

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

Discente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Ceres / GO
joaoguilhermepallin@gmail.com

WILIAN HENRIQUE DINIZ BUSO

Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Ceres / GO
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⁻¹ de água). O experimento foi realizado em campo no IF Goiano – Campus Ceres, entre agosto e outubro de 2023, utilizando delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial de 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 apresentaram que o grafeno influenciou positivamente 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).

O uso de 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, com o presente trabalho objetivou avaliar as trocas gasosas em duas variedades de rúcula, submetidas a diferentes concentrações de grafeno.

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 m², 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: : Os resultados da análise de fertilidade do solo apresentaram os seguintes valores: cálcio (Ca) de 2,65 cmolc dm⁻³, magnésio (Mg) de 1,05 cmolc dm⁻³, alumínio (Al) de 0,05 cmolc dm⁻³ e hidrogênio (H) de 3,5 cmolc dm⁻³. A concentração de fósforo (P) foi de 7,65 mg dm⁻³, enquanto o potássio (K) alcançou 81,0 mg dm⁻³. O pH do solo, medido em CaCl₂, foi de 5,1, com uma saturação por bases de 58,80% e teor de matéria orgânica (M.O.) de 1,4 g kg⁻¹. A textura foi classificada com um teor de argila de 480 g kg⁻¹, 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.

Foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial de 2x4, duas cultivares de rúcula: Rúcula Cultivada e Rúcula Gigante Folha Larga e quatro doses de grafeno (0, 100, 200 e 300 mg L⁻¹ 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 realizado quatro dias após o transplante das mudas, 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^{-1} de água. A irrigação foi realizada com microaspersores com turno de rega diário pela manhã e a tarde.

Foram realizadas análises das trocas gasosas 25 dias após o desbaste, 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_2 no ar foi mantida fixa em $400 \pm 5 \text{ } \mu\text{mol mol}^{-1}$, enquanto a irradiação no interior da câmara foi ajustada para $1000 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Foram determinadas as seguintes variáveis fisiológicas: taxa fotossintética líquida (P_n , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), taxa de transpiração (E , $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática foliar (C , $\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 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.

Resultados e discussão

As médias da taxa líquida de fotossíntese (P_n) para as cultivares e doses de grafeno são apresentados na Tabela 1. As cultivares apresentaram valores iguais para todas as variáveis avaliadas neste estudo.

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

Cultivares	P_n ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	E ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	C ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	VPD (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)	P_n	E	C	VPD
T0 (Zero)	17,57	8,16	453,45	2,08
T1 (100)	16,20	9,11	623,92	1,73
T2 (200)	18,61	9,42	586,82	1,91
T3 (300)	21,40	10,20	681,10	1,66
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. Fonte: Autores, 2023.

Os dados 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*.

A Figura 1 demonstra ajuste linear entre a dose de grafeno (mg L^{-1} 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^{-1} 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. 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. Na 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.

Além disso, nanomateriais 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).

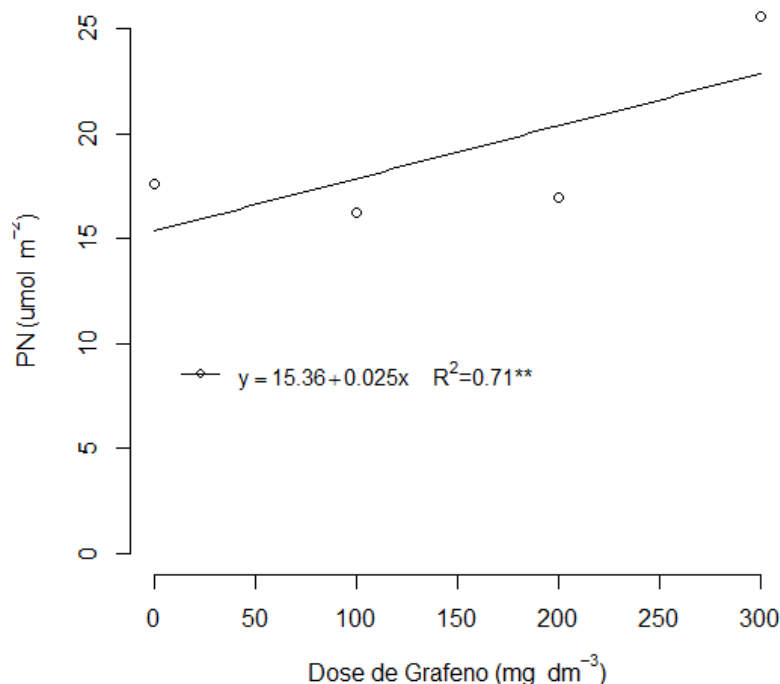


Figura 1. Efeito de diferentes doses de grafeno na taxa líquida de fotossíntese (PN) em plantas de rúcula.
Fonte: Autores, 2023.

Estudos recentes com o óxido de grafeno (GO) têm demonstrado benefícios significativos para o crescimento de plantas. No estudo de Guo et al., (2021) tratamentos com 50 mg L⁻¹ 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⁻¹ de água de GO melhorou significativamente a taxa de germinação. Em relação a taxa fotossintética, Zhang et al., (2018), apresentou dados sobre a *Aloe vera* (babosa), onde o uso de concentrações entre 10 e 100 mg L⁻¹ de água aumentaram a eficiência fotossintética, o formato das folhas e a disponibilidade de proteínas e aminoácidos na parte aérea da planta.

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 $21,40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ na dose 300 mg L^{-1} de água, encontra respaldo na pesquisa de Zhang et al. (2018), que demonstrou que concentrações entre 10 e 100 mg L^{-1} de água de GO aumentaram a eficiência fotossintética em *Aloe vera*, aprimorando tanto a morfologia foliar quanto o conteúdo nutricional.

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.

A avaliação da taxa de transpiração (E), (Tabela 1), revelou que tanto os cultivares quanto as doses de grafeno aplicadas não promoveram diferenças estatisticamente significativa, e não ocorreu ajuste aos modelos linear e quadrático. 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 (0) apresentou uma média de $8,16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, enquanto para a dose de 300 mg L^{-1} de água foi de $10,20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

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. No trabalho de Lan et al., (2020) observaram que 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.

Pesquisa conduzida 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.

A condutância estomática (C) revelou-se um indicador importante na avaliação da resposta fisiológica das cultivares e doses de grafeno Tabela 1. A Figura 2 mostra a relação entre a dose de grafeno aplicada ao solo (mg L^{-1} de água) e a condutância estomática (C, em 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. 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⁻¹ de água de GO em alface (*Lactuca sativa*) exposta ao Cd²⁺ 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 CO₂. Esses resultados destacam o potencial do GO para otimizar processos fisiológicos, como a condutância estomática, mesmo em condições adversas (Gao et al., 2020).

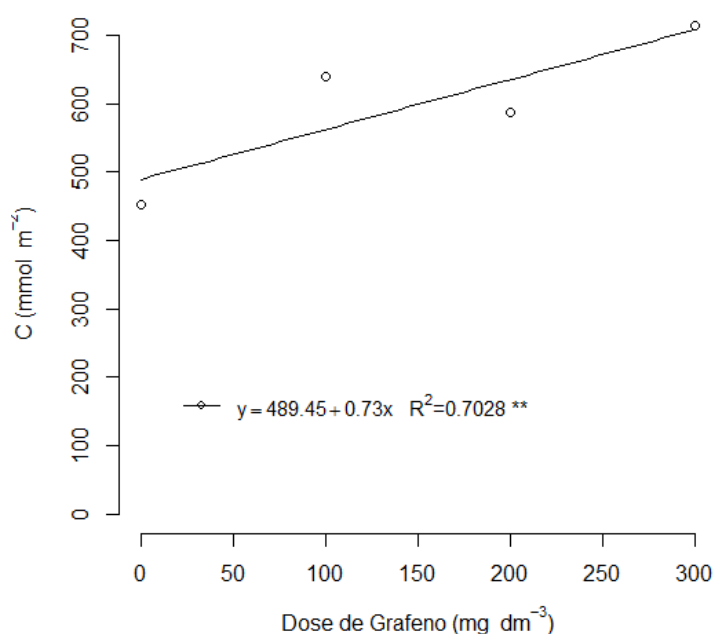


Figura 2. Efeito de diferentes doses de grafeno na condutância estomática de folhas de rúcula.
Fonte: Autores, 2023.

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 CO₂ (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 pesquisa 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⁻¹ por solo), o grafeno promoveu melhorias significativas nos parâmetros relacionados à fotossíntese, incluindo a taxa fotossintética líquida (Pn), a condutância estomática (Cond), a taxa de transpiração (Tr) e a concentração intercelular de CO₂ (Ci). Esses resultados indicam que o grafeno, em níveis adequados, pode estimular a abertura estomática e a eficiência do transporte de CO₂, 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⁻¹ a mais eficaz. Concentrações moderadas de SGO (50 e 250 mg L⁻¹ 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⁻¹ de água) não foram eficazes para reduzir a produção de H₂O₂ 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.

Baseado nos dados presente pesquisa, 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.

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 (Tabela 1).

Em relação às doses de grafeno, não observou ajustes aos modelos linear e quadrático (Tabela 1). As medidas evidenciam que o uso do grafeno não promove efeitos no VPD.

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

A dose de 300 mg L⁻¹ de água tende a estimular a fotossíntese na rúcula.

A transpiração aumenta com as doses de grafeno, de 8,16 para 10,20 µmol m⁻² s⁻¹.

A condutância estomática aumenta de forma linear com o uso do grafeno.

O VPD apresenta tendência de decréscimo, com aumento de dose de grafeno.

Referências

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**, v.12, n.1, 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**, v.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**, v. 19, n.1, p.21-29, 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.

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**, v.12, n.4, p.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. **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**, v.8, n.11, p.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**, v.28, n.2, p.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**, v.21, 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**, v.3, p.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**, v.104, n.3, p.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**, v.11, n.21, p.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**, v.6, n.6, p.2001246. 2021.

ZARBIN, A.J.G.; OLIVEIRA, M.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**, v.27, p.815–824, 2018