

INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS CERES
BACHARELADO EM AGRONOMIA
LUCAS ALVES DOS SANTOS

USO DE GRAFENO NA EMERGÊNCIA E GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE
ALGODÃO (*Gossypium hirsutum* L.)

CERES-GO
2025

LUCAS ALVES DOS SANTOS

**USO DE GRAFENO NA EMERGÊNCIA E GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE
ALGODÃO (*Gossypium hirsutum* L.)**

Trabalho de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Agronomia, sob orientação do Prof. Dr. Luís Sérgio Rodrigues Vale.

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**

S237u Santos, Lucas Alves dos
USO DE GRAFENO NA EMERGÊNCIA E GERMINAÇÃO DE
SEMENTES DE ALGODÃO (*Gossypium hirsutum* L.) / Lucas
Alves dos Santos. Ceres 2025.
28f. il.
Orientador: Prof. Dr. Luís Sérgio Rodrigues Vale.
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0320024 -
Bacharelado em Agronomia - Ceres (Campus Ceres).
1. Agricultura. 2. Bioestimulante. 3. Fertilizantes. 4.
Nanomateriais. 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: Lucas Alves dos Santos

Matrícula: 2019103200240188

Título do Trabalho: Avaliação do uso de grafeno na emergência e germinação de sementes de algodão (*Gossypium hirsutum* L).

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 18/06/2025

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:

1. 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;
2. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos 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;
3. 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, 16 de junho de 2025.

Assinatura eletrônica do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Lucas Alves dos Santos

Ciente e de acordo:



Documento assinado digitalmente
LUCAS ALVES DOS SANTOS
Data: 16/06/2025 18:38:11 -0300
Verifique em: <https://validar.ig.gov.br>

Assinatura eletrônica do orientador

Luís Sérgio Rodrigues Vale



Documento assinado digitalmente
LUIS SERGIO RODRIGUES VALE
Data: 16/06/2025 17:29:43 -0300
Verifique em: <https://validar.ig.gov.br>

ANEXO IV - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao(s) Seis dia(s) do mês de junho do ano de dois mil e vinete e cinco realizou-se a defesa de Trabalho de Curso do(a) acadêmico(a) Lucas Alves dos Santos, do Curso de Agronomia, matricula _____, cujo título é "Avaliação do uso de Grafeno na Emergência e germinação de sementes de algodão (*Gossypium hirsutum* L.)". A defesa iniciou-se às 8 horas e 06 minutos, finalizando-se às 10 horas e 57 minutos. A banca examinadora considerou o trabalho Aprovado com média 7,96 no trabalho escrito, média 8,46 no trabalho oral, apresentando assim média aritmética final 8,21 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.

Julio Sérgio Rodrigues Valle

Assinatura Presidente da Banca

Alexandra Valéria Sousa Costa de Lima

Assinatura Membro 1 Banca Examinadora

Carlos do Silva Carneiro

Assinatura Membro 2 Banca Examinadora

Dedico este trabalho primeiramente a Jeová, nosso Deus, fonte de toda sabedoria e vida.

Aos meus pais, Leonilson Sertão dos Santos e Laura Cristina Pereira Alves por todo esforço e sacrifício.

Ao meu irmão Victor Manuel Alves dos Santos por ser meu melhor amigo.

Aos meus irmãos de congregação e amigos por toda ajuda durante este trajeto.

AGRADECIMENTOS

A Jeová, fonte de vida, detentor de todo conhecimento, Aquele que nos ama e deseja sempre o nosso melhor. Toda capacidade que tenho é graças a Ele, por isso prometo que em tudo que eu executar como Agrônomo, farei como que para Ele.

Aos meus pais, que me amam, que sempre procuravam e procuram fazer o melhor para mim. Mesmo longe sei que posso contar com eles, mesmo hoje no presente me lembro dos sacrifícios do passado e ainda sei que existem muitos outros além destes que conheço.

A meu irmão, por ser meu melhor amigo, por fazer parte da minha história. Me sinto feliz em saber que tenho sua parceria, que posso contar com você.

Pela minha família como um todo, como é bom termos um porto seguro para dias difíceis e desafiadores.

Aos meus irmãos de fé que sempre me deram bons conselhos, que me revigoraram em momentos de necessidade, até mesmo quando eu não sabia que precisava.

Ao apoio do meu professor-orientador Luís Sérgio Rodrigues Vale que com sua ilustre didática, paciência e claro amor pela profissão me permitiu concluir esta etapa.

E por fim, agradeço a todos os que contribuíram diretamente ou indiretamente para a realização desse trabalho, tais como: amigos, familiares, técnicos responsáveis pelo setor do IF Goiano – Campus Ceres e todos os envolvidos.

RESUMO

O uso do grafeno como nanomaterial é uma alternativa sustentável na aplicação na agricultura e tem-se mostrado como uma opção promissora. Neste trabalho foi avaliado o efeito de diferentes doses de grafeno puro sobre a germinação e emergência de sementes de algodão. Foram realizados dois experimentos: um em papel germitest, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), e outro em canteiro com areia, em delineamento em blocos casualizados (DBC), ambos com seis doses de grafeno (0; 5; 10; 15; 20; 25 mL) e quatro repetições. No teste em papel germitest, observou-se efeito significativo das dosagens sobre todas as variáveis analisadas. A germinação apresentou incremento até a dosagem de 12,83 mL, com redução a partir de dosagens mais elevadas. O comprimento de raízes aumentou até a dosagem de 13,13 mL e a massa seca atingiu o ponto de máxima a 13,93 mL de grafeno. Em todos os casos, a ausência do grafeno resultou nos menores resultados. No experimento em areia não houve diferença estatística entre os tratamentos. O grafeno apresenta potencial como bioestimulante na germinação de sementes de algodão, mas sua eficiência está condicionada à dose, forma de aplicação e ao tipo de substrato utilizado.

Palavras-chave: Agricultura; Bioestimulante; Fertilizantes; Nanomateriais.

ABSTRACT

The use of graphene as a nanomaterial is a sustainable alternative for agricultural applications and has shown promising potential. This study evaluated the effect of different doses of pure graphene on the germination and emergence of cotton seeds. Two experiments were carried out: one using germitest paper, in a completely randomized design (CRD), and another in a sand bed, in a randomized block design (RBD), both with six graphene doses (0, 5, 10, 15, 20, and 25 mL) and four replications. In the germitest paper test, a significant effect of the doses was observed on all analyzed variables. Germination increased up to the dose of 12.83 mL, with a reduction at higher doses. Root length increased up to 13.13 mL, and dry mass reached its maximum at 13.93 mL of graphene. In all cases, the absence of graphene resulted in the lowest values. In the sand experiment, no statistical differences were observed among treatments. Graphene shows potential as a biostimulant in cotton seed germination, but its effectiveness depends on the dose, application method, and type of substrate used.

Keywords: Agriculture; Biostimulant; Fertilizers; Nanomaterials.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparação da nanoescala com diferentes dimensões, desde moléculas pequenas, como a da água, passando por macromoléculas biológicas, como proteínas e vírus, até a escala micrométrica das células	3
Figura 2 – Representação do grafeno como estrutura fundamental dos materiais de carbono. Sua forma bidimensional (2D) pode ser transformada em diferentes estruturas: enrolada para formar nanotubos (1D), dobrada para originar fulerenos (0D) ou empilhada para compor o grafite (3D).....	5
Figura 3 – Diferentes modos de produção do grafeno.	6
Figura 4 – Sementes pós tratamento e submetidas a secagem natural.....	13
Figura 5 – Covas para semeadura de sementes de algodão.....	14
Figura 6 – Germinação (%) de sementes de algodão sob doses de grafeno.....	16
Figura 7 – Comprimento de raiz do teste de TPG sob doses de grafeno.....	17
Figura 8 – Massa seca de plântulas normais do TPG sob doses de grafeno	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – ANOVA para Germinação, comprimento de raiz e de massa seca de sementes de algodão sob doses de grafeno	15
Tabela 2 – Matriz de correlação de Pearson para as variáveis TPG, comprimento de raiz (CR), massa seca (MS) do teste em papel germitest	19
Tabela 3 – ANOVA da emergência, comprimento de raiz e de massa seca de sementes de algodão em areia sob doses de grafeno	19
Tabela 4 - Emergência, Comprimento de raiz e massa seca de plântulas de algodão em areia	20

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
3 MATERIAL E MÉTODOS	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
5 CONCLUSÕES	23
REFERÊNCIAS.....	24

1 INTRODUÇÃO

Na última década, a nanotecnologia e os nanomateriais vêm sendo amplamente aplicados na agricultura para favorecer o desenvolvimento das plantas, aumentar a produtividade, proteger contra pragas e patógenos e otimizar o armazenamento dos produtos agrícolas (Xu, 2022, p. 232).

Dentre as diversas nanotecnologias desenvolvidas aplicadas na agricultura destaca-se o grafeno, um material que tem despertado grande interesse devido às suas propriedades físico-químicas únicas. Esse produto vem sendo usado em diversos setores da agricultura. (May *et al.*, 2021).

Os nanomateriais de grafeno têm sido empregados de múltiplas formas, atuando como estimuladores do crescimento vegetal e fertilizantes (Zaytseva; Neumann, 2016), em sistemas de nanoencapsulamento e liberação controlada de compostos ativos (Andelkovic *et al.*, 2018; Kabiri *et al.*, 2017), como agentes antifúngicos e antibacterianos (Wang *et al.*, 2014), na quantificação de pesticidas (Hou *et al.*, 2013).

Estudos relatam que, dentre as doses utilizadas no seu respectivos experimentos, as doses mais baixas os nanomateriais de grafeno podem estimular o crescimento vegetal. No entanto, quando E aplicados em doses mais elevadas ($\geq 50 \text{ mg L}^{-1}$), os mesmos materiais podem inibir o desenvolvimento das plantas (Anjum *et al.*, 2014).

Fertilizantes nanoestruturados, com alta eficiência de transporte e liberação controlada, são considerados o padrão ideal para impulsionar a agricultura, e o grafeno desponta como um material promissor nesse contexto. Fertilizantes convencionais apresentam limitações como a liberação acelerada dos princípios ativos, baixa eficiência de absorção, rápida degradação e limitada estabilidade, fatores que frequentemente exigem aplicações repetidas ou excessivas (Bhattacharya, *et al.*, 2023).

A incorporação de grafeno no desenvolvimento de fertilizantes tem se mostrado eficiente na redução de perdas e no aumento da disponibilidade de nutrientes para as plantas, o que reforça a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o uso de nanomateriais em culturas de alto valor, como o algodão (Andelkovic *et al.*, 2018; Kabiri *et al.*, 2017).

O algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) é uma cultura de grande relevância econômica, sendo fundamental para a indústria têxtil e uma importante fonte de óleo e farelo. Na safra 2024/2025, o Brasil cultivou cerca de 2,1 milhões de hectares, com produção estimada em 3,9 milhões de toneladas de pluma, movimentando aproximadamente 40 bilhões de reais por ano. Em Goiás, a produção também se destacou, alcançando 64.831 toneladas na safra atual. Esse crescimento está diretamente relacionado ao uso de tecnologias, manejo eficiente e sementes de qualidade (Abrapa, 2024; Conab [s.d.]).

Os fertilizantes desempenham um papel fundamental na cotonicultura devido às respostas positivas da cultura, especialmente em solos com deficiência nutricional. Em ambientes com acidez e baixa fertilidade, a produtividade do algodão tende a ser comprometida, exigindo alto investimento em insumos. Nesse cenário, o grafeno surge como uma alternativa promissora, capaz de aumentar a eficiência dos fertilizantes e reduzir seu consumo (Bono; Alburquerque & Spekken, 2006; Sales *et al.*, 2024; Bhattacharya, *et al.*, 2023).

No entanto, os efeitos do grafeno ainda são pouco explorados na cultura do algodão, especialmente nas fases iniciais de desenvolvimento das plântulas. Assim, objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito de diferentes doses de grafeno puro sobre a germinação, o comprimento de raízes e a massa seca de plântulas de algodão, utilizando dois tipos de substrato.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A manipulação de átomos e moléculas em escala nanométrica, chamada nanomanipulação, começou a ganhar força em 1959, quando Richard Feynman destacou que não havia impedimentos físicos para construir dispositivos manipulando átomos individuais. Ele ainda afirmou que essa tecnologia seria inevitável e traria aplicações importantes em diversas áreas do conhecimento (Embrapa, [s.d.]).

A pesquisa em nanotecnologia no Brasil ganhou força no final da década de 1990. Em 2001, foi criada a iniciativa brasileira em nanotecnologia e, no ano seguinte, um estudo da Presidência da República destacou sua importância. Esse movimento levou à formação de redes de pesquisa, com a participação de diversas instituições, incluindo a Embrapa (Embrapa, [s.d.]).

A nanotecnologia consiste no estudo e na manipulação de materiais em escala nanométrica, variando entre um e cem nanômetros. Essa área da ciência possibilita o desenvolvimento de novos materiais, dispositivos e sistemas com propriedades exclusivas e grande potencial de inovação em diferentes setores, como agricultura, medicina, cosméticos, entre outros. Para se ter uma ideia da dimensão de um "nano", ele é cerca de cem mil vezes menor que um fio de cabelo, trinta mil vezes menor que um fio de teia de aranha ou aproximadamente setecentas vezes menor que um glóbulo vermelho (Ramos & Engelmann, 2023, p. 381).

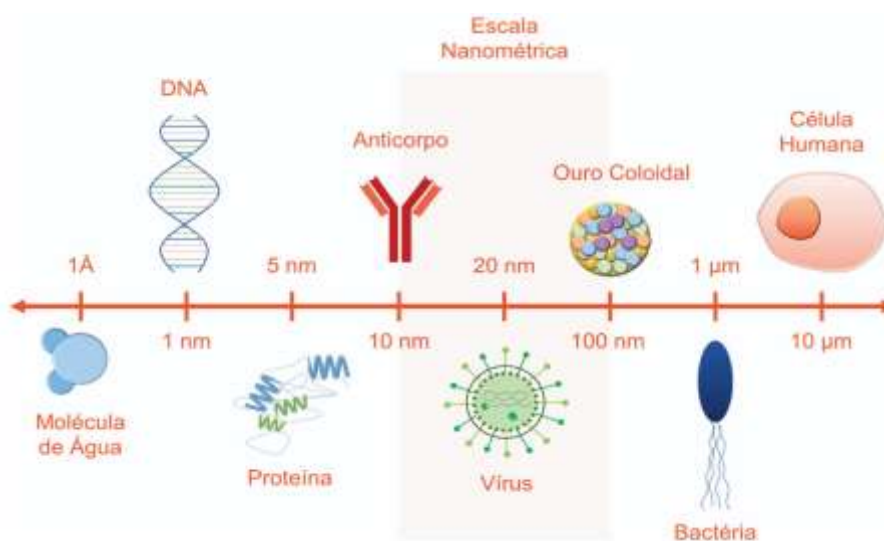


Figura 1: Comparação da nanoescala com diferentes dimensões, desde moléculas pequenas, como a da água, passando por macromoléculas biológicas, como proteínas e vírus, até a escala micrométrica das células. Fonte: Apolinário *et al.*, 2020.

A nanotecnologia, por meio de seus nanomateriais e nanoestruturas, surge como uma alternativa promissora para o desenvolvimento científico, possibilitando a criação de novos produtos com diversos benefícios para a sociedade (Caviglioni, 2020).

Na última década, a nanotecnologia e os nanomateriais vêm sendo amplamente aplicados na agricultura para favorecer o desenvolvimento das plantas, aumentar a produtividade, proteger contra pragas e patógenos e otimizar o armazenamento dos produtos agrícolas (Xu, 2022, p. 232).

A aplicação da nanotecnologia nos sistemas produtivos, especialmente em países em desenvolvimento, poderá beneficiar até cinco bilhões de pessoas nos próximos anos, segundo estimativas da ONU. Esses benefícios vão além do aspecto econômico, envolvendo melhorias na qualidade de vida, na produtividade agrícola, nos processos agroindustriais e no acesso a novos produtos (Embrapa, [s.d.]).

Ao transitar da macroescala para a nanoescala, a descrição e o controle do comportamento singular de diversas estruturas nanométricas constituem a base para compreender a melhor forma de aplicá-las nas nanotecnologias voltadas ao agronegócio. Nessa escala, os materiais apresentam propriedades diferenciadas, como respostas específicas à interação com luz, elevada reatividade química devido à alta relação superfície/volume e redução significativa do ponto de fusão, entre outras características (Caviglioni, 2020).

Dentre as diversas nanotecnologias desenvolvidas aplicadas na agricultura destaca-se o grafeno, um material que tem despertado grande interesse devido às suas propriedades físico-químicas únicas. Esse produto vem sendo usado em diversos setores da agricultura. (May *et al.*, 2021).

Sua descoberta, realizada por Andre Geim e Konstantin Novoselov em 2004, rendeu aos pesquisadores o Prêmio Nobel de Física em 2010, devido às propriedades singulares e ao potencial revolucionário desse material (Novoselov *et al.*, 2004; Soldano *et al.*, 2010).

Segundo Zarbin e Oliveira (2013), o grafeno é um alótropo do elemento carbono (C), pertencente à família dos nanomateriais. Sua estrutura básica é formada por uma única camada de átomos de carbono organizados em um padrão hexagonal, sendo essa mesma unidade estrutural a responsável por originar a composição do grafite.

O grafeno é um nanomaterial composto por átomos de carbono organizados

em uma estrutura bidimensional de rede hexagonal, semelhante a um favo de mel. Cada átomo de carbono está ligado a três vizinhos por ligações covalentes do tipo sp^2 , formando camadas atômicas (Segundo & Vilar, 2016, p. 55).

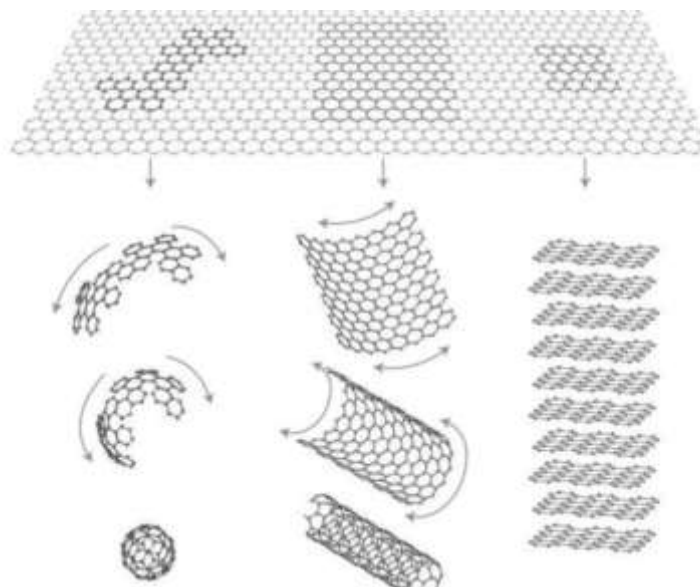


Figura 2: Representação do grafeno como estrutura fundamental dos materiais de carbono. Sua forma bidimensional (2D) pode ser transformada em diferentes estruturas: enrolada para formar nanotubos (1D), dobrada para originar fullerenos (0D) ou empilhada para compor o grafite (3D). Fonte: Segundo & Vilar, 2016.

A nomenclatura do grafeno varia conforme o número de camadas: monocamada: uma única camada atômica de carbono; bicamada: duas camadas empilhadas; poucas camadas: entre 3 e 10 camadas (Fapesp, 2024).

De forma geral, as estruturas do grafeno dependem fortemente dos métodos e condições de síntese utilizados (Zhang & Feng, 2010, p.359). Controlar as propriedades do grafeno por meio de modificações estruturais é essencial para a fabricação, os métodos de desenvolvimento e a produção em escala de alta qualidade são uns dos desafios (Cançado *et al.*, 2024).

A técnica de produção influencia diretamente as características do grafeno obtido, sendo que cada tipo apresenta propriedades específicas, mais ou menos adequadas a determinadas aplicações. Além disso, outros materiais bidimensionais também costumam ser incluídos no grupo dos chamados materiais relacionados ao grafeno (Fapesp, 2024).

A esfoliação mecânica foi a primeira técnica utilizada para isolar o grafeno, mas atualmente ele também pode ser produzido por métodos como deposição química na fase de vapor (CVD), esfoliação em fase líquida ou esfoliação

eletroquímica (Figura 3). O grafeno natural, obtido por esfoliação mecânica, possui diferentes propriedades do grafeno artificial, tal como o obtido por deposição química a vapor, principalmente relacionadas à ordem de empilhamento de suas camadas (Fapesp, 2024; Freitas, 2021).

Para o grafeno de camada única com alta qualidade o método mais promissor é o de deposição química em fase de vapor (Lee, 2016). Já para a produção em massa e de forma mais sustentável do grafeno de poucas camadas Sahoo & Mallik (2015) recomendam a intercalação e esfoliação de folhas de grafite pirolítico em um eletrólito prático simples, H_2SO_4 como método eficiente.

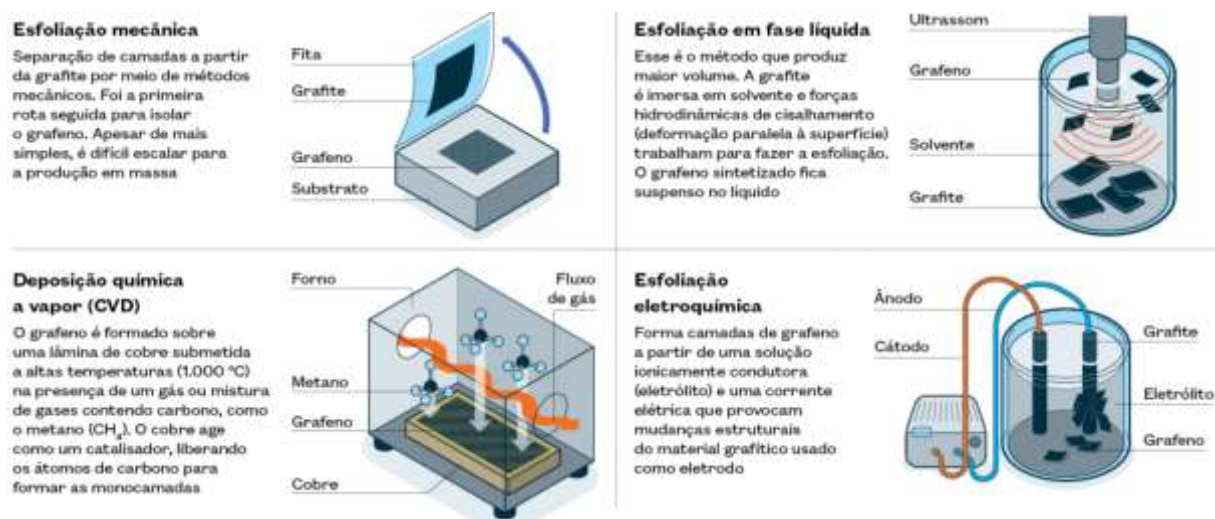


Figura 3: Diferentes modos de produção do grafeno. Fonte: Fapesp, 2024.

Também, Zhang & Feng (2010) reforçam a ideia de que as estruturas de grafeno são altamente dependentes dos métodos e condições de síntese. Os mesmos relatam como a técnica de deposição em plasma gerado por laser de pulso ultracurto influenciou na espessura, largura e comprimento das folhas de grafeno.

As dimensões desses nanomateriais são importantes para determinar como será a interação com a planta, uma vez que nanomateriais com menos de 50 nm podem passar por parede celular, para tecidos vasculares, proporcionando uma nova via de entrega de biomoléculas, nutrientes e defensivos na planta (Chen *et al.*, 2022).

Desde sua descoberta, diversos materiais baseados em grafeno (MBGs), como o grafeno puro, o óxido de grafeno (OG), o óxido de grafeno reduzido (OGr) e formas quimicamente modificadas, têm sido amplamente desenvolvidos e estudados para aplicações em diferentes áreas do conhecimento e da agricultura (May *et al.*, 2024).

Os materiais baseados em grafeno têm encontrado aplicações promissoras na agricultura e em diversos setores da indústria de alta tecnologia e alimentícia. Dentre eles, o óxido de grafeno (OG) destaca-se como um dos mais utilizados no setor agrícola, principalmente devido à sua escalabilidade e menor custo de produção do que o grafeno puro (Kabiri *et al.*, 2017).

Os nanomateriais de grafeno têm sido empregados de múltiplas formas, atuando como estimuladores do crescimento vegetal e fertilizantes (Zaytseva; Neumann, 2016), em sistemas de nanoencapsulamento e liberação controlada de compostos ativos (Andelkovic *et al.*, 2018; Kabiri *et al.*, 2017), como agentes antifúngicos e antibacterianos (Wang *et al.*, 2014), na quantificação de pesticidas (Hou *et al.*, 2013).

As possíveis aplicações dos nanomateriais baseados em grafeno na remediação ambiental também merecem destaque, visto que esses nanomateriais têm demonstrado elevada capacidade de adsorção e remoção de contaminantes presentes no solo e na água. Nos últimos anos, diversas revisões abordaram esse potencial, destacando os avanços e perspectivas no uso destes nanomateriais para descontaminação ambiental (Yap *et al.*, 2021; Thomas; Ramaswamy, 2016; Baig *et al.*, 2019).

Uma pesquisa realizada por Cao *et al.*, 2024 com *Artemisia annua* feito in vitro mostrou que usando concentrações de 10 mg L⁻¹, a altura das plantas dobraram em relação ao controle. Com doses de 20 mg L⁻¹ a altura triplicou. A massa verde e seca dos brotos aumentaram ligeiramente a 10 mg L⁻¹, e houve um aumento significativo a 20 mg L⁻¹. Reforçando a ideia de que há um intervalo ideal de concentração com efeito bioestimulante.

Na cultura da Fava (*Vicia faba* L.) a germinação, comprimento de raiz aumentaram de forma significativa com a dose de 800 miligramas de óxido de grafeno por por litro (mgOG L⁻¹) quando comparado com o controle. A comparação dos efeitos de diferentes concentrações de OG mostrou um aumento significativo (vs. 100, 200 e 1600 mgOG L⁻¹) e diminuição (vs. 800 mgOG L⁻¹) na taxa de germinação com 400 mgGO L⁻¹ (Anjum *et al.*, 2014).

Ao avaliar os índices de crescimento da raiz, 50 mg L⁻¹ de grafeno aumentaram notavelmente o comprimento total da raiz, o volume da raiz e o número de pontas e forquilhas das raízes das mudas de milho, em comparação com o grupo de controle

(Chen *et al.*, 2021)

Os efeitos do grafeno na germinação e no crescimento de sementes de arroz foram estudados. Após tratamento com diferentes concentrações de grafeno por 16 dias, foram observados efeitos promotores no número de raízes adventícias, no peso fresco das raízes e no peso fresco da parte aérea na concentração de 5 mg L⁻¹ (Liu *et al.*, 2015).

Um estudo realizado por Ren *et al.*, 2016 investigou o impacto de grafeno sulfonado no crescimento de mudas de milho e uma faixa de concentração de 0-500 g L⁻¹. O resultados indicaram que o grafeno sulfonado induziu um efeito hormese na altura de das plantas tratadas com 50 mg L⁻¹.

No entanto, a eficácia e segurança desse uso dependem diretamente da concentração aplicada, uma vez que a absorção pelos tecidos vegetais pode variar e, em concentrações elevadas, provocar efeitos fitotóxicos. Por outro lado, doses mais baixas de grafeno têm se mostrado benéficas, favorecendo o desenvolvimento de determinadas espécies vegetais.

É importante destacar que os limites entre doses benéficas e tóxicas podem variar entre diferentes espécies e culturas. Dessa forma, ainda há desafios a serem superados para viabilizar a aplicação de nanopartículas à base de grafeno em condições de campo. Pesquisas futuras devem direcionar-se principalmente para o estabelecimento de doses seguras e eficientes em diferentes contextos produtivos (May *et al.*, 2021).

Zhang *et al.* (2015) observaram que baixas concentrações de grafeno favoreceram a germinação e o crescimento de plântulas de tomate, enquanto doses mais altas comprometeram o desenvolvimento inicial.

Estudos relatam que, dentre as doses utilizadas no seu respectivos experimentos, as doses mais baixas os nanomaterias de grafeno podem estimular o crescimento vegetal. No entanto, quando aplicados em doses mais elevadas (≥ 50 mg L⁻¹), os mesmos materiais podem inibir o desenvolvimento das plantas (Anjum *et al.*, 2014).

Estudos demonstraram que 100 mg/L de grafeno inibiram o crescimento e desenvolvimento de *Vicia faba* (Liu *et al. apud* CHEN *et al.*, 2022). Begum *et al. (apud* CHEN *et al.*, 2022) relataram que concentrações de 1000 mg/L de grafeno causaram grande acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS) nas raízes de tomate,

espinafre vermelho e repolho, resultando na inibição do crescimento dessas plantas. Além disso, Liu *et al.* (*apud* CHEN *et al.*, 2022) observaram que 100 mg/L de grafeno reprimiram o desenvolvimento das raízes do arroz e reduziram a biomassa das plantas.

Estudos demonstraram que doses baixas a moderadas de grafeno tendem a promover respostas fisiológicas positivas nas plantas, enquanto concentrações elevadas podem gerar efeitos fitotóxicos. Contudo, é importante destacar que os limites entre doses benéficas e tóxicas podem variar entre diferentes espécies e cultura

Esses efeitos adversos geralmente estão relacionados à indução de fitotoxicidade, a qual pode se manifestar na forma de necrose, resultante do estresse oxidativo (Begum *et al.*, 2011). Os nanomateriais baseados em grafeno, em concentrações elevadas, podem comprometer o equilíbrio redox das células vegetais, interferindo na fotossíntese e limitando o crescimento (Du *et al.*, 2016). Além disso, devido ao seu potencial citotóxico, há evidências de que esses materiais podem afetar negativamente a viabilidade de rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (RPCPs).

Gurunathan (2015) demonstrou esse efeito em cinco isolados bacterianos da rizosfera de uma área agrícola, observando que a viabilidade celular foi reduzida de forma dependente da concentração de óxido de grafeno e do tempo de exposição. Isso sugere que os MBGs podem impactar negativamente as comunidades microbianas do solo. De forma complementar, Mejías Carpio *et al.* (2012) relataram que o contato entre óxido de grafeno e células microbianas pode levar à destruição de sua estrutura e, conseqüentemente, à morte celular.

Outro fator relevante a ser considerado é o ambiente em que os nanomateriais baseados em grafeno serão aplicados. Propriedades como dispersibilidade, estabilidade e toxicidade desses nanomateriais podem variar significativamente conforme o meio. Estudos indicam que compósitos de MBGs apresentam menor dispersibilidade e toxicidade no meio líquido, quando comparados ao grafeno puro (Carpio *et al.*, 2012).

Além disso, certos MBGs, como o óxido de grafeno, apresentam elevada estabilidade ambiental, dificultando sua degradação natural em ecossistemas (Kurapati *et al.*, 2015). Em contrapartida, Chen *et al.* (2017) observaram que a

toxicidade do grafeno puro é inferior à do óxido de grafeno, e que sua influência sobre os microrganismos é mais acentuada no solo do que em ambientes aquáticos, possivelmente devido à sua baixa solubilidade em água, o que limita sua biodisponibilidade nesse meio.

Fertilizantes nanoestruturados avançados, com alta eficiência de transporte e liberação lenta e controlada, são atualmente considerados o padrão ideal para impulsionar a agricultura, e o grafeno, devido às suas propriedades atrativas, destaca-se como um material promissor nesse contexto (Bhattacharya, *et al.*, 2023).

O emprego de nanomaterias com grafeno no desenvolvimento de fertilizantes de liberação controlada tem se mostrado uma estratégia promissora para reduzir tais perdas e aumentar a eficiência na disponibilização de nutrientes às plantas (Andelkovic *et al.*, 2018; Kabiri *et al.*, 2017).

Os fertilizantes convencionais e os sistemas tradicionais de liberação de insumos agrícolas apresentam limitações, como a liberação acelerada dos princípios ativos, baixa eficiência de absorção, rápida degradação e limitada estabilidade, fatores que frequentemente exigem aplicações repetidas ou excessivas, contribuindo para problemas ambientais (Bhattacharya, *et al.*, 2023). Diante disso é fundamental aprofundar o conhecimento sobre o efeito deste nanomaterial em culturas de alto valor como o algodão.

O algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) é uma cultura de grande importância econômica no Brasil e no mundo, sendo matéria-prima essencial para a indústria têxtil e fonte relevante de óleo e farelo. Na safra 2024/2025, o Brasil cultivou aproximadamente 2,1 milhões de hectares de algodão, representando um crescimento de 6,9% em relação à safra anterior. A produção de pluma é estimada em 3,9 milhões de toneladas, um aumento de 5,1% comparado ao ciclo anterior (Conab, 2024).

Segundo dados da Associação Brasileira dos Produtores de Algodão (Abrapa, 2024), a cadeia produtiva do algodão movimentou anualmente cerca de 40 bilhões de reais. No estado de Goiás a produção em pluma representa 61.675 t e 64.831 t nas safras de 23/24 e 24/25, respectivamente, gerando milhares de empregos diretos e indiretos, desde o campo até a indústria têxtil. Esse desempenho econômico está atrelado à adoção de tecnologias avançadas, manejo eficiente e sementes de alto vigor.

O principal produto do algodão é a pluma, formada por fibras longas usadas principalmente na indústria têxtil. Além dela, há as fibras curtas (línter), empregadas na produção de algodão hidrófilo, estofados, filtros e outros produtos. O processamento do algodão também gera resíduos aproveitáveis. Outro subproduto importante é o caroço, fonte de óleo e proteínas, utilizado na alimentação humana e animal ou na produção de biodiesel (Moura; Landau; Silva, 2020).

As principais variedades de algodão cultivadas comercialmente no Brasil pertencem ao tipo herbáceo (*Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* Hutch) e ao tipo arbóreo (*Gossypium hirsutum* L. r. *marie galante*). As plantações de algodão arbóreo estavam concentradas, principalmente, na Região Nordeste, mas representam uma pequena parcela da área cultivada. Atualmente, mais de 98% da produção nacional é proveniente da variedade herbácea (LANDAU et al., 2015).

De acordo com Bono; de Albuquerque & Spekken (2006) na cotonicultura, os fertilizantes assumem um papel de destaque entre os fatores de produção e insumos, por causa das respostas positivas da cultura, especialmente quando o algodão é implantado em solos com problemas nutricionais.

Nesse contexto, a produtividade do algodoeiro pode ser reduzida em solos com pobreza química e acidez e a produção envolve uma grande quantia de insumos e fertilizantes (Sales *et ali.*, 2024). O grafeno pode ser promissor ao aumentar a eficiência dos fertilizantes e reduzir a quantidade do seu uso (Bhattacharya, *et al.*, 2023).

A germinação e o vigor inicial das plântulas são etapas críticas para o sucesso do estabelecimento da lavoura, impactando diretamente o estande final e, conseqüentemente, a produtividade. Testes como a avaliação do número de plântulas normais, o comprimento radicular e a massa seca são comumente utilizados para inferir o potencial fisiológico das sementes (Carvalho; Nakagawa, 2012). O tipo de substrato utilizado pode interferir nos resultados obtidos, influenciando a disponibilidade de água e nutrientes, aeração e interação com tratamentos aplicados às sementes (Brasil, 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado em março de 2025 no Laboratório de Análises de Sementes e em casa de vegetação do setor da Fruticultura do Instituto Federal Goiano - Campus Ceres, em Ceres, GO. A cidade de Ceres possui altitude de 571 m. O clima, conforme classificação de Köppen é o Aw (clima de savana ou clima tropical de estações úmida e seca – Tropical Sazonal, de inverno seco), com médias anuais de 25 C e 1.300 mm de precipitação.

Foi realizado o teste de emergência e germinação das sementes de algodão da empresa BASF da linha FiberMax, com tecnologia GLTP (GlyTol® LibertyLink® Twinlink Plus®), sob diferentes concentrações do grafeno. O grafeno fornecido pela empresa Amazonas Grafeno é obtido pelo método de esfoliação mecânica, se encontra em estado pastoso, no qual o grafeno está hidratado em água, o material possui as especificações de poucas camadas com diâmetros de 1 a 10 µm e espessuras médias de 2 a 3 nm. A definição das doses de grafeno utilizadas no presente experimento (0; 5; 10; 15; 20 e 25 mL) foi baseada em estudos prévios de Zhang *et al.* (2015) e Cao *et al.* (2024).

O experimento em laboratório para testar a germinação (TPG) foi disposto em DIC com 6 tratamentos (0, 5, 10, 15, 20 e 25 mL por 200 sementes) e 4 repetições. O teste de emergência em areia foi disposto em DBC e com 6 tratamentos e dosagens de grafeno (0, 5, 10, 15, 20 e 25 mL por 200 sementes) e 4 repetições. Foram utilizadas 200 sementes por tratamento, para os dois experimentos.

Antes da realização dos dois experimentos foi feito o grau de umidade das sementes de algodão. Foi utilizado o método de estufa a 105° C de acordo com as com Brasil, 2009. Para o teste foram utilizadas 100 sementes e separadas em 4 recipientes com tampa contendo 25 sementes cada. Foi feita a pesagem e posteriormente as amostras foram inseridas na estufa e retiradas após 24 horas.

Para os dois experimentos o tratamento das sementes com doses de grafeno foram da seguinte forma: A embalagem com grafeno foi agitada, para minimizar a quantidade de matéria suspensa. Para a aplicação do tratamento com grafeno as 200 sementes de algodão foram acondicionadas em sacos plásticos transparentes. As sementes foram posicionadas na base do saco plástico, distribuídas uniformemente no canto inferior, de modo a minimizar o contato do grafeno com as paredes internas do recipiente durante o processo de mistura.

A aplicação do grafeno foi realizada manualmente, garantindo a homogeneização do tratamento sobre a superfície das sementes. Para isso, foi utilizado saco plástico contendo grafeno e sementes. Esse processo foi conduzido com movimentos contínuos e suaves, assegurando a adesão homogênea do material às sementes.

Após a completa mistura e recobrimento, as sementes tratadas foram mantidas nos sacos e dispostas de forma que a calda de grafeno secasse de forma natural. No dia seguinte, o material tratado e seco foi submetido aos experimentos (Figura 1).



Figura 4: Sementes pós tratamento e submetidas a secagem natural. Tratamento com 20 mL (T4); Tratamento com 15 mL (T3); Tratamento com 10 mL (T2); Tratamento com 5 mL (T1).
Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

O TPG foi realizado em folhas de papel germitest umedecidas com água e volume de 2,5 vezes o peso do papel. Cada repetição é composta de 50 sementes em rolo de papel, colocadas em sacos plásticos em Demanda Bioquímica de Oxigênio (B.O.D), a 25 °C. A primeira leitura é feita aos 4 e a última aos 12 dias (Brasil, 2009). As variáveis analisadas neste experimento foram: número de plântulas normais, comprimento de raízes, massa seca das plântulas normais.

O experimento de teste de emergencia foi realizado no canteiro com areia, em casa de vegetação. Foi usado uma bandeja de isopor para mudas com 128 células e objeto perfurante para formar as covas. O espaçamento entre covas ficou de 32 mm x 32 mm. Cada cova recebeu uma única semente tratada (Figura 2).



Figura 5: Covas para semeadura de sementes de algodão.
Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

As variáveis analisadas para o experimento em canteiro com areia foram: números de plantas emergidas, comprimento de raízes e massa seca total. Após 13 dias após semeadura (DAS) foram coletadas as plântulas do canteiro.

A contagem das plântulas normais e emergidas em areia foi feita de forma manual, e o comprimento de raiz mensurado com auxílio de uma régua. Para se calcular a massa seca, estas foram pesadas previamente em balança com precisão 0,0001g, e foram submetidas à estufa de convecção mecânica (ar forçado) e aquecida eletricamente, por 72 h e 60°C (Brasil, 2009).

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% de significância. Também foram aplicadas análises de regressão quadrática e correlação de Pearson entre as variáveis. As análises foram realizadas utilizando o software R. Nas análises de regressão a relação modelada consistiu em manter as doses de grafeno como variável independente e as variáveis: número de plantas, comprimento de raiz, massa seca como variáveis dependentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O grau de umidade obtido nas sementes de algodão foi de 8,48%. “O grau de umidade de uma amostra de sementes afeta suas propriedades físico-químicas e elétricas” (Brasil, 2009, p. 321). Baseado neste princípio, é importante determinar o grau de umidade para que se possa ter um experimento com qualidade e reduzir a possibilidade de limitações ou erros.

Segundo Carvalho e Nakagawa (2012), o grau de umidade das sementes de algodão deve ser mantido entre 8% e 10% para evitar a proliferação de fungos e a deterioração das sementes. Teores de umidade mais elevados promovem o crescimento de microrganismos, enquanto níveis de umidade muito baixos podem provocar desidratação, comprometendo a germinação. A umidade excessiva também pode aumentar a respiração celular das sementes, acelerando o processo de envelhecimento.

Além disso, estudos demonstram que o teor de umidade influencia diretamente o vigor e a germinação das sementes. Por exemplo, Queiroga *et al.* (2009) observaram que sementes de algodão armazenadas com teor de umidade de 10% apresentaram maior poder germinativo (71%) em comparação às sementes com 8% de umidade (60%).

Os resultados demonstram que houve diferença significativa entre os tratamentos para a germinação, comprimento de raiz e massa seca de sementes de algodão para os testes em B.O.D (Tabela 1).

Tabela 1. ANOVA para Germinação, comprimento de raiz e de massa seca de sementes de algodão sob doses de grafeno.

F.V.	Germinação (%)		Comprimento de Raiz		Massa Seca	
	QM	p-value	QM	p-value	QM	p-value
Dosagem	515,94	0,001**	1,6281	0,0064**	1,7923	0,0001**
Erro	26,96		0,3470		0,1759	
CV (%)	16,25		9,95		8,38	

F.V. = fonte de variação; QM = quadrado médio; ^{ns}Não significativo; *Significativo a 5%; **Significativo a 1%; CV = Coeficiente de variação. Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

O modelo de regressão demonstrou que a germinação aumentou conforme o aumento das doses, até um ponto máximo de 12,83 mL. A partir dessa dose, conforme se ia aumentando as doses a germinação reduzia, o que indica que altas doses

diminui o potencial germinativo. O modelo apresenta bom ajuste ($R^2 = 66\%$), com comportamento parabólico, indicando crescimento até uma dose ótima, seguido de redução (Figura 3).

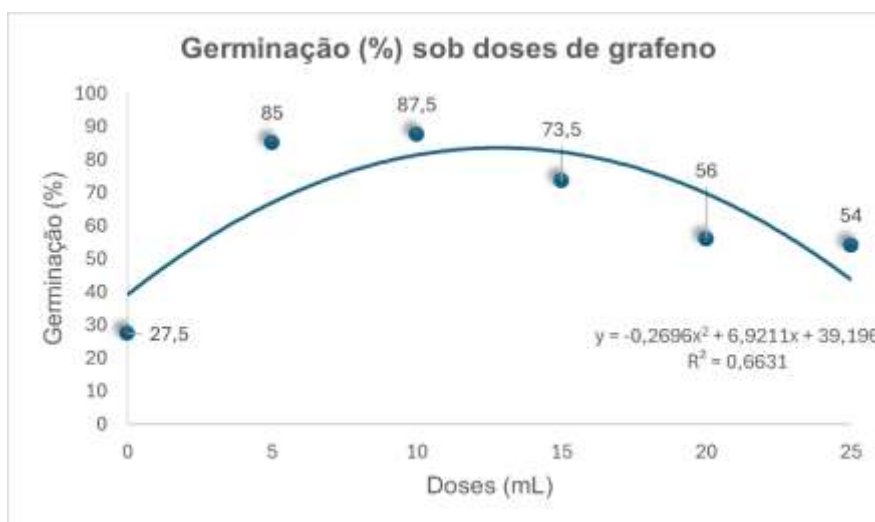


Figura 6: Germinação (%) de sementes de algodão sob doses de grafeno.
Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Esses resultados demonstram que o uso de grafeno em doses moderadas favorece a germinação, enquanto doses elevadas reduzem esse efeito. E que a ausência de grafeno resulta numa limitação germinativa.

Tais comportamentos são semelhantes aos encontrados por Zhang *et al.* (2015), que observaram que o grafeno penetra a epiderme das sementes de tomate, facilitando a absorção de água e promovendo germinação mais rápida em doses baixas, porém em doses elevadas podem induzir estresse oxidativo, o que compromete a emergência.

No trabalho de Samadi *et al.* (2021), foi confirmado que baixas concentrações de grafeno têm a capacidade de ativar proteínas de extensão da parede celular e canais de água, consequentemente facilitando a hidratação e a ativação metabólica da semente. O ambiente úmido e de contato direto do papel germitest favorece essa atuação, o que pode explicar a eficácia da aplicação nesse sistema.

Entretanto, as doses mais altas podem ter ultrapassado o limiar fisiológico da planta, conforme apontado por Begum *et al.* (2011) e Anjum *et al.* (2014), gerando espécies reativas de oxigênio e prejudicando a germinação.

A diferentes concentrações de grafeno afetou significativamente o comprimento das raízes em teste na B.O.D (Figura 3).

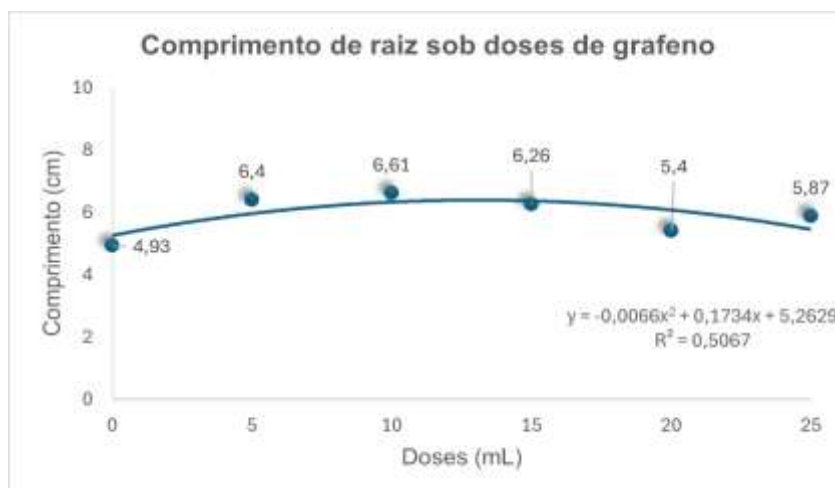


Figura 7: Comprimento de raiz do teste de TPG sob doses de grafeno.
Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

O comprimento de raiz apresentou comportamento quadrático em resposta às doses de grafeno, com aumento progressivo até 13,13 mL. Após esse resultado nota-se que o desenvolvimento radicular é reduzido. A equação demonstra aumento no comprimento com as doses, até certo ponto, mas com menor ajuste ($R^2 = 50,67\%$), o que indica que o grafeno pode atuar como bioestimulante do crescimento radicular.

Resultados semelhantes foram encontrados por Prylutska *et al.* (2022), os quais afirmam que os nanomateriais de carbono, como o grafeno, são capazes de promover divisão celular, alongamento das raízes e o crescimento geral da planta, ainda mais em ambientes controlados como in vitro ou papel germitest. De acordo com seu trabalho, as plantas de tomate tratadas com grafeno tiveram um comprimento de raiz significativamente maior que em plantas controle.

Além disso, Liu *et al.* (2015) verificaram que o grafeno estimula o desenvolvimento radicular em arroz, sendo que a penetração nas células meristemáticas pode favorecer o alongamento radicular, porém com concentrações demasiadas houve inibição do crescimento.

Ainda, WANG, S. *et al* (2023) afirma a capacidade que o grafeno tem em induzir genes da planta que estão relacionados à formação de raízes laterais e pelos radiculares.

Para a massa seca de plântulas de algodão, conforme a figura 4, pode-se observar uma resposta não linear em relação à dose de grafeno, com crescimento até um determinado ponto e logo seguido de uma redução. O ponto de máxima ocorreu na dose 13,93 mL, indicando que doses próximas a esse resultado promovem um

maior acúmulo de biomassa das plântulas. A partir dessa dose, o efeito estimulante do grafeno parece diminuir.

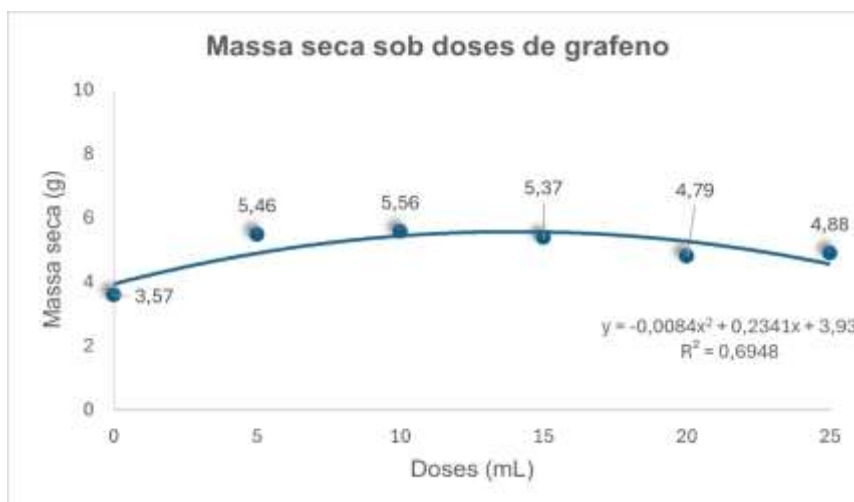


Figura 8: Massa seca de plântulas normais do TPG sob doses de grafeno.
Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

O grafeno favorece a estrutura física e a retenção de nutrientes do ambiente de cultivo, fatores que, mesmo no papel germitest, podem ser simulados pela capacidade de absorção e troca iônica das partículas de grafeno. Isso é reforçado pelos achados de Zhou *et al.* (2023), que observaram aumento na biomassa seca de *Iris pseudacorus* exposta a óxido de grafeno, atribuído à intensificação da fotossíntese e da absorção de micronutrientes.

Por outro lado, em concentrações elevadas, o grafeno pode induzir a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), levando a estresse oxidativo e possível queda na eficiência metabólica das plantas, como apontado por Samadi *et al.* (2021) e também observado no presente experimento, onde as maiores doses apresentaram diminuição na massa seca.

De acordo com a tabela 2 foi possível observar que existe uma correlação muito forte e positiva entre TPG e massa seca, e ao comparar o comprimento de raiz com o TPG ou com a massa seca existe também uma correlação forte e positiva.

A presença do grafeno pode ter potencializado essas correlações, promovendo tanto a emergência quanto o desenvolvimento radicular, conforme já observado por Prylutska *et al.* (2022) e Samadi *et al.* (2021), que destacam o papel dos nanomateriais em estimular mecanismos fisiológicos associados ao crescimento vegetal.

Tabela 2: Matriz de correlação de Pearson para as variáveis TPG, comprimento de raiz (CR), massa seca (MS) do teste em papel germitest.

	TPG	CR	MS
TPG	1,0	-	-
CR	0.748370441 5129896	1,0	-
MS	0.906721137 9961424	0.70663218 2893097	1,0

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Para as análises realizadas em canteiro com areia e em casa de vegetação não houve resultados significativos para as variáveis emergência, comprimento de raiz e massa seca em sementes de algodão (Tabela 3).

Tabela 3. ANOVA da emergência, comprimento de raiz e de massa seca de sementes de algodão em areia sob doses de grafeno.

F.V.	Emergência (%)		Comprimento de Raiz		Massa Seca	
	QM	p-value	QM	p-value	QM	p-value
Dosagem	33.36	0,4194 ^{ns}	1.54	0.1842 ^{ns}	0.48	0.1734 ^{ns}
Blocos	135,83	0.022*	0.98	0.3987 ^{ns}	1.71	0.0051**
Erro	31,43		0.88		0.26	
CV (%)	15,40		13,57		17,58	

F.V. = fonte de variação; QM = quadrado médio; ^{ns}Não significativo; *Significativo a 5%; **Significativo a 1%. CV = Coeficiente de variação. Fonte: Arquivo Pessoal, 2025.

A média da emergência de plântulas em canteiro com areia foi de 72,83 %, o comprimento de raiz teve uma média de 6,93 cm e a média da massa seca das plântulas foi de 2,94 centímetros (Tabela 4).

Tabela 4: Emergência, Comprimento de raiz e massa seca de plântulas de algodão em areia com dosagens de grafeno.

Tratamentos (mL)	E (%)	CR (cm)	MS (g)
0	65,5 a	5,87 a	2,61 a
5	81,50 a	6,89 a	3,25 a
10	73,50 a	7,42 a	2,54 a
15	69,00 a	7,04 a	2,79 a
20	70,50 a	7,64 a	3,05 a
25	77,00 a	6,69 a	3,39 a
Média	72,83	6,93	2,94

*Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. NP= número de plantas emergidas. CR= comprimento de raízes. MS= massa seca. Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

A viabilidade fisiológica das sementes, possuem a emergência de plântulas como um indicador primordial. De acordo com Marcos-filho (2015) o processo germinativo possui uma certa sensibilidade às características do substrato e condições do ambiente, tornando este processo diretamente influenciado pela interação entre umidade, oxigênio e temperatura.

Neste estudo, constatou-se que houve variação significativa na germinação quando o teste foi feito em papel germitest, mas no teste em areia as diferenças foram nulas. De acordo com Schuab *et al.* (2006) os testes em areia apresentam menor sensibilidade na distinção entre o vigor da semente e a capacidade que este ambiente tem de expressar o potencial fisiológico da planta.

Também, Cossa *et al.* (2023), ao incorporar a vermiculita em testes de germinação para sementes de algodão tratadas e não tratadas defendem a necessidade de ter substratos que providenciam condições específicas em que os testes poderão expressar o real potencial fisiológico das sementes de algodão sem interferência negativa do substrato.

Segundo Gomes *et al.* (2016), experimentos em campo, como este feito em areia, em que, em condições naturais de ambiente (solo, água, temperatura), os tratamentos estão suscetíveis a serem adsorvidos pelas partículas de solo ou lixiviados, o que não ocorreu com os testes realizados no papel germitest.

No presente estudo, o comprimento das raízes foi positivamente influenciado por alguns tratamentos no teste de TPGL, mas essa resposta não foi observada no substrato com areia. O crescimento radicular inicial é um reflexo da adaptação da plântula ao substrato e um importante indicador da qualidade fisiológica (Nakagawa, 1999).

Resultados semelhantes foram observados por Reis *et al.* (2023) ao avaliarem diferentes doses de grafeno no enraizamento de estacas de amoreira. Embora esperassem respostas diferenciadas no crescimento radicular, os autores também não verificaram diferenças estatísticas entre os tratamentos.

Estudos feitos por Barbosa *et al.* (2018) com objetivo de caracterizar fisicamente diferentes substratos, indicaram a limitação da areia como substrato para produção de mudas devido à sua granulometria grossa e baixa capacidade de retenção de água, permite que a água percole rapidamente através do substrato. Esse rápido escoamento pode transportar partículas ou compostos solúveis, como o grafeno, para camadas mais profundas ou mesmo para fora do sistema radicular das plantas, o que pode ter acontecido no presente trabalho.

Isso sugere que a influência do grafeno pode depender fortemente do substrato e de sua concentração. A baixa variabilidade entre os tratamentos no substrato areia pode ter resultado em médias similares e, conseqüentemente, ausência de diferenças significativas.

A variável massa seca de plântulas também não demonstrou diferenças significativas entre os tratamentos. A massa seca acumulada representa o resultado do metabolismo fotossintético e do crescimento durante os estágios iniciais de desenvolvimento. Conforme Taiz *et al.* (2017), variações na massa seca podem ser atribuídas à eficiência da plântula em captar água, absorver nutrientes e manter atividade fisiológica eficiente.

No experimento em papel, observou-se que o grafeno proporcionou incremento significativo em massa seca em algumas doses, sugerindo efeito bioestimulante, conforme também relatado por Anjum *et al.* (2013), que destacam o potencial do grafeno em promover crescimento vegetal ao facilitar transporte de água e estimular genes relacionados ao desenvolvimento. No entanto, esse efeito não se repetiu no substrato areia, possivelmente devido à menor interação entre o grafeno e as sementes, dado que a distribuição em substrato granular tende a ser menos uniforme

do que em papel.

Embora o experimento com grafeno em areia não tenha apresentado diferenças estatísticas entre os tratamentos, estudos recentes sugerem que o substrato não necessariamente impede a ação do nanomaterial, desde que sua aplicação seja adequada.

Wang *et al.* (2023) demonstraram que o grafeno, mesmo aplicado em solo do tipo albic, considerado compacto e de baixa fertilidade, foi capaz de melhorar a estrutura física do solo, aumentar os teores de nitrogênio, fósforo e potássio disponíveis, além de estimular a atividade de enzimas do solo e promover acúmulo significativo de biomassa em plântulas de milho. Segundo o autor o estudo indicou que a forma do grafeno tem influência direta sobre os resultados, sendo que o grafeno de poucas camadas a 50 g kg⁻¹ apresentou melhor desempenho em comparação ao de camada única.

Outros autores como Chen *et al.* (2021), destaca a capacidade do grafeno de transportar íons e água; Ren *et al.* (2016), que identificaram efeitos benéficos do grafeno sulfonado na morfologia radicular do milho; e Liu *et al.* (2015), que apontam para a toxicidade em concentrações elevadas.

Dessa forma, ainda que a areia seja um substrato de baixa capacidade de retenção e maior heterogeneidade, a falta de desempenho observado pode estar relacionado à forma de aplicação, tipo de grafeno ou à ausência de interações químicas mais complexas que ocorrem em solos mais argilosos. Os trabalhos de Wang *et al.* (2023) reforçam o potencial do grafeno como agente bioestimulante, mas evidenciam a necessidade de ajuste no substrato, forma do material e dose aplicada para que seus benefícios sejam plenamente expressos.

5 CONCLUSÕES

Dosagens entre 10 e 15 mL demonstraram maiores resultados para TPG, massa seca e comprimento de raízes em papel germitest.

Na emergência de plântulas em canteiro com areia não houve diferença estatística entre os tratamentos para as variáveis emergência, comprimento de raiz e massa seca.

O grafeno apresenta potencial como bioestimulante na germinação de sementes de algodão, mas sua eficiência está condicionada à dosagem, forma de aplicação e tipo de substrato utilizado.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE ALGODÃO (Abrapa). *Relatório de safra: setembro de 2024*. Brasília, DF: Abrapa, 2024. Disponível em: <https://abrapa.com.br/wp-content/uploads/2024/09/Relatorio-de-Safra-%E2%80%93-setembro-de-2024.pdf>. Acesso em: 11 maio 2025.

Andelkovic, Ivan B. *et al.* Graphene oxide-Fe (III) composite containing phosphate—A novel slow-release fertilizer for improved agriculture management. *Journal of cleaner production*, v. 185, p. 97-104, 2018.

Anjum, N. A. *et al.* Single-bilayer graphene oxide sheet impacts and underlying potential mechanism assessment in germinating faba bean (*Vicia faba* L.). *Science of the Total Environment*, v. 472, p. 834–841, 2014.

Apolinário, Alexsandra Conceição *et al.* Abrindo a caixa de pandora dos nanomedicamentos: há realmente muito mais ‘espaço lá embaixo’. *Química nova*, v. 43, n. 2, p. 212-225, 2020.

Baig, Nadeem *et al.* Graphene-based adsorbents for the removal of toxic organic pollutants: a review. *Journal of Environmental Management*, v. 244, p. 370-382, 2019.

Barbosa, José Renato Leite *et al.* Caracterização de atributos físicos de substratos para fins de produção de mudas. *Revista Cultivando o saber*, v. 11, n. 1, p. 12-23, 2018.

Begum, P.; Ikhtiari, R.; Fugetsu, B. Graphene phytotoxicity in the seedling stage of cabbage, tomato, red spinach, and lettuce. *Carbon*, v. 49, n. 12, p. 3907–3919, 2011.

Bhattacharya, N., Cahill, D. M., Yang, W., & Kochar, M. (2023). Graphene as a nano-delivery vehicle in agriculture—current knowledge and future prospects. *Critical Reviews in Biotechnology*, 43(6), 851-869.

Bono, J. A. M., de Albuquerque Setti, J. C., & Spekken, S. S. P. (2006). O nitrogênio protegido como alternativa de fertilizante para o uso no plantio da cultura do algodão. *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, 10(1), 39-45.

Brasil. *Regras para análise de sementes* (RAS). Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009.

Cançado, Luiz G. *et al.* Science and metrology of defects in graphene using Raman spectroscopy. *Carbon*, v. 220, p. 118801, 2024.

Cao, J. *et al.* Graphene enhances artemisinin production in the traditional medicinal plant *Artemisia annua* via dynamic physiological processes and miRNA regulation. *Plant Communications*, v. 5, p. 100742, 2024.

Carvalho, N. M.; Nakagawa, J. *Sementes: ciência, tecnologia e produção*. 5. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2012. 590 p.

Carpio, Isis E. Mejías *et al.* Toxicity of a polymer–graphene oxide composite against bacterial planktonic cells, biofilms, and mammalian cells. *Nanoscale*, v. 4, n. 15, p. 4746-4756, 2012.

Caviglioni, M. *et al.* *Técnicas nanotecnológicas para a agricultura e pecuária-um enfoque em controle de pragas e doenças, nutrição e saúde animal.* 2020.

Chen, Ming; Qin, Xiaosheng; Zeng, Guangming. Biodegradation of carbon nanotubes, graphene, and their derivatives. *Trends in biotechnology*, v. 35, n. 9, p. 836-846, 2017.

Chen, Zhiwen *et al.* Opportunities for graphene, single-walled and multi-walled carbon nanotube applications in agriculture: A review. *Crop Design*, v. 1, n. 1, p. 100006, 2022.

Chen, Z. W. *et al.* Influence of graphene on the multiple metabolic pathways of Zea mays roots based on transcriptome analysis. *PLoS One* 16, e0244856 (2021).

Cossa, Nasma Henriqueta Da Sorte *et al.* An alternative approach to conducting germination tests on chemically treated and untreated stored cotton seeds. *Journal of Seed Science*, v. 45, p. e202345027, 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). Produção de grãos é estimada em 330,3 milhões de toneladas na safra 2024/25. Brasília, DF, 10 abr. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-graos-e-estimada-em-330-3-milhoes-de-toneladas-na-safra-2024-25>. Acesso em: 11 maio 2025.

Du, Shaoting *et al.* Reduced graphene oxide induces cytotoxicity and inhibits photosynthetic performance of the green alga *Scenedesmus obliquus*. *Chemosphere*, v. 164, p. 499-507, 2016.

Embrapa. *Nanotecnologia: perguntas e respostas*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-nanotecnologia/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 10 jun. 2025. [s.d.]

Fapesp. *Grafeno e suas camadas*. Revista Pesquisa FAPESP, edição 345, nov. 2024. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2024/11/Pesquisa_345-3.pdf. Acesso em: 11 maio 2025.

Freitas, Filipe Pinheiro Rodrigues de. *Estudo de grafeno monocamada, bicamada e poucas camadas mecanicamente esfoliado como absorvedor saturável em um laser a fibra dopada com érbio em acoplamento de modos passivo.* 2021.

Gomes, Juliano Pereira *et al.* Substratos e temperaturas para teste de germinação em sementes de Myrtaceae. *Ciência Florestal*, v. 26, n. 1, p. 285-293, 2016.

Gurunathan, Sangiliyandi. Cytotoxicity of graphene oxide nanoparticles on plant growth promoting rhizobacteria. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 32, p. 282-291, 2015.

Hou, Mengying *et al.* The use of silica-coated magnetic graphene microspheres as the

adsorbent for the extraction of pyrethroid pesticides from orange and lettuce samples followed by GC–MS analysis. *Journal of Separation Science*, v. 36, n. 19, p. 3242-3248, 2013.

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.

Kurapati, Rajendra *et al.* Dispersibility-dependent biodegradation of graphene oxide by myeloperoxidase. *Small*, v. 11, n. 32, p. 3985-3994, 2015.

Landau, Elena Charlotte *et al.* *Variação geográfica da produção de grãos e principais culturas agrícolas do Brasil em 2013*. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. 143 p. (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, 182). ISSN 1518-4277.

Lee, H. Cheun *et al.* Synthesis of single-layer graphene: A review of recent development. *Procedia Chemistry*, v. 19, p. 916-921, 2016.

Liu, S. J. *et al.* Effects of graphene on germination and seedling morphology in rice. *J. Nano. Nanotechnol.* 15, 2695–2701 (2015).

Liu, Shaobin *et al.* Antibacterial activity of graphite, graphite oxide, graphene oxide, and reduced graphene oxide: membrane and oxidative stress. *ACS nano*, v. 5, n. 9, p. 6971-6980, 2011.

Liu, Z., Chen, Z., Zhao, J., Gu, L., Qiao, J., Wang, H., ... & Yang, X. (2020). Effects of graphene on the growth and development of *Vicia faba* L. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 41(05), 33-39.

Marcos-Filho, J. *Fisiologia de sementes de plantas cultivadas*. 2. ed. Londrina: ABRATES, 2015.

May, André *et al.* *Materiais baseados em grafeno para uso na agricultura*. 2024.

May, André *et al.* Graphene: A new technology for agriculture. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 2, p. e56610212827-e56610212827, 2021.

Moura, L., Landau, E. C., & da Silva, G. A. (2020). *Evolução da produção de algodão herbáceo (Gossypium hirsutum, Malvaceae)*.

Nakagawa, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In: krzyzanowski, F. C. *et al.* (org.). *Vigor de sementes: conceitos e testes*. Londrina: ABRATES, 1999. p. 2–24.

Novoselov, Kostya S. *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, v. 306, n. 5696, p. 666-669, 2004.

Prylutska, S. V. *et al.* Cellular biological and molecular genetic effects of carbon nanomaterials in plants. *Cytology and Genetics*, v. 56, n. 4, p. 351–360, 2022.

Queiroga, vicente de paula *et al.* Qualidade de sementes de algodão armazenadas em função de diferentes cultivares e teores de água. *Revista Caatinga*, v. 22, n. 4, p. 136-144, 2009.

Ramos, Verônica Vidal Fernandes Fornari; Engelmann, Wilson. Nanomateriais e a sustentabilidade ambiental sob a perspectiva da lei 12.305/2010. *Novas tecnologias e*

o princípio da centralidade da pessoa humana, p. 379. 2023.

Reis, K. R. S. dos *et al.* Diferentes doses de grafeno no enraizamento de estacas de amoreira. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, v. 16, n. 8, p. 11803–11809, 2023.

Ren, W. J., Chang, H. W. & Teng, Y. *Sulfonated graphene-induced hormesis is mediated through oxidative stress in the roots of maize seedlings*. *Sci. Total Environ.* 572, 926–934 (2016).

Sahoo, Sumanta Kumar; Mallik, Archana. Simple, fast and cost-effective electrochemical synthesis of few layer graphene nanosheets. *Nano*, v. 10, n. 02, p. 1550019, 2015.

Sales, L. R., Frezarin, E. T., Gonçalves, L. B., Gonilha, D. B., Santos, C. H. B., & Rigobelo, E. C. (2024). Promoção do desenvolvimento vegetal e produtividade do algodão por bactérias do gênero *Azospirillum*. *Cadernos de Agroecologia*, 19(1).

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

Schuab, S.R.P.; Braccini, A.L.; França-Neto, J.B.; Scapim, C.A.; MeschedeDE, D.K. Potencial fisiológico de sementes de soja e sua relação com a emergência das plântulas em campo. *Acta Scientiarum: Agronomy*, v.28, n.4, p.553-561, 2006.

Segundo, J. E. D. V.; Vilar, Eudésio Oliveira. Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos. *Revista eletrônica de materiais e processos*, v. 11, n. 2, p. 54-57, 2016.

Soldano, Caterina; Mahmood, Ather; DujardinN, Erik. Production, properties and potential of graphene. *Carbon*, v. 48, n. 8, p. 2127-2150, 2010.

Taiz, L. *et al.* *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

Thomas, Vishal J.; Ramaswamy, Shivaraman. Application of graphene and graphene compounds for environmental remediation. *Science of Advanced Materials*, v. 8, n. 3, p. 477-500, 2016.

Wang, X. *et al.* Evaluation and mechanism of antifungal effects of carbon nanomaterials in controlling plant fungal pathogen. *Carbon*, 68, 798-806, 2014.

Wang, S. *et al.* Effects of concentration-dependent graphene on maize seedling development and soil nutrients. *Scientific Reports*, v. 13, 2650, 2023.

Yap, Pei Lay *et al.* Graphene-based sorbents for multipollutants removal in water: a review of recent progress. *Advanced Functional Materials*, v. 31, n. 9, p. 2007356, 2021.

Xu, Zhi Ping. Material nanotechnology is sustaining modern agriculture. *ACS Agricultural Science & Technology*, v. 2, n. 2, p. 232-239, 2022.

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

Zaytseva, Olga; Neumann, Günter. Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, v. 3, p. 1-26, 2016.

Zhang, Hongxin; Feng, Peter X. Fabrication and characterization of few-layer graphene. *Carbon*, v. 48, n. 2, p. 359-364, 2010.

Zhang, Ming *et al.* Effects of graphene on seed germination and seedling growth. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 17, p. 1-8, 2015.

Zhou, W. *et al.* Effects of graphene oxide on the growth and photosynthesis of the emergent plant *Iris pseudacorus*. *Plants*, v. 12, 375, 2023.