estomática em plantas sob estresse abiótico, como a toxicidade por cádmio.

Em um cenário similar, o estudo de Ozfidan-Konacki et al. (2021), que utilizou óxido de grafeno sulfonado (SGO), observou que a aplicação de SGO mitigou os efeitos do estresse por nitrato e amônio, restaurando os parâmetros de troca gasosa, incluindo a condutância estomática. A recuperação desses parâmetros, especialmente a condutância estomática, foi ainda mais pronunciada em concentrações moderadas de SGO (50 e 250 mg/L de água), que atuaram de forma eficiente ao aumentar a eficiência estomática e proteger os processos fisiológicos das plantas.

Baseado nestes dados, é possível argumentar que, o grafeno pode atuar como um potencializador da condutância estomática em condições ideais, já que sua presença pode ajudar a manter o equilíbrio redox nas células, além de melhorar a estrutura foliar e o transporte de nutrientes e água, fatores que também influenciam positivamente a condutância estomática. Portanto, em condições normais, o grafeno pode não só manter ou melhorar a condutância estomática, mas também prevenir danos oxidativos, potencializando a resposta fisiológica das plantas e promovendo um crescimento mais eficiente e saudável.

Essa melhoria é respaldada pelos achados de Wang et al. (2024) sobre o efeito do grafeno em milho, que mostrou que concentrações moderadas (25 e 50 g/kg de solo) promovem aumentos na condutância estomática e na eficiência do transporte de CO<sub>2</sub>, resultando em maior capacidade fotossintética e maior acúmulo de biomassa. A correlação entre esses estudos sugere que, em concentrações adequadas, o grafeno favorece a regulação estomática e a absorção de CO<sub>2</sub>, promovendo a eficiência fotossintética.

### **Déficit de pressão de vapor**

A análise do Déficit de Pressão de Vapor (VPD), demonstrou que não houve diferenças estatísticas significativas entre os cultivares e as doses de grafeno aplicadas. Os cultivares "Folha Larga" e "Cultivada" apresentaram valores médios de VPD de 1,96 e 1,73 kPa, respectivamente, o que indica que ambos mantiveram condições semelhantes de equilíbrio hídrico entre o ar interno e externo à folha, sem alterações fisiológicas relevantes nessa variável.

Em relação às doses de grafeno, observou-se uma leve tendência de redução do VPD com o aumento da concentração, partindo de 2,08 kPa no tratamento controle (T0) para 1,66 kPa na dose mais elevada (T3 – 300 mg/L de água). Essa diminuição, ainda que não estatisticamente significativa, pode indicar um possível efeito do grafeno na regulação da perda de água pelas folhas, talvez associado à melhoria na eficiência estomática, como observados na tabela 01 e no gráfico 02, ou à maior retenção de umidade. O coeficiente de variação de 20,99% revela uma variabilidade relativamente alta entre as amostras, o que pode ter influenciado na ausência de significância estatística entre os tratamentos.

Conforme Li et al. (2024), o emprego de sensores de óxido de grafeno diretamente sobre a epiderme foliar possibilita a detecção em tempo real de variações na condutância estomática, revelando que, à medida que o grafeno estimula a abertura dos estômatos e eleva sua condutância, observa-se uma diminuição praticamente proporcional no déficit de pressão de vapor (VPD). Esse comportamento demonstra que o grafeno não apenas atua como material sensível para mensuração precisa das trocas gasosas, mas também contribui para a regulação hídrica das plantas, ajudando a manter o equilíbrio entre a pressão de vapor interna e externa às folhas.

Em um estudo recente, Yin et al. (2021) usaram milho (*Zea mays*) e grafeno ativado por laser (LIG) como material sensível para medir o déficit de pressão de vapor (VPD) nas folhas. O sensor foi capaz de capturar com precisão as variações do VPD ao longo do dia e da noite,

além de responder a eventos de irrigação e mudanças na iluminação. Durante o dia, quando a luz era mais intensa, o sensor detectou aumento na temperatura das folhas e redução na umidade relativa (RH), fazendo com que o VPD subisse acima de 1 kPa, o que indicou maior transpiração.

Após a irrigação, o VPD caiu rapidamente de 1,3 kPa para 0,4 kPa, refletindo o aumento do RH e o resfriamento das folhas pela transpiração. Esses resultados mostram que o grafeno, incorporado ao sensor, oferece alta sensibilidade e rápida resposta às mudanças no ambiente, além de se manter estável por 16 dias de monitoramento em estufa e campo. Dessa forma, o grafeno se revela uma ferramenta eficaz para monitorar o equilíbrio hídrico das plantas e pode ser útil no manejo da irrigação e em estudos sobre a fisiologia das plantas (YIN et al., 2021).

## Conclusão

Os resultados indicam que doses mais altas de grafeno (principalmente 300 mg/L de água) tendem a estimular a fotossíntese na rúcula.

A transpiração aumenta com as doses de grafeno, de 8,16 para 10,20  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

A condutância estomática aumenta de forma linear com o uso do grafeno, alcançando 681  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em 300 mg/L de água ( $R^2 = 0,70$ ).

O VPD apresentou leve queda, de 2,08 para 1,66 kPa, à medida que o grafeno aumentou, reforçando a relação inversa entre condutância e déficit de vapor.

## Referências

ALANIS, A.; C. **Respuestas fisiológicas y bioquímicas de Cucurbita pepo asociadas al efecto de nanopartículas de óxido de cobre y grafeno**. Tese, 114 pág. Doutorado em Ciências e Agroplasticultura. Centro de Investigación em Química Aplicada. 2020.

ARNHOLD, E. Package in the R environment for analysis of variance alannd complementary analyses. **Brazilian Journal Veterinary Reseach Animal Science**, São Paulo, v.50, n.6, p.488-492, 2013.

GAO, M.; CHANG, X.; YANG, Y.; SONG, Z. Foliar graphene oxide treatment increases photosynthetic capacity and reduces oxidative stress in cadmium-stressed lettuce. **Plant Physiology and Biochemistry**, 154, 287-294. 2020.

GOMES, L. L.; BUSO, W. H. D.; LIMA, J. B.; LEÃO JÚNIOR, L. A. Uso da gessagem e adubação nitrogenada na cultura da rúcula. **Revista Mirante**, Anápolis (GO), v. 12, n. 1, jun. 2019.

GUO, X.; ZHAO, J.; WANG, R.; ZHANG, H.; WU, J. Efeitos do óxido de grafeno no crescimento do tomate em diferentes estágios. **Plant Physiol. Biochem**, 162, 447–455. 2021.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água no solo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 21-29, 27 jul. 2015.

LAN, L., XIANHAO, L., DONG, H., XIE, J., YING, Y., PING, J. Fabricação em etapa única e em larga escala de sensor de umidade flexível e vestível baseado em grafeno induzido por laser para monitoramento em tempo real da transpiração de plantas na interface biológica. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 165, p. 112360, 2020.

LANA, M. M. **Hortaliça não é só salada**. Embrapa Hortaliças, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/hortalica-nao-e-so-salada/rucula>. Acesso em 26 de dezembro de 2023.

LAVORATO, C. **Graphene and titanium based semiconductors in photocatalytic hydrogen and oxygen generation and hydrogenation of organics also in membrane reactors**. 290 pág. Tese de Doutorado. Doutorado em Engenharia Química e de Materiais. Universidade da Calábria. 2013.

LI, D., LI, G., LI, J., & XU, S. Wearable crop sensor based on nano-graphene oxide for noninvasive real-time monitoring of plant water. **Membranes**, 12(4), 358. 2022.

LIU, J.; CUI, L.; LOSIC, D. Graphene and graphene oxide as new nanocarriers for drug delivery applications. **Acta biomaterialia**, v. 9, n. 12, p. 9243-9257, 2013.

MAY, A., HALFELD-VIEIRA, B. D. A., JONSSON, C., BATISTA, E., QUEVEDO, H., NECHET, K. D. L., ... & VIEIRA JUNIOR, N. A. (2024). **Materiais baseados em grafeno para uso na agricultura**. Reporte Técnico. EMBRAPA. 2024.

OZFIDAN-KONAKCI, C., YILDIZTUGAY, E., CAVUSOGLU, H., ARIKAN, B., ELBASAN, F., KUCUKODUK, M., & TURKAN, I. Influences of sulfonated graphene oxide on gas exchange performance, antioxidant systems and redox states of ascorbate and glutathione in nitrate and/or ammonium stressed-wheat (*Triticum aestivum* L.). **Environmental Science: Nano**, 8(11), 3343-3364. 2021.

SALDIVAR, R. H. L.; ARGÜELLO, B. M.; VILLARREAL, G. S.; REYES, I. V. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. **Acta Universitária**, 28 (2), 9-24, 2018.

SAMADI, S. et al. Effect of carbon nanomaterials on cell toxicity, biomass production, nutritional and active compound accumulation in plants. **Environmental Technology & Innovation**, v. 21, p. 101323, 2021.

SAMADI, S.; LAJAYER, B. A.; MOGHISEH, E.; RODRÍGUEZ-COUTO, S. Effect of carbon nanomaterials on cell toxicity, biomass production, nutritional and active compound accumulation in plants. **Environmental Technology and Innovation**, 21(May). 2021.

SILVA, C. P.; CRIVELARI, A. D.; CORREA, J. S. Desenvolvimento de mudas de alface e rúcula tratadas com biofertilizante de extrato de algas. **Científic@-Multidisciplinary Journal**, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2021.

VERDE, F. N.; RODRIGUES, N. F.; CORREA, G. M.; TAVARES, S. R. L.; HUTHER, C. M. **Efeito de diferentes substratos na germinação da rúcula**. CONVIBRA: EMBRAPA. 2022. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1144884/1/Efeito-de-diferentes-substratos-na-germinacao-da-rucula-2022.pdf>. Acesso em: 10/11/2024.

WANG, XJ; ZHAO, SL; DUO, LA. Efeito do tratamento de sementes com óxido de grafeno na germinação de sementes e no crescimento de mudas de *Festuca arundinacea* . **Seed**, 37 , 1–4. 2018.

WANG, Q. et al. Phytotoxicity of graphene family nanomaterials and its mechanisms: A review. **Frontiers in chemistry**, v. 7, p. 292, 2019.

WANG, S., WANG, X., LIU, Y., SUN, G., KONG, D., GUO, W., & SUN, H. Regulatory effect of graphene on growth and carbon/nitrogen metabolism of maize (*Zea mays* L.). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 104(3), 1572-1582. 2024.

YANG, Y.; ZHANG, R.; ZHANG, X.; CHEN, Z.; WANG, H.; LI, P. C. H. Effects of graphene oxide on plant growth: A review. **Plants**, 11(21), 2826. 2022.

YIN, S., IBRAHIM, H., SCHNABLE, P. S., CASTELLANO, M. J., & DONG, L. A field-deployable, wearable leaf sensor for continuous monitoring of vapor-pressure deficit. **Advanced Materials Technologies**, 6(6), 2001246. 2021.

ZARBIN, Aldo JG; OLIVEIRA, Marcela M. Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo Vadis?. **Química Nova**, v. 36, p. 1533-1539, 2013.

ZHANG, X.; CAO, H.; ZHAO, J.; WANG, H.; ZHANG, J. O óxido de grafeno exibiu efeitos positivos no crescimento de Aloe vera L. **Physiol. Mol. Biol. Plants** 2018 , 27 , 815–824.