

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Nanocompostos de carbono e fertilizantes NPKS na nutrição do milho

Geraldo Delboni Scárdua
Magister Scientiae

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026

GERALDO DELBONI SCÁRDUA

Nanocompostos de carbono e fertilizantes NPKS na nutrição do milho

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Edson Marcio Mattiello

Coorientador: Juscimar da Silva

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S285n
2026

Scárdua, Geraldo Delboni, 2000-
Nanocompostos de carbono e fertilizantes NPKS na
nutrição do milho / Geraldo Delboni Scárdua. – Viçosa, MG,
2026.

1 dissertação eletrônica (73 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Edson Marcio Mattiello.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2026.

Referências bibliográficas: f. 48-62.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.405>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Adubos e fertilizantes - Efeito dos compostos orgânicos.
2. Milho - Adubos e fertilizantes. I. Mattiello, Edson Marcio,
1978-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de
Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 631.813

GERALDO DELBONI SCÁRDUA

Nanocompostos de carbono e fertilizantes NPKS na nutrição do milho

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 23 de fevereiro de 2026.

Assentimento:

Geraldo Delboni Scárdua
Autor

Edson Marcio Mattiello
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 03/07/2026 às 08:31:58 e pelo orientador em 07/07/2026 às 16:34:54. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **U2QN.1Z9R.4ETB** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, sou grato a Deus pelas bênçãos que me concede e por todas as oportunidades que já me foram proporcionadas.

Agradeço aos meus pais, David Fernando Scárdua e Luciene Delboni Scárdua, pelo apoio incondicional na busca pelos meus objetivos.

Ao meu irmão, Marcos Delboni Scárdua.

Aos meus avós, Geraldo Scárdua, Amália Plantikow Scárdua (*in memoriam*), Nilo Delboni (*in memoriam*), Maria Ramos Delboni (*in memoriam*) e a toda a minha família.

À minha esposa Vanessa Miranda dos Santos Rocha por todo o apoio.

Ao Bernardo Amorim da Silva, Fabiane Carvalho Ballotin, Gustavo Soares de Freitas, Hiago Rodrigues, Ademir da Silva Leite, Bruno Capobiango Fonseca, Edson Faria da Silva, Juan Xavier Valarezo Maldonado, Diego Fernando Arcos Calvache, Artur Simão Lemos e Jardel de Moura Fialho, pela amizade e auxílio nos trabalhos realizados.

Aos amigos do Laboratório de Fertilizantes e do Departamento de Solos pela força e todo apoio.

Ao Professor Edson Marcio Mattiello pela orientação, amizade e auxílio nos trabalhos realizados.

Ao Pesquisador Juscimar da Silva pela coorientação, amizade e auxílio nos trabalhos realizados.

Aos membros da banca de avaliação Gustavo Franco de Castro, Felipe Vaz Andrade, Rafael Da Silva Teixeira, Isadora Rodrigues Medina Santana pela disponibilidade em contribuir.

E a todos que de alguma maneira puderam contribuir direta ou indiretamente durante minha trajetória para realização desse sonho e construção do meu futuro.

Obrigado!

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

"Em tudo dai graças, porque esta é a vontade de Deus em Cristo Jesus para
convosco"

1 Tessalonicenses 5:18

RESUMO

SCÁRDUA, Geraldo Delboni, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2026. **Nanocompostos de carbono e fertilizantes NPKS na nutrição do milho.** Orientador: Edson Marcio Mattiello. Coorientador: Juscimar da Silva.

A crescente demanda por otimização do uso de recursos naturais, impulsionada por fatores ambientais e pelo aumento dos custos de produção, tem direcionado investimentos para tecnologias que visam ao aprimoramento da eficiência dos fertilizantes utilizados na agricultura. Neste contexto, o uso de nanomateriais e de biofertilizantes, com ação de indução fisiológica, surge como uma estratégia promissora para a melhoria da eficiência nutricional e redução de perdas de nutrientes, possibilitando ganhos em produtividade e sustentabilidade. O presente estudo teve como objetivo avaliar o emprego do nanocomposto de carbono (Nano_C2) na formulação granulada de fertilizantes minerais, visando ao desenvolvimento de um fertilizante multinutrientes (NPKS) e sua interação com a aplicação foliar do biofertilizante Arbolina® na cultura do milho. Para tal, fertilizantes nas formulações NPK 12-30-20 e NPKS 11-28-17+5,6S foram produzidos utilizando-se matérias-primas convencionais (DAP e KCl com e sem a adição de H_2SO_4 e S^0) acrescidas de 1,0 % (m/m) do Nano_C2. A pesquisa envolveu a caracterização físico-química dos fertilizantes, incluindo a determinação da higroscopicidade, potencial hidrogeniônico (pH) e dissolução em coluna de substrato inerte. A eficiência agrônômica foi avaliada em experimento de campo com um híbrido de milho para silagem (BM 3063 Pro3) em sistema de plantio direto, conduzido na Universidade Federal de Viçosa (UFV). O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados (DBC), com cinco repetições, em esquema de parcelas subdivididas. As parcelas corresponderam às diferentes formulações de fertilizantes (NPK_nano = 12-30-20; NPKS_nano = 11-28-17+5,6S; NPK_com = 08-28-16; e controle sem adubação de plantio), enquanto as subparcelas foram constituídas pela presença ou ausência da aplicação foliar da Arbolina®. Foram analisadas as variáveis fisiológicas: Soil Plant Analysis Development (SPAD), Rendimento quântico efetivo do PSII (II), Rendimento quântico de dissipação não regulada de energia não fotoquímica do PSII (NO) e Rendimento quântico da dissipação regulada de energia não fotoquímica do PSII (NPQ), além da análise foliar dos teores de macro e micronutrientes. Aspectos fitotécnicos (altura de plantas e altura de inserção de espigas), produtividade de matéria verde, produtividade de matéria seca e exportação de nutrientes foram quantificadas ao final do

ciclo do milho. Os dados foram submetidos às análises de normalidade e homogeneidade de variâncias como premissas da análise de variância (ANOVA) e os tratamentos foram comparados pelo teste de Tukey a 5% de significância. As formulações à base de DAP e KCl, com ou sem adição de H_2SO_4 e S^0 , podem ser produzidas de forma concentrada e estável por longo período ao incorporar 1,0% (m/m) de Nano_C2 na matriz mineral do fertilizante. A presença do Nano_C2 não altera a cinética de liberação dos nutrientes, nem causa efeitos negativos sobre o crescimento, o estado nutricional, a tolerância a estresses abióticos ou a produtividade das plantas de milho. Nas condições avaliadas, a aplicação foliar da Arbolina® não proporcionou incrementos significativos nas variáveis fisiológicas, nutricionais ou produtivas das plantas que receberam adequada fertilização.

Palavras-chave: *Zea mays*; multispeQ; mistura granulada; fertilizante multinutrientes; eficiência nutricional.

ABSTRACT

SCÁRDUA, Geraldo Delboni, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2026. **Carbon nanocomposites and NPKS fertilizers in corn nutrition.** Adviser: Edson Marcio Mattiello. Co-adviser: Juscimar da Silva.

The growing demand for optimizing the use of natural resources, driven by environmental factors and rising production costs, has directed investments toward technologies aimed at improving the efficiency of fertilizers used in agriculture. In this context, the use of nanomaterials and biofertilizers with physiological induction action emerges as a promising strategy to enhance nutritional efficiency and reduce nutrient losses, enabling gains in productivity and sustainability. The present study aimed to evaluate the use of the carbon nanocomposite (Nano_C2) in the granular formulation of mineral fertilizers, targeting the development of a multi-nutrient fertilizer (NPKS) and its interaction with the foliar application of the biofertilizer Arbolina® in maize cultivation. To this end, fertilizers with formulations NPK 12-30-20 and NPKS 11-28-17+5.6S were produced using conventional raw materials (DAP and KCl with and without the addition of H_2SO_4 and S^0), supplemented with 1.0% (w/w) Nano_C2. The research involved the physicochemical characterization of the fertilizers, including the determination of hygroscopicity, hydrogen potential (pH), and dissolution in an inert substrate column. Agronomic efficiency was evaluated in a field experiment using a maize hybrid for silage (BM 3063 Pro3) under a no-tillage system, conducted at the Federal University of Viçosa (UFV). The experiment followed a randomized complete block design (RCBD) with five replications in a split-plot arrangement. The main plots corresponded to different fertilizer formulations (NPK_nano = 12-30-20; NPKS_nano = 11-28-17+5.6S; NPK_conv = 08-28-16; and an unfertilized control), while the subplots consisted of the presence or absence of foliar application of Arbolina®. The following physiological variables were analyzed: Soil Plant Analysis Development (SPAD), effective quantum yield of PSII (II), quantum yield of non-regulated non-photochemical energy dissipation of PSII (NO), and quantum yield of regulated non-photochemical energy dissipation of PSII (NPQ), in addition to leaf analysis of macro- and micronutrient contents. Agronomic traits (plant height and ear insertion height), green biomass yield, dry matter yield, and nutrient export were quantified at the end of the maize cycle. Data were subjected to tests of normality and homogeneity of variances as assumptions for analysis of variance (ANOVA), and treatments were compared using Tukey's test at the 5% significance level. Formulations based on DAP and KCl, with or without the addition of H_2SO_4 and S^0 , can be

produced in concentrated and stable forms over a long period when incorporating 1.0% (w/w) Nano_C2 into the mineral fertilizer matrix. The presence of Nano_C2 does not alter nutrient release kinetics nor cause negative effects on growth, nutritional status, tolerance to abiotic stress, or productivity of maize plants. Under the evaluated conditions, foliar application of Arbolina® did not provide significant increases in physiological, nutritional, or productive variables in plants receiving adequate fertilization.

Keywords: *Zea mays*; multispeQ; granular blend; multi-nutrient fertilizer; nutrient use efficiency

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Descrição do sistema de avaliação da dissolução de fertilizantes em colunas de areia.	27
Figura 2. Imagem dos grânulos de NPK_nano (A) e NPKS_nano (B) sem neoformação de cristais após 30 dias em condições de bancada.....	33
Figura 3. Variação da massa dos fertilizantes NPK_nano (A) e NPKS_nano (B) durante o período de avaliação.	34
Figura 4. Gráfico representativo da liberação acumulada de S-SO ₄ ²⁻ (A), de P (B) e de K (C) dos fertilizantes com nanomaterial de carbono em função das lixiviações.	35
Figura 5. Placa compactadora usada na produção de misturas granuladas NPK.....	63
Figura 6. Sistema de avaliação da dissolução de fertilizantes em colunas de substrato inerte.	63
Figura 7. Área já dessecada e início da demarcação das linhas de plantio.....	64
Figura 8. Abertura dos sulcos e distribuição dos fertilizantes.	64
Figura 9. Sistema de irrigação por aspersão.	65
Figura 10. Tratamento controle em comparação ao NPKS_nano.....	65
Figura 11. Milho em pré-pendoamento e início das avaliações com o MultispeQ.....	66
Figura 12. Altura de plantas em final de ciclo.....	66
Figura 13. Colheita das três linhas centrais a 30 cm de altura.....	67
Figura 14. Rendimento quântico efetivo do PSII - Φ II, em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).	68
Figura 15. Rendimento quântico de dissipação não regulada de energia não fotoquímica do PSII, ou dissipação na forma de fluorescência – Φ NO, em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).	69
Figura 16. Rendimento quântico da dissipação regulada de energia não fotoquímica do PSII, ou dissipação na forma de calor - Φ NPQ, em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK	

comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®). 70

Figura 17. Soil Plant Analysis Development - SPAD, em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®). 71

Figura 18. Altura de plantas (A) e altura de inserção de espiga (B) das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®). 72

Figura 19. Produtividade de matéria verde (A) e produtividade de matéria seca (B) das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®). 73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Proporção de matérias-primas das formulações NPK_nano e NPKS_nano considerando o uso do aditivo Nano_C2.	26
Tabela 2. Rendimento quântico efetivo do PSII (Φ II), em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).	36
Tabela 3. Rendimento quântico de dissipação não regulada de energia não fotoquímica do PSII, ou dissipação na forma de fluorescência (Φ NO), em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).	37
Tabela 4. Rendimento quântico da dissipação regulada de energia não fotoquímica do PSII, ou dissipação na forma de calor (Φ NPQ), em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).	37
Tabela 5. Soil Plant Analysis Development - SPAD, em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).	38
Tabela 6. Teores de N, P, K, Ca, Mg e S na folha índice coletada no estágio R1 do milho, quando não houve aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano) com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).	40
Tabela 7. Altura de inserção de espiga (IE), altura de plantas (AP), produtividade de matéria verde (Prod MV) e produtividade de matéria seca (Prod MS) das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-	

28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).....41

Tabela 8. Exportação de nutrientes pelas plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).
.....43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Bioestimulantes vegetais.....	18
2.2 Nanopartículas e nanomateriais em plantas	19
2.3 Carbon dots	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1 Produção dos Fertilizantes com nanomaterial de carbono	25
3.2 Avaliação Físico-química.....	26
3.2.1 Higroscopicidade	26
3.2.2 Potencial hidrogeniônico (pH).....	26
3.2.3 Avaliação da cinética de liberação de nutrientes dos fertilizantes em coluna de substrato inerte.....	26
3.3 Avaliação agronômica.....	28
3.3.1 Instalação do experimento	28
3.3.2 Avaliações fisiológicas da planta de milho	30
3.3.3 Análise nutricional foliar da planta de milho	31
3.3.4 Análise dos componentes de produção da planta de milho	31
3.4 Análises estatísticas.....	32
4. RESULTADOS.....	32
4.1 Produção dos fertilizantes e potencial hidrogeniônico (pH)	32
4.2 Higroscopicidade.....	33
4.3 Cinética de liberação de nutrientes dos fertilizantes	34
4.4 Avaliação Agronômica.....	36
4.4.1 Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (PSII) - Φ_{II}	36
4.4.2 Rendimento Quântico de Dissipação Não Regulada de Energia Não Fotoquímica do Fotossistema II (PSII) - Φ_{NO}	37
4.4.3 Rendimento Quântico da Dissipação Regulada de Energia Não Fotoquímica do Fotossistema II (PSII) - Φ_{NPQ}	37
4.4.4 Soil Plant Analysis Development - SPAD	38
4.4.5 Análise foliar	39
4.4.6 Altura de inserção de espiga, altura e produtividade de plantas de milho.....	41
4.4.7 Exportação de nutrientes	41

5. DISCUSSÃO	44
6. CONCLUSÃO	47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
7. ANEXOS	63

1. INTRODUÇÃO

O agronegócio é um dos setores que mais contribuem para o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, com destacada participação na geração de renda e empregos. Não obstante, há uma crescente demanda por otimização da utilização dos recursos disponíveis para a agricultura. Tal cenário é impulsionado por pressões ambientais e pelo aumento constante dos custos de produção. Nesse contexto, a compreensão das demandas nutricionais das culturas e da eficiência no uso de fertilizantes assume papel fundamental. Sobretudo, considerando a elevada dependência do Brasil por matérias-primas importadas ($\approx 85-90\%$), situação preocupante do ponto de vista estratégico (BRASIL, 2022). Portanto, há a necessidade de se desenvolver tecnologias de fertilizantes que visem melhorias das características físico-químicas dos produtos e maior eficiência de uso de nutrientes pelas plantas. Tecnologias promissoras para redução de perdas e aumento de eficiência nutricional têm sido avaliadas como fertilizantes de eficiência melhorada (BORSARI, 2013) e fertilizantes especiais (LEMOS, 2017).

Do ponto de vista da nutrição mineral, é amplamente reconhecido que as plantas absorvem nutrientes da solução do solo, um sistema aquoso complexo caracterizado por múltiplas espécies químicas em equilíbrio dinâmico. A aplicação de fertilizantes visa minimizar perdas por lixiviação, volatilização ou fixação, estabelecendo concentrações iônicas ótimas na solução do solo para suprir a demanda vegetal. Nesse sentido, a utilização de fertilizantes multinutrientes na forma de mistura granulada vem ganhando notoriedade ao proporcionar menor ou nenhuma segregação e, conseqüentemente, maior uniformidade na distribuição dos nutrientes aplicados (NOVAIS et al., 2007). Outro fator que motiva a adoção de fertilizantes multinutrientes é a intensificação dos sistemas produtivos, a expansão agrícola em solos deficientes e o uso predominante de fertilizantes contendo apenas nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) (NPK) concentrados, com baixo aporte de macronutrientes secundários e micronutrientes, o que tem intensificado o empobrecimento do solo e a ocorrência de deficiências nutricionais (CANTARELLA et al., 2022; NOVAIS et al., 2007b), especialmente de enxofre (S).

O S é essencial às plantas, uma vez que participa da síntese de aminoácidos e de enzimas fundamentais nos processos metabólicos e fotossintéticos (KERTESZ et al., 2007; HAVLIN et al., 2005). Ele é absorvido pelas raízes, preferencialmente por fluxo de massa, e seu transporte na planta é predominantemente acrópeto, ou seja, se movimenta da base para o

ápice. Logo, o seu fornecimento via solo constitui a forma mais eficiente de suprimento às plantas.

A recomendação de fertilização das áreas agrícolas, frequentemente baseada na expectativa de produtividade ou na reposição de nutrientes removidos pela colheita, tem contribuído significativamente para a manutenção ou aumento da fertilidade do solo, o que resulta em ganhos de produtividade nas lavouras (RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al., 2020). Nos últimos anos, várias tecnologias foram incorporadas à produção de milho nas propriedades rurais, destacando-se o uso de híbridos mais produtivos e adaptados às condições edafoclimáticas, bem como avanços no manejo fitotécnico e fitossanitário (REZENDE et al., 2016; BUSO et al., 2018). Neste contexto, é relevante ressaltar que o uso de produtos com ação sobre a fisiologia das plantas, como os biofertilizantes, além de nanomateriais pode trazer benefícios significativos para a nutrição de plantas. Esses materiais possibilitam o desenvolvimento de fertilizantes mais eficientes, reduzindo perdas, melhorando a disponibilidade de nutrientes e aumentando a produtividade das culturas (ABDEL-AZIZ et al., 2021; SALEEM et al., 2021).

Os nanomateriais, geralmente definidos como materiais com dimensão menor que 100 nm, apresentam propriedades diferenciadas em relação a partículas maiores de mesma composição química (INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDS, 2017). Diversos estudos têm demonstrado que, quando aplicados em pequenas quantidades, via solução nutritiva ou pulverização foliar, esses materiais podem atuar como indutores ou ativadores fisiológicos, com potencial de estimular o crescimento vegetal, aumentar a tolerância a estresses bióticos e abióticos e melhorar a qualidade do produto colhido (JUÁREZ-MALDONADO et al., 2019; CHOUDHARY et al., 2017; MASWADA et al., 2020; ZAHEDI; KARIMI; TEIXEIRA DA SILVA, 2020; ZHAO, LI. et al., 2020).

A aplicação de nanomateriais de carbono tem se mostrado altamente relevante na indústria de fertilizantes, ao conferir maior estabilidade às formulações e ampliar o prazo de armazenamento e uso (CUNHA, 2022). Este campo abrange um amplo espectro de estratégias de modificação estrutural de materiais, incluindo fertilizantes ou compostos de fertilizantes, visando à alteração deliberada de propriedades físico-químicas específicas, como solubilidade e reatividade, em função da manipulação dimensional ou da reorganização microestrutural (DIMKPA & BINDRABAN 2018; ELEMIKE et al., 2019). Segundo o Plano Nacional de Fertilizantes, os nanofertilizantes são insumos pertencentes as cadeias emergentes e integram as estratégias de inovação tecnológica voltadas à ampliação da produção nacional de fertilizantes e ao fortalecimento do agronegócio brasileiro (BRASIL, 2022).

O uso de nanomateriais de carbono é recente na agricultura, porém, trata-se de uma tecnologia promissora no que diz respeito ao possível aumento na produtividade das culturas (ZULFIQAR et al., 2019; ACHARI e KOWSHIK, 2018). Estudos como o de Li et al. (2020) destacam que, além da possível melhoria na eficiência de fertilizantes, os nanomateriais de carbono podem atuar como bioestimulantes proporcionando melhorias no crescimento e desenvolvimento de plantas. Entre os efeitos observados, incluem-se melhorias nos processos fotossintéticos, assimilação de nutrientes e na maior tolerância a estresses bióticos e abióticos (KAUFFMAN et al., 2007; DU JARDIN, 2015). Ademais, os nanocompostos de carbono constituem-se de ferramentas capazes de aprimorar a produção de fertilizantes formulados multinutrientes por proporcionar incremento na solubilidade, na estabilidade físico-química e na liberação de nutrientes (TSUJI 2001; BOEHM et al. 2003; GREEN e BEESTMAN 2007; TORNEY et al. 2007; CUNHA, 2022).

Dentre os nanomateriais de carbono, destacam-se os *Carbon dots*, partículas com diâmetro inferior a 10 nm, que tem recebido atenção devido à sua baixa toxicidade, fotoluminescência, alta solubilidade em água, biodegradabilidade e produção a partir de matérias-primas abundantes e de baixo custo (LI, Y. et al., 2020a; ZHENG, X. et al., 2015), os quais apresentam grande potencial de uso agrícola, com resultados preliminares indicando efeitos diretos na tolerância das plantas a estresses bióticos e abióticos, na capacidade de aquisição de nutrientes, na atividade fotossintética, entre outros processos, os quais podem resultar em maior crescimento e produtividade das culturas (LI, Hao et al., 2018, 2019; LI, Y. et al., 2020b; ZHENG, Y. et al., 2017a). Neste contexto de nanomateriais, a Arbolina® é um biofertilizante a base de *Carbon dots* desenvolvida por pesquisadores da Universidade de Brasília e da Embrapa Hortaliças, obtida a partir de matéria-prima renovável, que apresenta características bioestimulantes comprovadas em estudos preliminares em diversas culturas agrícolas. Entretanto, existe uma carência quanto à determinação da forma mais eficiente de aplicação, do momento e da dose mais adequada para as culturas.

Outra aplicação viável da nanotecnologia na agricultura foi demonstrada por Cunha (2022) a partir da produção de formulações NPK (11-28-23) concentradas e estáveis à base de fosfato diamônico (DAP) e cloreto de potássio (KCl) com a adição de 1,0% (m/m) do nanomaterial de carbono Nano_C2 à matriz mineral do fertilizante. Além disso, a autora constatou que a adição do nanomaterial de carbono não modificou o padrão de liberação de nutrientes a partir dos grânulos e que, em ensaios conduzidos sob condições controladas de casa de vegetação, não foram observados efeitos negativos sobre a absorção de nutrientes pelas

plantas nem sobre seu crescimento, apresentando desempenho agrônômico equivalente ao fertilizante comercial.

Dessa forma, a presente dissertação teve como objetivo avaliar o uso do nanocomposto de carbono Nano_C2 na formulação de fertilizantes minerais, visando ao desenvolvimento de um fertilizante multinutriente (NPKS) constituído por um único grânulo (mistura granulada). Adicionalmente, buscou-se avançar na compreensão dos efeitos do nanomaterial Nano_C2, bem como do bioestimulante Arbolina®, sobre o estado nutricional, a produtividade e variáveis fisiológicas do milho (*Zea mays*) em condições de campo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Bioestimulantes vegetais

O conceito de bioestimulantes vegetais passou por diversas reformulações ao longo do tempo. Inicialmente, Kauffman et al. (2007) descreveram os bioestimulantes como substâncias distintas dos fertilizantes tradicionais (não fertilizantes), capazes de promover o crescimento das plantas mesmo quando aplicadas em baixas concentrações. Posteriormente, Du Jardin, nos anos de 2012 e 2015, apresentou novas definições fundamentadas em ampla revisão bibliográfica e na análise dos marcos regulatórios dos Estados Unidos e da União Europeia. Em sua formulação mais recente, o autor definiu bioestimulantes vegetais como substâncias ou microrganismos aplicados às plantas com a finalidade de aumentar a eficiência nutricional, melhorar a tolerância a estresses abióticos e favorecer atributos qualitativos das culturas, independentemente do teor de nutrientes presentes no produto (DU JARDIN, 2015). Além disso, Du Jardin (2015) organizou os bioestimulantes em diferentes categorias, incluindo: ácidos húmicos e fúlvicos; hidrolisados proteicos e outros compostos nitrogenados; extratos botânicos e de algas; quitosana e demais biopolímeros; substâncias inorgânicas; fungos benéficos; e bactérias benéficas.

Mais recentemente, a União Europeia, por meio da regulamentação 2019/1009, estabeleceu que bioestimulantes vegetais correspondem a produtos fertilizantes cuja principal função é estimular os processos nutricionais das plantas, independentemente do teor de nutrientes contido no produto. O objetivo desses produtos é promover melhorias relacionadas à eficiência no uso de nutrientes, à tolerância a estresses abióticos, às características qualitativas das plantas e à disponibilidade de nutrientes presentes no solo ou na rizosfera (EUROPEAN UNION, 2019).

No contexto brasileiro, o termo “bioestimulante” ainda não possui definição específica na legislação. Produtos com características bioestimulantes, como aminoácidos, substâncias húmicas e extratos de algas, são regulamentados pela legislação de fertilizantes, conforme o Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, sendo classificados como biofertilizantes (BRASIL, 2004). Nesse decreto, biofertilizantes são descritos como produtos que contêm agentes orgânicos ou princípios ativos livres de substâncias agrotóxicas, capazes de atuar direta ou indiretamente sobre as plantas cultivadas, promovendo aumento de produtividade sem considerar seus efeitos hormonais ou estimulantes. Complementando essa regulamentação, a Instrução Normativa nº 61, de 8 de julho de 2020, divide os biofertilizantes em diferentes grupos: i) biofertilizantes à base de aminoácidos; ii) de substâncias húmicas; iii) de extratos ou algas processadas; iv) de extratos vegetais; v) compostos; e vi) outros biofertilizantes aprovados por instituições oficiais ou credenciadas de pesquisa no Brasil (BRASIL, 2020). Diferentemente da classificação proposta por Du Jardin (2015), a legislação brasileira exclui fungos e bactérias benéficas da categoria de biofertilizantes, enquadrando-os na classe dos inoculantes (BRASIL, 2004).

2.2 Nanopartículas e nanomateriais em plantas

Com o desenvolvimento da nanotecnologia aplicada ao setor agrícola, tem sido proposta uma nova categoria de bioestimulantes baseada em nanomateriais e nanopartículas (JUÁREZ-MALDONADO et al., 2019). De maneira geral, nanomateriais são definidos como estruturas que apresentam pelo menos uma dimensão entre 1 e 100 nm, possuindo propriedades físico-químicas distintas em relação aos materiais de mesma composição em escala macroscópica (INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDS, 2017). Quando todas as dimensões do material se encontram na nanoescala e não há diferença significativa entre seus eixos principais, esses materiais são classificados como nanopartículas (INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDS, 2017).

Entre os principais grupos de nanomateriais utilizados destacam-se os materiais à base de carbono, como fulerenos, nanotubos de carbono (CNTs), grafeno e Carbon Dots (CDs), além de nanopartículas metálicas, semimetálicas e não metálicas, incluindo prata, ouro, cobre, silício e óxidos de zinco e ferro. Também se incluem nessa categoria materiais orgânicos e poliméricos, como a quitosana (KHAN; SAEED; KHAN, 2019; MUKHERJEE et al., 2016). As reduzidas dimensões dessas estruturas conferem propriedades ópticas, elétricas e mecânicas diferenciadas, possibilitando aplicações em diversas áreas, como eletrônica, medicina,

farmacologia, geração de energia e agricultura (DUHAN et al., 2017; KHAN; SAEED; KHAN, 2019).

No contexto agrícola, a nanotecnologia vem sendo considerada uma ferramenta promissora para o desenvolvimento de tecnologias voltadas à proteção vegetal, mitigação de estresses abióticos, melhoramento genético e nutrição de plantas (CHHIPA, 2017; LV et al., 2020; SHARMA; DEWANJEE; KOLE, 2016; ZAHEDI; KARIMI; TEIXEIRA DA SILVA, 2020; ZHAO, L. et al., 2020).

A utilização de nanopartículas por meio do solo, tratamento de sementes ou pulverização foliar tem demonstrado respostas positivas no crescimento vegetal (ZHAO, L. et al., 2020). Em estudos com soja (*Glycine max*), por exemplo, diferentes concentrações de nanopartículas de ferro, cobre, cobalto e óxido de zinco aplicadas nas sementes favoreceram tanto a germinação quanto o desenvolvimento inicial das plantas (HOE et al., 2018). Da mesma forma, nanopartículas de prata utilizadas no condicionamento osmótico de sementes proporcionaram melhorias na germinação, emergência de plântulas e produtividade de melancia (*Citrullus lanatus*), com incrementos de até 35,6% em comparação ao tratamento controle (ACHARYA et al., 2020).

Em sorgo (*Sorghum bicolor*), a aplicação de nanopartículas de óxido de zinco no solo promoveu maior tolerância ao déficit hídrico, além de aumentar a absorção de nitrogênio e potássio, refletindo em ganhos de produtividade entre 22% e 183%, bem como na melhoria da qualidade dos grãos em condições de seca (DIMKPA et al., 2019). Resultados semelhantes foram observados em calêndula (*Tagetes erecta L.*), na qual nanopartículas de silício aplicadas simultaneamente via solo e folhas estimularam o florescimento, aumentando o número de flores, o diâmetro floral e as massas fresca e seca das plantas, além de prolongarem o período de floração (ATTIA; ELHAWAT, 2021).

Os nanomateriais de carbono também têm apresentado potencial bioestimulante em diferentes culturas agrícolas. Lahiani et al. (2013) verificaram que nanotubos de carbono aplicados em sementes favoreceram a germinação e o crescimento de soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*) e cevada (*Hordeum vulgare*), associando esses efeitos ao aumento da expressão de genes relacionados às aquaporinas presentes nas sementes. Em arroz (*Oryza sativa*), o tratamento de sementes com CNTs resultou em maior germinação e crescimento, além de melhorias fisiológicas, como aumento da condutância estomática, da concentração de clorofila e da eficiência fotossintética, culminando em incrementos produtivos de até 25% (JOSHI et al., 2020).

Outro nanomaterial de carbono amplamente estudado é o fullerol [$C_{60}(OH)_{20}$]. Em melão-de-são-caetano (*Momordica charantia*), sua aplicação em sementes promoveu aumento de 54% na biomassa vegetal, acompanhado de incrementos de 128% na produtividade e de até 91% na concentração de compostos medicinais (KOLE et al., 2013). Além disso, aplicações foliares de fullerol contribuíram para elevar a tolerância ao estresse hídrico em culturas como beterraba (*Beta vulgaris*) e colza (*Brassica napus*) (BORIŠEV et al., 2016; XIONG et al., 2018).

Apesar dos resultados promissores, é importante destacar que os efeitos dos nanomateriais dependem diretamente das concentrações utilizadas. Doses elevadas podem causar efeitos tóxicos tanto para as plantas quanto para os microrganismos presentes no solo, comprometendo o equilíbrio da microbiota e o desenvolvimento vegetal (KANWAR et al., 2019; RAFFI; HUSEN, 2019; VERMA et al., 2019).

2.3 Carbon dots

Os Carbon Dots (CDs), também conhecidos como Quantum Dots de Carbono, Nanodots de Carbono ou Quantum Dots de grafeno, representam uma importante classe de nanomateriais que vem despertando crescente interesse científico e tecnológico em diferentes áreas de aplicação (HONG et al., 2015). Esses materiais foram identificados pela primeira vez em 2004, quando Xiaoyou Xu et al. (2004), durante experimentos de eletroforese em gel com nanotubos de carbono (CNTs), isolaram uma impureza fluorescente denominada inicialmente “carbono fluorescente”. Posteriormente, esse material passou a ser sintetizado de forma independente, originando os atuais CDs.

Em geral, os CDs consistem em nanopartículas com diâmetro inferior a 10 nm, constituídas predominantemente por carbono, oxigênio e nitrogênio. A proporção desses elementos varia conforme os precursores e os métodos empregados na síntese (LI, Haitao et al., 2012). Entre suas principais características destacam-se a fluorescência, a elevada estabilidade química, a alta solubilidade em água, a biocompatibilidade e a capacidade de atuar tanto como aceptores quanto como doadores de elétrons (HONG et al., 2015; WANG, X. et al., 2009). Essas propriedades tornam os CDs promissores para aplicações em sensores, dispositivos fotovoltaicos, sistemas de liberação de fármacos e, mais recentemente, na agricultura (COSTAS-MORA et al., 2014; HUANG et al., 2014; WANG, Q. et al., 2013).

Os CDs podem ser produzidos a partir de diversas fontes de carbono, incluindo glicose, glicerol, ácido cítrico, grafite, fulerenos, grafeno e nanotubos de carbono (LIU, C. et al., 2011; LU et al., 2011; SCHNEIDER et al., 2017). Além disso, resíduos orgânicos e biomateriais, como esterco animal, restos de alimentos, mel, bagaço de malte, pólen e até cabelo humano,

também têm sido empregados como precursores na síntese dessas nanopartículas (D'ANGELIS DO E. S. BARBOSA et al., 2015; SAHU et al., 2012; WU et al., 2013). Os métodos de obtenção podem ser classificados em químicos ou físicos. Entre os métodos químicos destacam-se síntese hidrotermal, oxidação química, processos eletroquímicos e síntese assistida por micro-ondas, enquanto técnicas como ablação a laser e tratamento por plasma representam abordagens físicas de produção (CALABRO; YANG; KIM, 2018; HOU et al., 2015).

As diferenças nos precursores utilizados e nas metodologias de síntese influenciam diretamente propriedades como tamanho, grau de oxidação superficial e composição química dos CDs, o que afeta seu comportamento biológico e suas aplicações (LI, Haitao et al., 2012). Na agricultura, essas nanopartículas passaram a receber atenção principalmente a partir de 2015, quando Tripathi e Sarkar demonstraram, em plântulas de trigo (*Triticum spp.*), que os CDs poderiam atuar como estimulantes do crescimento vegetal. Desde então, diversos estudos passaram a investigar os mecanismos de absorção, transporte e ação fisiológica dessas nanopartículas em diferentes espécies vegetais.

Uma das vantagens dos CDs em estudos biológicos está relacionada à sua fluorescência natural, que facilita o rastreamento em tecidos vegetais vivos por técnicas como microscopia confocal, espectroscopia Raman e microscopia eletrônica. Estudos demonstraram que essas nanopartículas podem ser absorvidas tanto pelas raízes quanto pelas folhas das plantas. Tripathi e Sarkar (2015) observaram que CDs aplicados em raízes de trigo (*Triticum spp.*) foram rapidamente transportados até os vasos condutores, acumulando-se principalmente na epiderme e na região vascular. Resultados semelhantes foram relatados em feijão-mungo (*Vigna radiata*), nos quais os CDs foram transportados até as folhas por via apoplástica, acumulando-se nos vasos e espaços intercelulares (LI, W. et al., 2016; ZHANG, M. et al., 2018a).

Em sistemas hidropônicos, Zheng et al. (2017a) verificaram intensa fluorescência azul em raízes, caule e nervuras foliares de alface (*Lactuca sativa*) tratada com CDs, indicando que essas nanopartículas podem atravessar a parede celular e serem transportadas juntamente com a água por vias apoplásticas e simplásticas. Outros estudos utilizando células de cebola (*Allium cepa*) mostraram que CDs com cerca de 5 nm conseguem penetrar nas células e acumular-se no núcleo, sugerindo possíveis interações com processos cromossômicos e de regulação gênica (LI, Hao et al., 2018; WANG, H. et al., 2018).

Embora menos investigada, a absorção foliar de CDs também apresenta resultados relevantes. Hu et al. (2020) demonstraram que nanopartículas hidrofílicas menores e com carga

superficial positiva apresentaram maior eficiência de absorção foliar em algodão (*Gossypium hirsutum*) e milho (*Zea Mays*), acumulando-se em células-guarda, cloroplastos e espaços extracelulares. Os autores também observaram que a adição de surfactantes favoreceu a rápida penetração das nanopartículas pelos estômatos. Resultados semelhantes foram obtidos por Xiaokai Xu et al. (2020), que utilizaram cápsulas de álcool polivinílico (PVA) para prolongar a retenção foliar de CDs fluorescentes, verificando elevada permanência das nanopartículas nas células-guarda mesmo após lavagem das folhas.

Os efeitos fisiológicos dos CDs nas plantas estão relacionados, em grande parte, às propriedades químicas de sua superfície. A presença de grupos hidrofílicos, como $-OH$ e $-COOH$, favorece a interação com moléculas de água e íons minerais, facilitando sua absorção e transporte pelas plantas (LI, Y. et al., 2020a). Além disso, as cargas superficiais dessas nanopartículas permitem interação com proteínas de membrana e alterações no potencial elétrico transmembrana, podendo modificar processos celulares e metabólicos (JUÁREZ MALDONADO et al., 2019).

Essas interações refletem diretamente na germinação e no crescimento inicial das plantas. Estudos conduzidos com tomateiro (*Solanum lycopersicum*), arroz (*Oryza sativa*), feijão-mungo (*Vigna radiata*) e *Arabidopsis thaliana* demonstraram que sementes tratadas com CDs absorveram maior quantidade de água, acelerando o processo germinativo (LI, Hao et al., 2018, 2019; ZHANG, M. et al., 2018a). Esse efeito foi associado à regulação de genes relacionados às aquaporinas, proteínas responsáveis pelo transporte de água e pequenas moléculas através das membranas celulares (KOU et al., 2021).

Além disso, os CDs também podem influenciar a absorção e o transporte de nutrientes minerais. Em couve-da-Malásia (*Brassica chinensis* var. *parachinensis*), Zheng et al. (2017b) observaram aumento na absorção de potássio e redução no acúmulo de nitrato após aplicação hidropônica de CDs, resultando em incrementos significativos de biomassa. Em melão (*Cucumis melo*), Yang et al. (2019) relataram aumento expressivo no transporte de ferro nas plantas tratadas com CDs. Outros trabalhos indicam ainda que essas nanopartículas apresentam elevada capacidade de adsorção de íons metálicos, favorecendo sua disponibilidade e absorção pelas plantas (LI, Hao et al., 2019).

Os efeitos dos CDs também se estendem à fisiologia fotossintética. Estudos relatam aumentos na condutância estomática, na assimilação de carbono e na taxa transpiratória em culturas como alface, arroz e milho (TAN et al., 2021; ZHENG, Y. et al., 2017a). Esses efeitos frequentemente resultam em maior crescimento vegetal e acúmulo de biomassa. Adicionalmente, devido à sua capacidade de atuar como doadores e aceptores de elétrons, os

CDs podem interferir diretamente nos processos fotoquímicos da fotossíntese. Chandra et al. (2014) demonstraram que CDs funcionalizados podem se associar aos cloroplastos e participar da transferência de elétrons durante as reações luminosas. Em consequência, foram observados aumentos na atividade dos fotossistemas I e II e maior eficiência no transporte de elétrons em diferentes espécies vegetais (LI, W. et al., 2018; WANG, H. et al., 2018).

Outro efeito frequentemente associado aos CDs é o aumento da atividade da enzima RuBisCO, fundamental para a fixação biológica de carbono no ciclo de Calvin. Em arroz (*Oryza sativa*) cultivado hidroponicamente, Hao Li et al. (2018) verificaram aumento significativo da atividade dessa enzima e maior acúmulo de carboidratos nas folhas após aplicação de CDs. Resultados semelhantes foram relatados em outras espécies vegetais e microalgas, indicando maior eficiência fotossintética e metabólica (LI, Hao et al., 2019; ZHANG, M. et al., 2018b).

A fluorescência dos CDs também pode favorecer a fotossíntese por meio da conversão de radiação ultravioleta em comprimentos de onda úteis para as plantas, especialmente luz azul e vermelha. Sai et al. (2018), por exemplo, observaram aumento da taxa fotossintética em folhas de tabaco (*Nicotiana tabacum*) tratadas com CDs emissores de luz azul sob radiação UV. Da mesma forma, Li et al. (2020) relataram maior transporte de elétrons e incremento de biomassa em folhas de alface tratadas com CDs emissores de luz vermelho-distante. Em arroz (*Oryza sativa*), a aplicação foliar dessas nanopartículas aumentou a eficiência fotossintética, o conteúdo de clorofila, a atividade da RuBisCO e o crescimento das plantas (LI, Y. et al., 2021).

Como consequência dessas alterações fisiológicas, diversos trabalhos relatam ganhos em produtividade e qualidade agrícola decorrentes da aplicação de CDs. Em alface (*Lactuca sativa*) cultivada hidroponicamente, Zheng et al. (2017a) obtiveram aumentos superiores a 60% na massa fresca, além de redução significativa do teor de nitrato nas folhas. Em arroz (*Oryza sativa*), aplicações de CDs promoveram incrementos na produtividade e no conteúdo de carboidratos dos grãos (LI, Hao et al., 2018). Resultados positivos também foram observados em culturas como soja (*Glycine max*), tomateiro (*Solanum lycopersicum*), berinjela (*Solanum melongena*), melancia (*Citrullus lanatus*), repolho (*Brassica oleracea*) e rabanete (*Raphanus sativus*), nas quais foram registrados aumentos de produtividade próximos a 20% (LI, Hao et al., 2019). Além disso, Kou et al. (2021) verificaram melhorias na qualidade nutricional de tomate (*Solanum lycopersicum*) e alface (*Lactuca sativa*), incluindo aumento dos teores de vitamina C, açúcares solúveis e proteínas.

Apesar dos efeitos promissores, os resultados obtidos com CDs dependem fortemente das concentrações aplicadas e das características das nanopartículas utilizadas. Em doses elevadas,

efeitos tóxicos também têm sido observados. Chen et al. (2016), por exemplo, relataram redução significativa no crescimento de milho submetido a altas concentrações de CDs em solução nutritiva, acompanhada de aumento do estresse oxidativo e da peroxidação lipídica. Em *Arabidopsis thaliana*, Yan et al. (2021) verificaram inibição do crescimento radicular associada à redução da expressão de genes relacionados à biossíntese de auxina, ao reparo de DNA e ao ciclo celular.

Dessa forma, embora os Carbon Dots apresentem elevado potencial como bioestimulantes agrícolas, seus efeitos dependem de fatores como tamanho, carga superficial, concentração aplicada, formulação utilizada e espécie vegetal avaliada. Assim, estudos adicionais ainda são necessários para compreender plenamente seus mecanismos de ação, estabelecer doses seguras e ampliar sua aplicação prática na agricultura.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Produção dos Fertilizantes com nanomaterial de carbono

Os fertilizantes multinutrientes nas formulações NPK_nano 12-30-20 e NPKS_nano 11-28-17+5,6S (Tabela 1) foram produzidos a partir de DAP (18% N e 46% P₂O₅), KCl (58% K₂O) (< 425 mesh), S⁰ (99% S; < 200 mesh) e H₂SO₄ (32% S) concentrado. As quantidades de cada fertilizante simples foram definidas por meio de balanço de massa. Após a mistura dos componentes foi realizada a compactação em placa de aço inoxidável, com auxílio de um aglomerante (solução de goma arábica 5%), aplicando pressão manual com auxílio de uma espátula. A secagem inicial dos grânulos, ainda dispostos sobre a placa, foi realizada com o auxílio de um soprador térmico. Em seguida, os grânulos, com diâmetro médio de 5,0 mm e altura de 3,0 mm, foram submetidos à secagem em estufa a 65 °C por 24 h e, posteriormente, armazenados em recipientes plásticos.

Tabela 1. Proporção de matérias-primas das formulações NPK_nano e NPKS_nano considerando o uso do aditivo Nano_C2.

Fórmula	DAP	KCl	Nanomaterial	H ₂ SO ₄	S ⁰	Total
Proporção (% m/m)						
12-30-20	65	34	1	-	-	100
11-28-17+5,6S	60	30	1	5	4	100

DAP - Fosfato diamônico; KCl - Cloreto de potássio, H₂SO₄ - Ácido sulfúrico; S⁰ - Enxofre elementar.

3.2 Avaliação Físico-química

3.2.1 Higroscopicidade

Os fertilizantes foram avaliados quanto à higroscopicidade (capacidade de absorção de água da atmosfera). Duas amostras de massa inicial conhecida (500g) foram submetidas a pesagens diárias durante 30 dias, permanecendo expostos em condições de bancada (condição ambiente) com medição diária das médias de umidade relativa do ar (UR) e temperatura ambiente.

3.2.2 Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH em solução de cloreto de cálcio dos fertilizantes produzidos foi determinado em três amostras, utilizando-se um potenciômetro com termocompensação e eletrodo combinado para medição de pH, previamente calibrado, com sensibilidade de 0,01 unidade de pH.

3.2.3 Avaliação da cinética de liberação de nutrientes dos fertilizantes em coluna de substrato inerte

A dissolução dos fertilizantes foi avaliada conforme protocolo estabelecido por Scárdua (2024). Logo, foi realizado um experimento para avaliação da dissolução e cinética de liberação de nutrientes dos fertilizantes em colunas de areia ao longo de 20 dias, sob condições controladas, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com três tratamentos (NPK_nano, NPKS_nano e controle sem adição de fertilizante) e quatro repetições.

As colunas de areia foram constituídas de seringas adaptadas, com 6 cm de altura e 3 cm de diâmetro. A coluna foi preenchida na base e no topo com 1 cm de lã de vidro e 3 cm de areia lavada para filtro, totalizando 21,0 cm³ de volume útil de areia. Durante o período

avaliado as colunas foram fechadas nas extremidades utilizando filme de PVC (policloreto de vinila) (Figura 1).

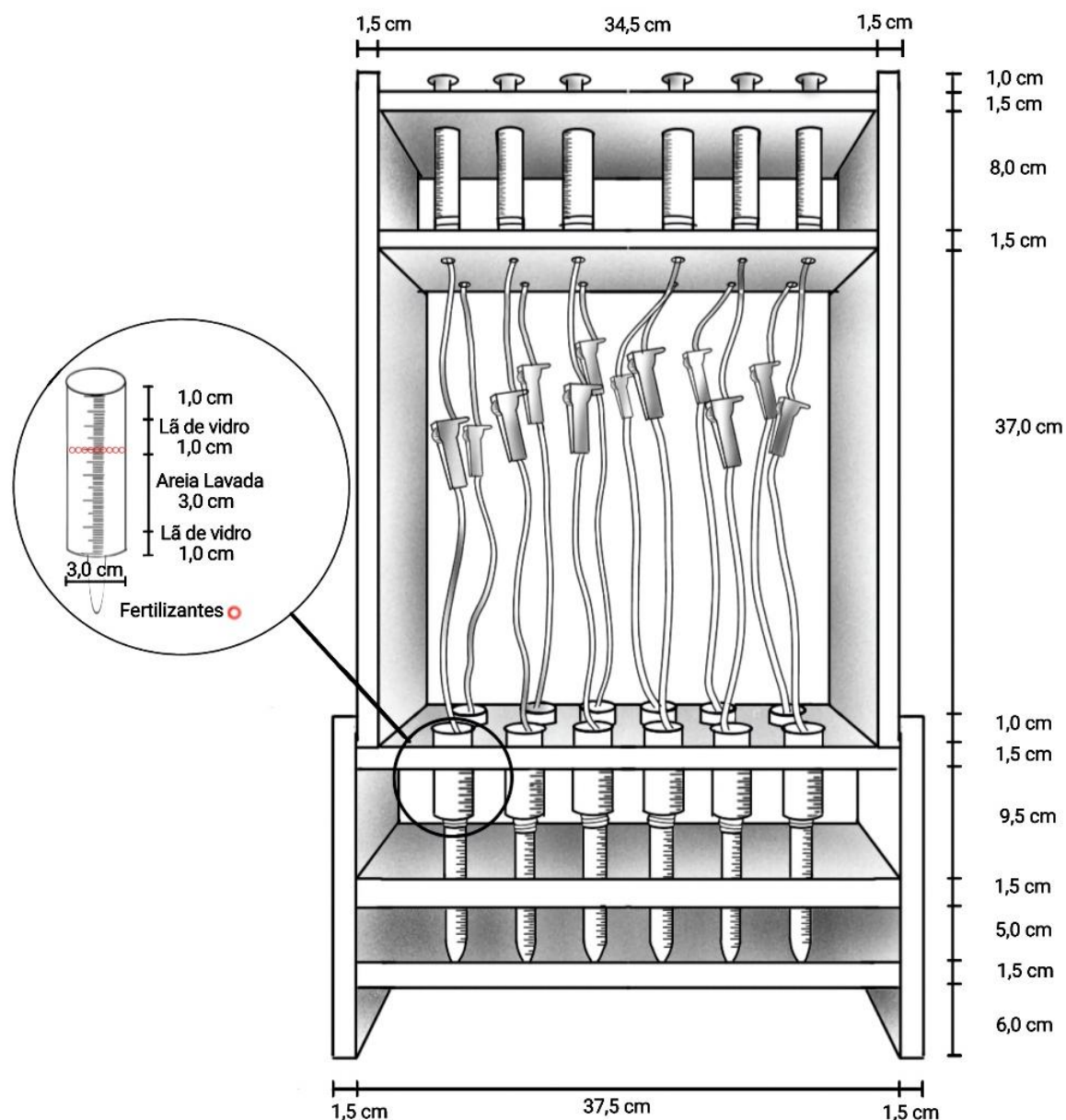


Figura 1. Descrição do sistema de avaliação da dissolução de fertilizantes em colunas de areia.

Os fertilizantes foram aplicados em dose única (um grânulo de massa conhecida por coluna) no início do experimento na parte superior da coluna de areia, logo abaixo da camada superior de lã de vidro. As lixiviações foram realizadas nos tempos de 1, 5, 10 e 20 dias com a aplicação de 10 mL de água deionizada na parte superior da coluna, no decorrer de 1 h (10 mL/h), com auxílio de um equipo de microgotas adaptado a uma seringa de 20 mL, cujo êmbolo

foi utilizado no final da lixiviação para expulsão da água restante no sistema. O lixiviado foi coletado em tubos plásticos tipo Falcon de 15 mL, posicionados na base da coluna. O volume do lixiviado foi aferido a cada lixiviação por meio de pesagem relacionando com a densidade da água, sendo em seguida realizada a determinação de P, K e S-SO₄²⁻ por Espectroscopia de Emissão Atômica com fonte de indução de Plasma Acoplado (*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry* - ICP OES).

As quantidades de nutrientes liberados (%) pelos fertilizantes foram avaliadas em função do tempo e do volume de água aplicado, bem como no acumulado ao longo dos 20 dias, conforme a Equação 1:

$$\text{Liberação (\%)} = \frac{\sum QL}{QA} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

Liberação (%) = percentagem de P, K ou S-SO₄²⁻ liberado pelo fertilizante

QL = Somatório da quantidade de P, K ou S-SO₄²⁻ no lixiviado

QA = Quantidade aplicada de P, K ou S-SO₄²⁻ na coluna.

3.3 Avaliação agronômica

3.3.1 Instalação do experimento

Visando avaliar a eficiência agronômica dos fertilizantes, foi realizado um experimento com o plantio de um híbrido de milho silagem (BM 3063 Pro3) durante a safra 24/25 em área terraceada (20°45'11.1"S e 42°50'42.4"W, 680 m de elevação) na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão (UEPE - Solos) do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (DPS - UFV), localizada no município de Viçosa, Minas Gerais. O clima da região é classificado como Cwa, pela classificação de Köppen-Geiger, caracterizado como mesotérmico com verões moderadamente quentes e estação seca no inverno (DANTAS et al., 2007). A temperatura média anual é de aproximadamente 20,4 °C, e a pluviosidade média anual é de 1.251 mm (CLIMATE DATA, 2024). O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 1999).

As análises físicas e químicas do solo apresentaram os seguintes resultados: Areia: 331 g kg⁻¹; Silte: 135 g kg⁻¹; Argila: 534 g kg⁻¹ (Areia: Peneiramento; Silte: Método da Pipeta - agitação lenta; Argila: Método da Pipeta - agitação lenta); Classificação textural: Argila; pH

H₂O: 5,8 (pH em água - Relação 1:2,5); P: 1,40 mg dm⁻³; K: 46 mg dm⁻³; Ca²⁺: 2,47 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺: 0,6 cmol_c dm⁻³; Al³⁺: 0,00 cmol_c dm⁻³; H+Al: 2,9 cmol_c dm⁻³; SB: 3,19 cmol_c dm⁻³; t: 3,19 cmol_c dm⁻³; T: 6,09 cmol_c dm⁻³; V (%): 52,40; m (%): 0,00; P-rem: 17,10 mg L⁻¹; (P e K – Extrator: Mehlich⁻¹; Ca²⁺ - Mg²⁺ - Al³⁺ - Extrator: KCl - 1 mol L⁻¹; H+Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0; SB = Soma de Bases Trocáveis; t - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V = Índice de Saturação por Bases; m = Índice de Saturação por Alumínio; P-rem = Fósforo Remanescente).

O experimento foi conduzido em parcelas subdivididas, segundo um delineamento em blocos casualizados (DBC), com cinco repetições. As parcelas principais corresponderam às diferentes formulações de fertilizantes (NPK_nano = 12-30-20; NPKS_nano = 11-28-17+5,6S; NPK_com = 08-28-16; e controle sem adubação de plantio); enquanto as subparcelas foram constituídas pela ausência ou presença da aplicação foliar de bioestimulante a base de nanopartículas (Arbolina®). Cada parcela experimental foi composta por cinco linhas de milho, com 4,0 m de comprimento (2,0 m por subparcela), com espaçamento entrelinhas de 0,5 m, totalizando uma área de 10,0 m². Para as avaliações, foi considerado como área útil apenas as três linhas centrais, excluindo-se 0,5 m em cada extremidade para formação da bordadura.

A dessecação da *Brachiaria ruziziensis* (*Urochloa ruziziensis*) presente na área foi realizada 22 dias pré-plantio do milho direto na palha, com dose equivalente a 5 L ha⁻¹ de Roundup Original (Glifosato 480 g L⁻¹ equivalente ácido) e volume de calda de 350 L ha⁻¹.

As linhas de plantio foram demarcadas no espaçamento de 0,5 m e foi realizada a abertura de um sulco em toda a extensão das mesmas para a distribuição dos fertilizantes de forma localizada no momento do plantio a cerca de 5 cm de profundidade. A dose de referência foi de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (52,4 kg ha⁻¹ de P), correspondente a 400 kg ha⁻¹ do formulado NPK_nano 12-30-20 (20 g m⁻¹), 430 kg ha⁻¹ do formulado NPK_com 08-28-16 (21,5 g m⁻¹), 430 kg ha⁻¹ do formulado NPKS_nano 11-28-17+5,6S (21,5 g m⁻¹) e controle sem adubação de plantio. A dose foi definida com base na análise de solo realizada. As sementes de milho foram semeadas a 28 cm entre plantas (71.428,0 sementes ha⁻¹) à profundidade de aproximadamente 3 cm.

A aplicação do herbicida foi realizada quando o milho se encontrava no estágio fenológico V3 (três folhas completamente desenvolvidas) e as plantas daninhas em pós-emergência inicial. Utilizou-se o herbicida Ultimato SC (Atrazina, 500 g L⁻¹), na dose equivalente a 5 L ha⁻¹, com volume de calda de 350 L ha⁻¹. Adicionalmente, procedeu-se a aplicação do bioestimulante Arbolina®, na dose equivalente a 20 g ha⁻¹ (correspondente a 50 mL ha⁻¹ do produto comercial), utilizando-se o mesmo volume de calda (350 L ha⁻¹).

A adubação de cobertura foi realizada de forma parcelada em todos os tratamentos, sendo a primeira adubação realizada no estágio fenológico V3, aplicando-se a dose equivalente a 450 kg ha⁻¹ de 20-00-20 (22,5 g m⁻¹), equivalente a 90 kg ha⁻¹ de N e 90 kg ha⁻¹ de K₂O (74,7 kg ha⁻¹ de K). Além disso, foi realizada a aplicação de sulfato de amônio nos tratamentos que não receberem enxofre no plantio na dose equivalente a 100 kg ha⁻¹ (5 g m⁻¹), equivalente a 24 kg ha⁻¹ de S e 20 kg ha⁻¹ de N. A segunda adubação foi realizada no estágio fenológico V7 (sete folhas completamente desenvolvidas) sendo aplicada a dose equivalente a 200 kg ha⁻¹ (10 g m⁻¹) de uréia sulfatada (43-00-00+2S), equivalente a 86 kg ha⁻¹ de N e 4 kg ha⁻¹ de S. Foram realizadas irrigações por aspersão pós plantio para garantir o estabelecimento do estande de plantas e após a realização das adubações para maior aproveitamento dos fertilizantes aplicados.

No estágio fenológico V7 também foi realizada a aplicação combinada de inseticidas para controle de lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*) e cigarrinha do milho (*Dalbulus maidis*), sendo Engeo Pleno (Tiametoxam 141 g L⁻¹ e Lambda-cialotrina 106 g L⁻¹), dose equivalente a 200 mL ha⁻¹ e Connect (Imidacloprido 100 g L⁻¹ e Beta-ciflutrina 12,5 g L⁻¹), dose equivalente a 1 L ha⁻¹ e volume de calda de 160 L ha⁻¹. Além disso, foi realizada a aplicação de Arbolina® na dose equivalente a 20 g ha⁻¹ (equivalente a 50 mL ha⁻¹ do produto comercial) e volume de calda de 350 L ha⁻¹.

No estágio fenológico V10 (dez folhas completamente desenvolvidas) foi realizada mais uma aplicação de inseticida para controle de lagarta do cartucho e cigarrinha utilizando o Polytrin (Profenofós 400 g L⁻¹ e Cipermetrina 40 g L⁻¹), dose equivalente a 2 L ha⁻¹ e volume de calda de 160 L ha⁻¹. Também foi realizada a aplicação de Arbolina® na dose equivalente a 20 g ha⁻¹ (equivalente a 50 mL ha⁻¹ do produto comercial) e volume de calda de 350 L ha⁻¹.

3.3.2 Avaliações fisiológicas da planta de milho

As avaliações fisiológicas foram realizadas com auxílio do equipamento MultispeQ, operado de forma integrada a um smartphone com sistema Android. Trata-se de um dispositivo desenvolvido especificamente para a mensuração de parâmetros fisiológicos de plantas em condições de campo (KUHLGERT et al., 2016).

As avaliações foram realizadas nas três linhas centrais e ocorreram em três momentos: no pré-pendoamento (emissão da folha bandeira, 55 dias pós-plantio), no pendoamento (estádio fenológico VT, 60 dias pós plantio) e uma semana após o pendoamento (período de enchimento de grãos, 68 dias pós plantio). As leituras foram realizadas no período da manhã, em três plantas por subparcela, utilizando-se folhas representativas. Os procedimentos adotados seguiram as

recomendações de Kuhlert et al. (2016), mantendo-se a angulação natural da folha durante a fixação do sensor, evitando-se a região da nervura central do limbo foliar e assegurando-se a uniformidade das condições ambientais entre plantas pertencentes ao mesmo bloco ao longo das avaliações.

Os dados foram transferidos por meio do pacote {Photosynq} disponível para R, extraídos da plataforma PhotosynQ, organizados e as variáveis de interesse foram selecionadas com o pacote {dplyr}. Para garantir adequada formatação, manipulação e utilização dos dados nas análises estatísticas, foi utilizada a função ListNoLocation(), desenvolvida em Rlang por Fialho (2025).

Foram determinadas as variáveis: Índice SPAD (Soil Plant Analysis Development), ϕ II (Rendimento quântico efetivo do fotossistema II - PSII), ϕ NO (Rendimento quântico de dissipação não regulada de energia não fotoquímica do fotossistema II - PSII) e ϕ NPQ (Rendimento quântico da dissipação regulada de energia não fotoquímica do fotossistema II - PSII).

3.3.3 Análise nutricional foliar da planta de milho

A coleta da folha índice foi realizada nas três linhas centrais na ocasião da emissão da inflorescência feminina (estádio fenológico R1), sendo utilizado o terço médio da primeira folha oposta e abaixo da espiga principal, eliminando-se a nervura central (MALAVOLTA et al., 1997; RAIJ, 2011; BROCH e RANNO 2011), sendo realizada a coleta de quatro folhas por subparcela (8 folhas por parcela).

O material coletado foi seco em estufa, a 65 °C por 72 h. Logo após, foi realizada a moagem do material em moinho de facas de aço inoxidável tipo Willey e as amostras foram submetidas às digestões sulfúricas e nitroperclóricas, a fim de obter os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn) e ferro (Fe) (MALAVOLTA et al., 1997).

3.3.4 Análise dos componentes de produção da planta de milho

Ao final do ciclo do milho silagem (início do estágio fenológico R5, 90 dias pós-plantio), foi realizada a avaliação da produtividade nas três linhas centrais das parcelas, considerando os seguintes parâmetros: altura da inserção da primeira espiga (medida desde a base da planta ao nível do solo até a inserção da primeira espiga, com fita métrica) e altura da planta (medida a partir da base da planta ao nível do solo até o topo do pendão, também com fita métrica), sobre 6 plantas por parcela (3 plantas por subparcela).

Logo após, foi realizada a separação da parte aérea em relação às suas raízes à altura de 30 cm. A parte aérea foi pesada para determinação da massa verde e estimativa de produtividade. Posteriormente, foi realizada a moagem, com auxílio de picadora de forragem, de 8 plantas por parcela (4 plantas por subparcela) para obtenção de uma amostra composta. Essa amostra foi pesada e, em seguida, seca em estufa com circulação de ar forçada a 65°C por 72 h, para obtenção do teor de matéria seca e estimativa de produtividade de matéria seca de parte aérea. Logo após, foi realizada a moagem do material em moinho de facas de aço inoxidável tipo Willey e as amostras foram submetidas às digestões sulfúricas e nitroperclóricas a fim de obter os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Mn, Zn e Fe (MALAVOLTA et al., 1997).

A exportação de nutrientes foi avaliada segundo a equação 2:

$$EXP = \frac{t_N \times prod_MS}{1000} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

EXP: exportação de nutrientes em kg ha⁻¹ ou g ha⁻¹

t_N = teor do nutriente (mg kg⁻¹ para micronutrientes, g kg⁻¹ para macronutrientes)

prod_MS = produtividade de matéria seca (kg ha⁻¹).

3.4 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos às análises de normalidade e homogeneidade de variâncias como premissas da análise de variância (ANOVA) e os tratamentos foram comparados por meio de teste de Tukey a 5% de significância (p < 0,05). Todos os testes estatísticos foram realizados no R versão 4.2.2 (R Core Team, 2022).

4. RESULTADOS

4.1 Produção dos fertilizantes e potencial hidrogeniônico (pH)

As misturas granuladas, produzidas pelo método de compactação, são apresentadas na Figura 2. A adição de pequenas quantidades do nanomaterial (1,0 % m/m) alterou a coloração dos grânulos. Observou-se ainda que o processo de secagem e armazenamento não resultaram em fissuras ou fragmentação visualmente identificáveis, indicando boa estabilidade estrutural

dos materiais produzidos. O valor médio de pH observado para o fertilizante NPKS_nano foi ligeiramente menor (6,59) que aquele observado para o fertilizante NPK_nano (7,40).

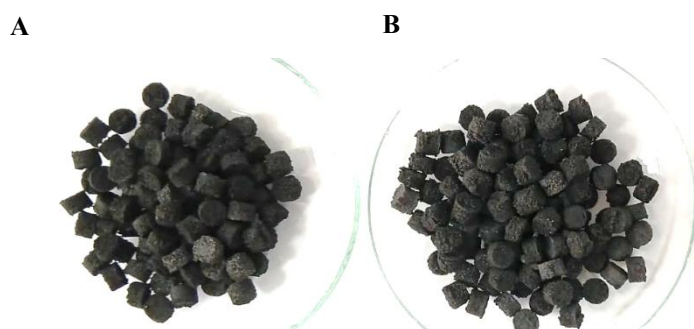


Figura 2. Imagem dos grânulos de NPK_nano (A) e NPKS_nano (B) sem neoformação de cristais após 30 dias em condições de bancada.

4.2 Higroscopicidade

Quando os grânulos foram expostos às condições ambientais, as misturas granuladas (NPK_nano e NPKS_nano) produzidas com adição do nanomaterial de carbono não apresentaram alterações na sua coloração e consistência e não houve a formação de cristais, resultando em elevada estabilidade sob as condições de exposição (Figura 2).

Durante o período avaliado, o fertilizante NPK_nano apresentou variação máxima de 2,04% (m/m), com média de 0,93% (m/m), e a umidade relativa do ar (UR) e a temperatura ambiente ficaram em média 70,26% e 22,56 °C, respectivamente (Figura 3; A). O fertilizante NPKS_nano apresentou variação máxima de 5,92% (m/m) com média de 2,81% (m/m) e a umidade relativa do ar (UR) e temperatura ambiente ficaram em média, 70,15% e 22,56 °C, respectivamente (Figura 3; B). O comportamento de absorção de umidade pelos fertilizantes NPK_nano e NPKS_nano, bem como a consequente variação da massa inicial em função da umidade ambiente ao longo do período avaliado, está apresentado na Figura 3.

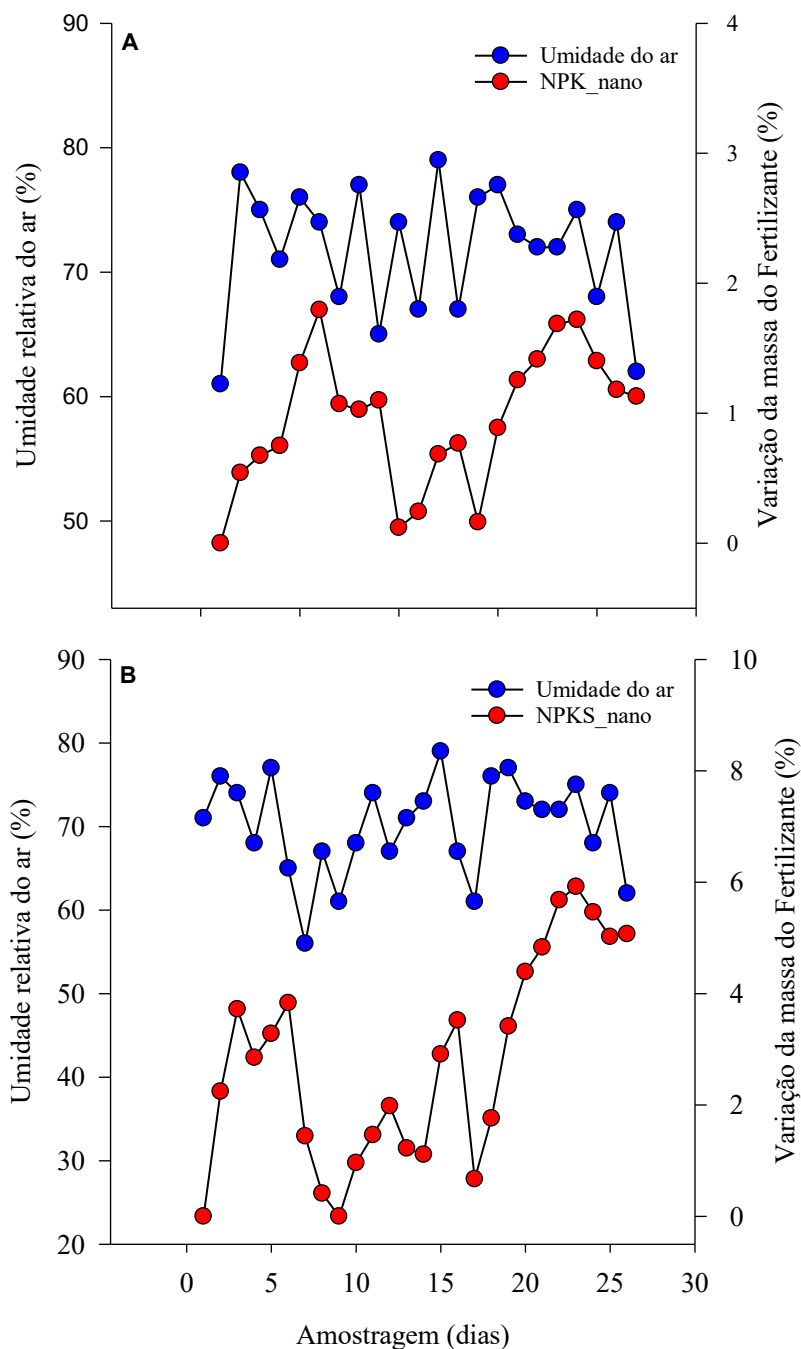


Figura 3. Variação da massa dos fertilizantes NPK_nano (A) e NPKS_nano (B) durante o período de avaliação.

4.3 Cinética de liberação de nutrientes dos fertilizantes

A cinética de liberação de nutrientes dos grânulos (Figura 4) foi similar entre os fertilizantes, não havendo diferenças estatísticas ($p > 0,05$), mostrando que as alterações realizadas entre as formulações não alteraram significativamente o padrão de liberação de nutrientes.

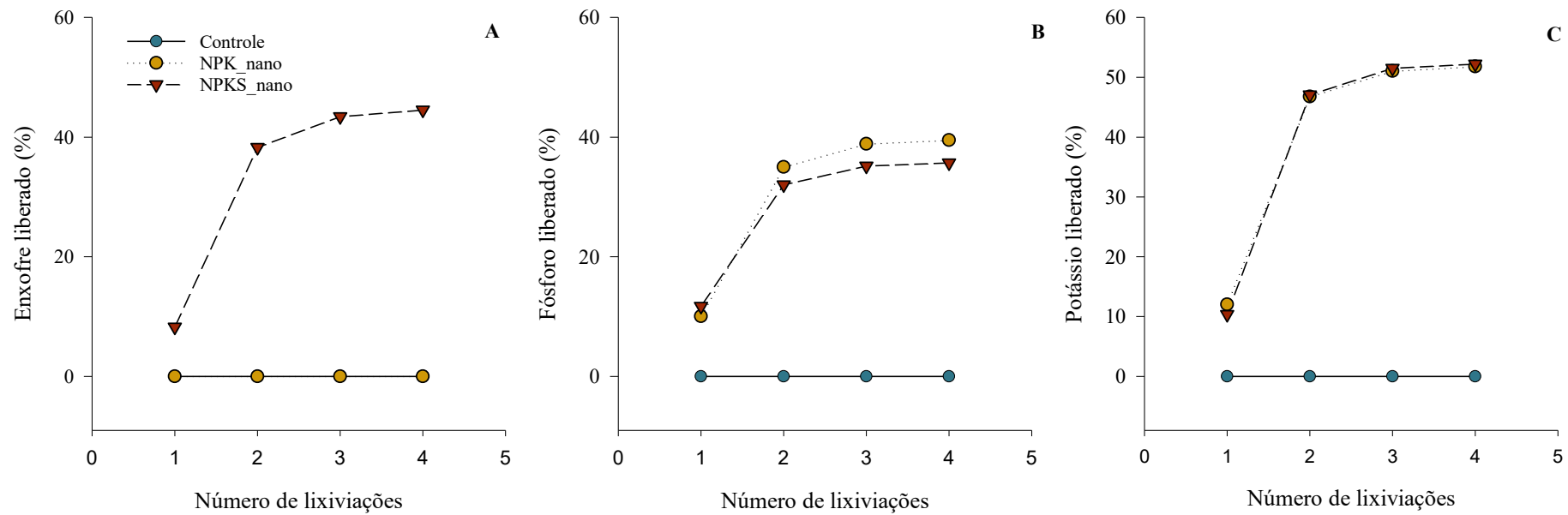


Figura 4. Gráfico representativo da liberação acumulada de S-SO₄²⁻ (A), de P (B) e de K (C) dos fertilizantes com nanomaterial de carbono em função das lixiviações.

A dissolução do formulado NPKS_nano, ao longo das quatro lixiviações, mostrou liberação de 44,52 % de S ($S-SO_4^{2-}$). As formulações com nanomaterial de carbono, com ou sem S, apresentaram liberação de P e K, em média, de 37,60 % e 52,00 % de P e K, respectivamente (Figura 4).

Os resultados indicam que a adição de enxofre elementar (S^0) e ácido sulfúrico (H_2SO_4) não alterou a cinética de liberação dos nutrientes. A coluna de areia e seus componentes não apresentaram contaminação com P, K e $S-SO_4^{2-}$ conforme demonstrado no controle (Figura 4).

4.4 Avaliação Agronômica

4.4.1 Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (PSII) - ΦII

Os valores médios de ΦII variaram de 0,47 a 0,55 entre os estádios fenológicos avaliados (Tabela 2). Observou-se leve incremento nos valores durante o enchimento de grãos, especialmente nas plantas adubadas, independentemente do uso de bioestimulante. O tratamento controle respondeu positivamente à aplicação foliar de Arbolina® durante o pendoamento e enchimento de grãos, mantendo elevado ΦII , semelhante às plantas que foram adubadas com as formulações. Não foram detectadas diferenças significativas entre os fertilizantes ($p > 0,05$), com ou sem a aplicação foliar do bioestimulante.

Tabela 2. Rendimento quântico efetivo do PSII (ΦII), em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).

Fertilizante	Pré-pendoamento		Pendoamento		Enchimento de grãos	
	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A
CONTROLE	0,49Aa	0,45Aa	0,48Aa	0,31Bb	0,49Ab	0,44Bb
NPK_com	0,55Aa	0,56Aa	0,51Aa	0,46Aab	0,57Aab	0,58Aa
NPK_nano	0,54Aa	0,54Aa	0,42Aa	0,38Aa	0,55Aa	0,57Aa
NPKS_nano	0,47Aa	0,47Aa	0,48Aa	0,41Aab	0,57Aa	0,56Aa
Média	0,51	0,51	0,47	0,39	0,55	0,54
Desvio	0,06	0,09	0,10	0,13	0,04	0,07
CV (%)	11,26	17,74	20,67	33,23	8,22	13,75

Letras maiúsculas comparam os tratamentos com (C/A) e sem (S/A) adição de Arbolina® via foliar, dentro do estágio fenológico, e letras minúsculas comparam os fertilizantes, dentro do estágio fenológico, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

4.4.2 Rendimento Quântico de Dissipação Não Regulada de Energia Não Fotoquímica do Fotossistema II (PSII) - ΦNO

Os valores de ΦNO mantiveram-se entre 0,18 e 0,23 ao longo das avaliações (Tabela 3). O tratamento controle respondeu negativamente à aplicação foliar de Arbolina® durante o pendoamento e enchimento de grãos, mantendo ΦNO elevado. Não foram detectadas diferenças significativas entre os fertilizantes, independentemente da aplicação foliar do bioestimulante ($p > 0,05$).

Tabela 3. Rendimento quântico de dissipação não regulada de energia não fotoquímica do PSII, ou dissipação na forma de fluorescência (ΦNO), em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).

Fertilizante	Pré-pendoamento		Pendoamento		Enchimento de grãos	
	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A
CONTROLE	0,20Aa	0,19Ab	0,18Aa	0,12Bb	0,23Aa	0,21Ba
NPK_com	0,23Aa	0,22Aa	0,20Aa	0,19Aa	0,23Aa	0,23Aa
NPK_nano	0,22Aa	0,22Aa	0,19Aa	0,19Aa	0,23Aa	0,23Aa
NPKS_nano	0,22Aa	0,23Aa	0,19Aa	0,20Aa	0,23Aa	0,23Aa
Média	0,22	0,21	0,19	0,18	0,23	0,23
Desvio	0,02	0,03	0,03	0,05	0,02	0,02
CV (%)	7,42	12,73	14,70	29,47	7,51	10,17

Letras maiúsculas comparam os tratamentos com (C/A) e sem (S/A) adição de Arbolina® via foliar, dentro do estágio fenológico, e letras minúsculas comparam os fertilizantes, dentro do estágio fenológico, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

4.4.3 Rendimento Quântico da Dissipação Regulada de Energia Não Fotoquímica do Fotossistema II (PSII) - ΦNPQ

Os valores de ΦNPQ variaram entre 0,22 e 0,43 (Tabela 4). A aplicação foliar de Arbolina® diminuiu significativamente ($p < 0,05$) a capacidade de dissipação térmica de energia no fotossistema II no tratamento controle sob deficiência nutricional, especialmente durante pendoamento e enchimento de grãos.

Tabela 4. Rendimento quântico da dissipação regulada de energia não fotoquímica do PSII, ou dissipação na forma de calor (ΦNPQ), em função do estágio fenológico das plantas de milho

cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).

Fertilizante	Pré-pendoamento		Pendoamento		Enchimento de grãos	
	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A
CONTROLE	0,31Aa	0,36Aa	0,34Ba	0,56Aa	0,29Ba	0,35Aa
NPK_com	0,22Aa	0,22Ab	0,29Aa	0,35Aab	0,20Aab	0,19Ab
NPK_nano	0,24Aa	0,24Aab	0,39Aa	0,43Ab	0,21Aab	0,20Ab
NPKS_nano	0,31Aa	0,31Aab	0,33Aa	0,40Aab	0,19Ab	0,20Ab
Média	0,27	0,28	0,34	0,43	0,22	0,24
Desvio	0,06	0,11	0,12	0,18	0,05	0,09
CV (%)	23,28	38,89	35,81	40,62	21,31	38,95

Letras maiúsculas comparam os tratamentos com (C/A) e sem (S/A) adição de Arbolina® via foliar, dentro do estágio fenológico, e letras minúsculas comparam os fertilizantes, dentro do estágio fenológico, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

4.4.4 Soil Plant Analysis Development - SPAD

Os valores do índice SPAD foram superiores nas plantas tratadas com as diferentes formulações fertilizantes, variando de 64 a 71, em contraste com o controle (≈ 53) (Tabela 5). A incorporação do nanomaterial e a aplicação foliar de Arbolina® não alteraram significativamente o índice SPAD ($p > 0,05$).

Tabela 5. Soil Plant Analysis Development - SPAD, em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).

Fertilizante	Pré-pendoamento		Pendoamento		Enchimento de grãos	
	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A
CONTROLE	55,05Ab	54,88Ab	55,74Ab	52,41Ab	53,04Ab	52,32Ab
NPK_com	70,46Aa	71,16Aa	69,23Aa	65,79Aa	66,70Aa	64,70Aa
NPK_nano	69,61Aa	69,00Aa	68,35Aa	70,94Aa	67,31Aa	67,37Aa
NPKS_nano	69,03Aa	68,56Aa	66,73Aa	66,88Aa	65,13Aa	64,37Aa
Média	66,04	65,90	65,01	64,00	63,04	62,19
Desvio	7,53	8,10	6,52	8,24	7,79	7,62
CV (%)	11,40	12,30	10,03	12,88	12,35	12,25

Letras maiúsculas comparam os tratamentos com (C/A) e sem (S/A) adição de Arbolina® via foliar, dentro do estágio fenológico, e letras minúsculas comparam os fertilizantes, dentro do estágio fenológico, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

4.4.5 Análise foliar

Os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), cálcio (Ca), cobre (Cu) e manganês (Mn) foram superiores nas plantas que receberam adubação com as diferentes formulações de fertilizantes em comparação às plantas controle (Tabela 6). Por outro lado, as formulações NPK_com, NPK_nano e NPKS_nano apresentaram menores teores de enxofre (S) e zinco (Zn) quando associadas à aplicação de Arbolina®. As plantas fertilizadas com a formulação NPKS_nano apresentaram menores teores de Cu e de Mn quando associada à aplicação de Arbolina® em relação à ausência do bioestimulante. Não houve diferenças significativas nos teores de potássio (K), de magnésio (Mg) e boro (B) entre os tratamentos ($p > 0,05$).

Tabela 6. Teores de N, P, K, Ca, Mg e S na folha índice coletada no estágio R1 do milho, quando não houve aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano) com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).

Fertilizante	N		P		K		Ca		Mg		S	
	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A
	dag kg ⁻¹											
CONTROLE	3,01Aa	2,83Ab	0,17Ab	0,16Ab	2,62Aa	2,59Aa	0,39Ab	0,41Ab	0,19Aa	0,19Aa	0,23Aa	0,23Aa
NPK_com	3,09Aa	3,18Aa	0,23Aa	0,24Aa	2,71Aa	2,85Aa	0,45Aab	0,45Aab	0,19Aa	0,18Aa	0,22Aab	0,22Aa
NPK_nano	3,10Aa	2,91Bb	0,24Aa	0,23Aa	2,65Aa	2,73Aa	0,46Aa	0,47Aa	0,19Aa	0,18Aa	0,20Ab	0,21Aa
NPKS_nano	3,06Aa	3,18Aa	0,23Aa	0,24Aa	2,53Aa	2,63Aa	0,47Aa	0,48Aa	0,19Aa	0,18Aa	0,21Ab	0,21Aa
Média	3,07	3,03	0,22	0,22	2,63	2,70	0,44	0,45	0,19	0,18	0,21	0,22
Desvio	0,14	0,25	0,04	0,05	0,23	0,17	0,05	0,05	0,02	0,02	0,01	0,02
CV (%)	4,50	8,13	19,11	22,70	8,82	6,25	11,75	10,98	8,67	9,25	5,91	7,49

Fertilizante	Cu		Fe		Zn		Mn		B	
	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A
	mg kg ⁻¹									
CONTROLE	10,78Aa	10,40Ab	89,47Aa	91,28Aa	15,15Aa	15,57Aa	39,49Ab	37,94Ab	12,04Aa	10,71Aa
NPK_com	11,83Aa	12,15Aa	99,84Aa	135,24Aa	14,84Aab	15,09Aa	50,47Aa	51,59Aa	9,08Aa	10,89Aa
NPK_nano	11,03Aa	11,39Aab	94,92Aa	103,12Aa	13,75Aab	13,36Aa	58,13Aa	54,96Aa	9,61Aa	8,48Aa
NPKS_nano	11,19Ba	11,81Aa	93,43Aa	93,63Aa	12,47Ab	13,29Aa	53,62Ba	59,71Aa	11,76Aa	9,64Aa
Média	11,21	11,44	94,41	105,82	14,05	14,33	50,43	51,05	10,62	9,93
Desvio	0,77	1,10	8,14	38,82	1,89	1,61	11,38	10,81	3,25	2,79
CV (%)	6,85	9,61	8,63	36,68	13,46	11,21	22,56	21,18	30,59	28,13

Letras maiúsculas comparam os tratamentos com (C/A) e sem (S/A) adição de Arbolina® via foliar e letras minúsculas comparam os fertilizantes, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

4.4.6 Altura de inserção de espiga, altura e produtividade de plantas de milho

As plantas que receberam a adição de fertilizantes apresentaram maiores alturas e produtividades em relação ao tratamento controle, sem fertilização de plantio (Tabela 7). Nestes tratamentos, a altura média das plantas atingiu 3,09 m, com inserção de espiga a 1,54 m, contrastando com 2,3 m de altura média e 0,99 m de inserção de espiga no controle. As produtividades médias de matéria verde e seca foram, respectivamente, de 55,89 t ha⁻¹ e 16,75 t ha⁻¹ nos tratamentos adubados, contrastando com 33,01 t ha⁻¹ e 9,19 t ha⁻¹ no controle. Os resultados revelam ausência de diferenças significativas ($p > 0,05$) entre as formulações com Nano_C2 e o fertilizante comercial, bem como ausência de efeito consistente da Arbolina[®] sobre esses parâmetros.

Tabela 7. Altura de inserção de espiga (IE), altura de plantas (AP), produtividade de matéria verde (Prod MV) e produtividade de matéria seca (Prod MS) das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina[®]).

Fertilizante	IE		AP		Prod MV		Prod MS	
	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A
	m				t ha ⁻¹			
CONTROLE	1,03Ab	0,95Ab	2,33Ab	2,27Ab	32,22Ab	33,89Ab	8,67Ab	9,70Ab
NPK_com	1,60Aa	1,52Aa	3,13Aa	3,10Aa	60,36Aa	57,22Aa	18,60Aa	17,85Aa
NPK_nano	1,52Aa	1,50Aa	3,05Aa	3,06Aa	56,84Aa	51,50Aa	16,90Aa	15,44Aa
NPKS_nano	1,55Aa	1,56Aa	3,10Aa	3,12Aa	57,22Aa	52,22Aa	16,81Aa	14,89Aa
Média	1,43	1,38	2,90	2,89	51,66	48,71	15,24	14,47
Desvio	0,26	0,29	0,39	0,43	13,74	13,69	4,72	4,69
CV (%)	18,34	20,80	13,28	14,72	26,59	28,10	30,94	32,38

Letras maiúsculas comparam os tratamentos com (C/A) e sem (S/A) adição de Arbolina[®] via foliar, dentro do estágio fenológico, e letras minúsculas comparam os fertilizantes, dentro do estágio fenológico, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

4.4.7 Exportação de nutrientes

A exportação de nutrientes acompanhou o aumento da produtividade (Tabela 8). Os tratamentos adubados apresentaram maiores valores médios de exportação em relação ao controle, com destaque para o N (≈ 160 kg ha⁻¹) e o K (≈ 123 kg ha⁻¹). Os resultados obtidos mostraram que não houve diferenças significativas entre as formulações com adição do

nanomaterial (Nano_C2) e o fertilizante convencional ($p > 0,05$). De maneira geral, a aplicação de Arbolina[®] não alterou a exportação de nutrientes.

Tabela 8. Exportação de nutrientes pelas plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).

Fertilizante	N		P		K		Ca		Mg		S	
	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A
	kg ha ⁻¹											
CONTROLE	88,83Ab	90,81Ab	7,38Ab	7,61Ab	71,68Ab	73,77Ab	17,07Ab	17,85Ab	12,49Ab	13,57Ab	9,08Ab	8,53Ab
NPK_com	176,23Aa	168,12Aa	16,53Aa	15,75Aa	135,23Aa	132,23Aa	34,44Aa	33,34Aa	25,03Aa	22,47Aa	16,99Aa	15,80Aa
NPK_nano	163,36Aa	151,76Aa	15,39Aa	14,25Aab	123,47Aa	116,02Aa	31,57Aa	28,04Aa	21,15Aa	20,77Aa	15,11Aa	13,77Aa
NPKS_nano	157,69Aa	141,84Aa	14,73Aa	13,42Aab	116,00Aa	115,07Aa	34,71Aa	30,06Aa	21,93Aa	18,08Bab	14,60Aa	13,23Aa
Média	146,53	138,13	13,50	12,76	111,60	109,27	29,44	27,32	20,15	18,72	13,95	12,83
Desvio	46,23	44,30	5,63	6,01	33,00	36,37	8,71	8,87	6,54	6,45	4,32	4,12
CV (%)	31,55	32,07	41,67	47,13	29,57	33,29	29,56	32,45	32,46	34,46	30,96	32,11

Fertilizante	Cu		Fe		Zn		Mn		B	
	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A	C/A	S/A
	g ha ⁻¹									
CONTROLE	32,32Ab	31,05Ab	481,62Ab	563,90Ab	155,03Aa	139,61Aa	356,82Ab	390,34Ab	41,18Ab	51,58Aa
NPK_com	64,97Aa	63,42Aa	1033,18Aa	952,74Aa	162,06Aa	188,89Aa	574,45Aab	727,03Aa	78,30Aab	84,97Aa
NPK_nano	55,35Aa	58,41Aa	951,35Aa	806,41Aab	178,23Aa	183,70Aa	677,13Aa	601,62Aab	74,02Aab	60,91Aa
NPKS_nano	63,48Aa	50,27Ba	1051,11Aa	750,15Bab	134,37Aa	157,56Aa	689,77Aa	577,01Aab	103,41Aa	80,50Aa
Média	54,03	50,79	879,32	768,30	157,42	167,44	574,54	574,00	74,23	69,49
Desvio	17,43	18,02	293,32	191,07	76,74	54,69	234,21	176,88	38,54	23,75
CV (%)	32,25	35,49	33,36	24,87	48,75	32,66	40,76	30,81	51,92	34,18

Letras maiúsculas comparam os tratamentos com (C/A) e sem (S/A) adição de Arbolina® via foliar e letras minúsculas comparam os fertilizantes, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

5. DISCUSSÃO

A mistura de matérias primas concentradas, como DAP, KCl, S⁰ e H₂SO₄ permite a obtenção de formulações com maiores teores de nutrientes, o que otimiza a logística de distribuição e eleva a eficiência operacional da fertilização. Embora quimicamente compatíveis, essa mistura apresenta fortes incompatibilidades físico-químicas, caracterizadas pela absorção excessiva de água atmosférica.

Isso promove dissolução e recristalização superficial, alterando a morfologia granular e causando empedramento, o que compromete o armazenamento e a aplicação, conforme demonstrado por Cunha (2022). A simples mistura das fontes apresenta baixa umidade relativa crítica (UR_c), ou seja, a máxima umidade relativa atmosférica adequada ao armazenamento, corroborando resultados de Tenesse Valley Authority (T.V.A.) (1970) e Cunha (2022), que reportam UR_c de 70% e 72,19% para a mistura de DAP e KCl, respectivamente. Em contraste, as fontes isoladas (DAP e KCl) exibem UR_c de 82,4% e 84%, respectivamente (ALCARDE et al., 1992). Assim, a mistura de materiais distintos eleva a higroscopicidade em relação aos componentes individuais.

A variação observada na massa dos fertilizantes produzidos ocorreu devido à absorção de água atmosférica, a qual variou em função da umidade relativa do ar (UR) no decorrer do período de exposição. Porém, tal variação foi insuficiente para acarretar alterações nos materiais, não impactando na UR_c. Esse fenômeno corrobora ao observado por Cunha (2022) que avaliou misturas granuladas de DAP e KCl com adição do nanomaterial de carbono Nano_C2. O emprego desse aditivo viabiliza formulações multinutrientes mais concentradas e estáveis ao armazenamento prolongado.

A pequena redução observada no pH do NPKS_nano pode ser atribuída à presença de S⁰ e principalmente à utilização do H₂SO₄ na formulação, o que confere acidez ao meio. A adequação do pH dos grânulos pode ser uma forma de viabilizar a adição de micronutrientes catiônicos em futuras formulações, como por exemplo Zn e Cu, que tem aumento de sua solubilidade em valores de pH mais ácidos.

A cinética de liberação de nutrientes dos grânulos foi semelhante entre os fertilizantes sem diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$). Os resultados indicam que, independentemente da adição de S⁰, H₂SO₄ ou de Nano_C2, as modificações implementadas entre as formulações não alteraram de forma significativa o padrão de liberação de nutrientes. Essas formulações caracterizam-se por elevada solubilidade e liberação rápida, com exceção da fração de S⁰ (não avaliada), insolúvel em água e que requer oxidação para SO₄²⁻ a fim de

tornar-se disponível às plantas (CHIEN et al., 2017, HOROWITZ e MEURER, 2007). A coluna de areia e seus componentes não exibiram contaminação com P, K e $S-SO_4^{2-}$ conforme evidenciado no controle, assegurando a confiabilidade do sistema experimental empregado.

As variáveis fisiológicas avaliadas relacionam-se diretamente com o processo de absorção e utilização da energia luminosa pelas clorofilas, processo complexo e essencial para a fotossíntese. Maiores valores de ΦII (Rendimento quântico efetivo do fotossistema II) são importantes à medida que esta variável se correlaciona com a parte efetiva da fotossíntese que gera adenosina trifosfato (ATP) e poder redutor na forma de nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato ($NADPH_2$). O leve incremento observado na variável durante o período de enchimento de grãos, especialmente nas plantas adubadas (Tabela 2), indica maior eficiência fotossintética, independentemente do uso de Arbolina®. A Arbolina® manteve o ΦII elevado no tratamento controle durante o pendoamento e enchimento de grãos, semelhante às plantas que foram adubadas com as formulações, indicando que, em uma situação de estresse nutricional, ela proporcionou maior eficiência fotossintética.

O tratamento controle respondeu negativamente à aplicação foliar de Arbolina® durante o pendoamento e enchimento de grãos, mantendo ΦNO elevado (Rendimento quântico de dissipação não regulada de energia não fotoquímica do fotossistema II) (Tabela 3). Desta forma, a Arbolina® ocasionou maior necessidade de dissipar a energia na forma de fluorescência em uma situação de estresse nutricional, fato não observado nas plantas nutridas adequadamente. Nesse processo a planta dissipa energia de maneira não regulada, ou seja, não envolve, por exemplo, o ciclo das xantofilas, mas sim, a emissão de luz na região do vermelho e infravermelho, fenômeno denominado de fluorescência. Nesse fenômeno, a emissão de fótons de maior comprimento se dá quando a molécula excitada, nesse caso as clorofilas, retornam ao seu estado fundamental (TAIZ et al., 2017).

A aplicação de Arbolina® afetou significativamente a capacidade de dissipação térmica de energia no fotossistema II (ΦNPQ - Rendimento quântico da dissipação regulada de energia não fotoquímica do fotossistema II), especialmente durante os períodos de pendoamento e enchimento de grãos, principalmente na situação de deficiência nutricional presente no tratamento controle (Tabela 4). Essa variável está relacionada à proteção ativa e regulada da planta em relação ao excesso de energia luminosa recebida no PSII e dissipada na forma de calor no ciclo das xantofilas, protegendo o aparato fotossintético de danos causados por excesso de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) (TAIZ et al., 2017). Aparentemente, o grupo de plantas controle passou por maior estresse em relação aos outros grupos, havendo maior necessidade de dissipar ativamente a energia recebida. Ou seja, há indícios de que houve

prejuízos quanto à fotossíntese, nesses casos, e de que a fertilização com ou sem aditivos nano proporcionou melhores condições para as plantas aproveitarem melhor a energia luminosa nos seus processos metabólicos.

De forma semelhante ao adotado neste trabalho, Mota e Cano (2016) demonstraram, ao avaliarem plantas jovens de macaúba sob ciclos de seca, a aplicabilidade das variáveis Φ_{II} , Φ_{NO} e Φ_{NPQ} para inferir consequências dos estímulos ambientais no aparato fotossintético das plantas. O incremento de valores de Φ_{NPQ} , por exemplo, sinaliza aprimoramento da capacidade fotoprotetora do aparato fotossintético, uma vez que essa variável reflete a dissipação total de energia como calor no ciclo das xantofilas (BARALDI et al., 2008; MOUSTAKA; MOUSTAKAS, 2014). Esse ciclo modulado é ativado e inicia-se com a protonação do lúmen do tilacóide, por meio do elevado fluxo linear de elétrons (LEF), acarretando na desoxidação da violaxantina, que formará a anteraxantina, que posteriormente, formará a zeaxantina (BARALDI et al., 2008). Além disso, a variável Φ_{NO} foi utilizada para indicar a estabilidade da eficiência dos mecanismos de proteção do PSII durante o déficit hídrico induzido nas plantas de macaúba.

No presente estudo, as plantas adubadas exibiram valores de SPAD superiores e estatisticamente equivalentes entre si, em contraste com o tratamento controle. Tal resultado reforça o uso dessa variável como ferramenta eficiente e não destrutiva para estimar o conteúdo relativo de clorofila e avaliar o estado nutricional das plantas (em relação ao N) (XIONG et al. 2015), além de possibilitar a detecção precoce de estresses bióticos e abióticos, antes do surgimento de sintomas visuais, como a redução nos teores de clorofila (ANDRADE; JR; MAZZAFERA, 2015). Valores reduzidos de SPAD sugerem deficiência de nitrogênio e, consequentemente, menor formação de clorofila, enquanto valores elevados indicam suprimento adequado desse nutriente. Além disso, o SPAD pode auxiliar na determinação do momento ideal para a colheita e auxiliar na seleção de genótipos com maior tolerância a estresses (KUHLGERT et al., 2016).

Observou-se interação negativa entre a aplicação foliar da Arbolina® com os teores de S e Zn do milho. O status nutricional das plantas, para esses dois nutrientes, reduziu nos tratamentos com as formulações NPK_com, NPK_nano e NPKS_nano. Além disso, a aplicação de Arbolina® combinada à formulação NPKS_nano proporcionou menores teores de Cu e de Mn. Apesar das diferenças observadas, as plantas fertilizadas apresentaram teores foliares compatíveis com nutrição mineral adequada, conforme os valores de referência estabelecidos por Malavolta et al. (1997), Broch e Ranno (2011) e Raij (2011).

As plantas que receberam adubação apresentaram maior altura e produtividade decorrentes do adequado suprimento nutricional, em comparação ao controle sem fertilização de plantio. A menor performance do controle atribui-se principalmente à deficiência de P (P disponível = 1,40 mg dm⁻³). Os nanomateriais não afetaram o crescimento e a produtividade das plantas. A exportação de nutrientes acompanhou o aumento da produtividade, uma vez que se trata de uma variável diretamente proporcional à produção de matéria seca.

Os resultados são promissores ao evidenciarem a possibilidade de obtenção de formulações mais concentradas e estáveis ao armazenamento. Essas formulações mantêm o suprimento nutricional adequado às plantas, otimizando a logística sem comprometer a produtividade das culturas.

6. CONCLUSÃO

A produção de formulações a base de DAP e KCl com e sem a adição de H₂SO₄ e S⁰, concentradas e estáveis ao armazenamento, pode ser feita com a adição de 1,0% (m/m) do nanomaterial de carbono na matriz mineral do fertilizante.

A adição do nanomaterial de carbono não causa efeitos negativos no crescimento vegetal, na tolerância a estresses abióticos, no estado nutricional ou na produtividade das plantas.

Nas condições deste estudo, a aplicação foliar do bioestimulante Arbolina® não promoveu ganhos significativos no crescimento, na tolerância a estresses abióticos, no estado nutricional ou na produtividade das plantas adequadamente fertilizadas.

Os fertilizantes formulados com o nanocomposto de carbono apresentaram desempenho agronômico equivalente ao fertilizante comercial.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-AZIZ, H. M. M. et al. Waste-derived NPK nanofertilizer enhances growth and productivity of capsicum annuum l. **Plants**, v. 10, n. 6, 1 jun. 2021.

ACHARYA, P.; JAYAPRAKASHA, G. K.; CROSBY, K. M.; JIFON, J. L.; PATIL, B. S. Nanoparticle-Mediated Seed Priming Improves Germination, Growth, Yield, and Quality of Watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas. **Scientific Reports**, vol. 10, no. 1, p. 1–16, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61696-7>.

ACHARI, G.A.; KOWSHIK, M. Recent developments on nanotechnology in agriculture: Plant mineral nutrition, health, and interactions with soil microflora. **J. Agric. Food Chem.** 2018, 66, 8647–8661. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00691>.

ALCARDE, J. C. et al. Avaliação da higroscopicidade de fertilizantes e corretivos. **Scientia Agricola**, v. 49, n. spe, p. 137–144, 1992.

ANDRADE, S. A. L. de; JR, A. P. D.; MAZZAFERA, P. Photosynthesis is induced in rice plants that associate with arbuscular mycorrhizal fungi and are grown under arsenate and arsenite stress. **Chemosphere**, Elsevier, v. 134, p. 141–149, 2015.

ATTIA, E. A.; ELHAWAT, N. Combined foliar and soil application of silica nanoparticles enhances the growth, flowering period and flower characteristics of marigold (*Tagetes erecta* L.). **Scientia Horticulturae**, vol. 282, p. 110015, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110015>.

BARALDI, R. et al. Role of xanthophyll cycle-mediated photoprotection in arbutus unedo plants exposed to water stress during the mediterranean summer. **Photosynthetica**, Springer, v. 46, p. 378–386, 2008.

BORIŠEV, M.; BORIŠEV, I.; ŽUPUNSKI, M.; ARSENOV, D.; PAJEVIĆ, S.; ĆURČIĆ, Ž.; VASIN, J.; DJORDJEVIC, A. Drought impact is alleviated in sugar beets (*Beta vulgaris* L.) by foliar application of fullerene nanoparticles. **PLoS ONE**, vol. 11, no. 11, p. e0166248, 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166248>.

BRASIL. Decreto nº 10.991, de 11 de março de 2022. Institui o Plano Nacional de Fertilizantes 2022–2050 e o Conselho Nacional de Fertilizantes e Nutrição de Plantas. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/2022/governo-federal-lanca-plano-nacional-de-fertilizantes-para-reduzir-importacao-dos-insumos#:~:text=Objetivos%20do%20PNF,%2C%20nanomateriais%2C%20entre%20outros>. Acesso em: 03 janeiro 2026.

BRASIL. Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d4954.htm. Acesso em: 14 jun. 2026.

BRASIL. Instrução Normativa 61, de 8 de julho de 2020. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Secretaria de Defesa Agropecuária**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/instrucao-normativa-n-61-de-8-de-julho-de-2020> 266802148. Acessado em: 14 jun. 2026.

BROCH, D. L.; RANNO, S. K. *Fertilidade do Solo, Adubação e Nutrição da Cultura do Milho. Tecnologia e Produção: Soja e Milho 2011/2012*. **Circular Técnica n.12**. 2011. Fundação Mato Grosso do Sul. 12p.

BOEHM A. L. et al. Nanoprecipitation technique for the encapsulation of agrochemical active ingredients. **J Microencapsul**. 2003. 20:433–441.

BORSARI, F. Fertilizantes inteligentes. **Revista AgroDBO**, v. 45, p. 54–57, 2013.

BUSO, W. H. D.; MACHADO, A. S.; RIBEIRO, T. B.; SILVA, L. O. Produção e composição bromatológica da silagem de híbridos de milho sob duas alturas de corte. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 5, n. 4, p. 74-80, 2018.

CALABRO, R. L.; YANG, D. S.; KIM, D. Y. Liquid-phase laser ablation synthesis of graphene quantum dots from carbon nano-onions: Comparison with chemical oxidation. **Journal of Colloid and Interface Science**, vol. 527, p. 132–140, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.04.113>.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; Jr, D.M.; BOARETTO, R.M.; RAIJ, B.V. **Boletim 100: Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas - IAC, 500p. 2022.

CHANDRA, S.; PRADHAN, S.; MITRA, S.; PATRA, P.; BHATTACHARYA, A.; PRAMANIK, P.; GOSWAMI, A. High throughput electron transfer from carbon dots to chloroplast: A rationale of enhanced photosynthesis. **Nanoscale**, vol. 6, no. 7, p. 3647–3655, 2014. <https://doi.org/10.1039/c3nr06079a>.

CHEN, J.; DOU, R.; YANG, Z.; WANG, X.; MAO, C.; GAO, X.; WANG, L. The effect and fate of water-soluble carbon nanodots in maize (*Zea mays* L.). **Nanotoxicology**, vol. 10, no. 6, p. 818–828, 2016. <https://doi.org/10.3109/17435390.2015.1133864>.

CHHIPA, H. Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. **Environmental Chemistry Letters**, vol. 15, no. 1, p. 15–22, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0600-4>.

CHIEN, S. H.; GUERTAL, B. e GEARHART, M. M. A review on the oxidation of granular fertilizers containing elemental sulfur with or without ammonium sulfate in soils. **Malaysian Journal of Soil Science**, 21, 1–18, 2017.

CHOUDHARY, R. C.; KUMARASWAMY, R. V.; KUMARI, S.; SHARMA, S. S.; PAL, A.; RALIYA, R.; BISWAS, P.; SAHARAN, V. Cu-chitosan nanoparticle boost defense responses and plant growth in maize (*Zea mays* L.). **Scientific Reports**, vol. 7, no. 1, p. 1–11, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08571-0>.

CLIMATE-DATA. ORG. Clima Viçosa. 2024. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/vicosa-25021/>. Acesso em: 02 dez. 2025.

COSTAS-MORA, I.; ROMERO, V.; LAVILLA, I.; BENDICHO, C. In situ building of a nanoprobe based on fluorescent carbon dots for methylmercury detection. **Analytical Chemistry**, vol. 86, no. 9, p. 4536–4543, 2014. <https://doi.org/10.1021/ac500517h>.

CUNHA, H. d. S. **Nanocompostos De Carbono Na Estabilização De Misturas De Fertilizantes Minerais**. 2022. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. 29p.

D'ANGELIS DO E. S. BARBOSA, C.; CORRÊA, J. R.; MEDEIROS, G. A.; BARRETO, G.; MAGALHÃES, K. G.; DE OLIVEIRA, A. L.; SPENCER, J.; RODRIGUES, M. O.; NETO, B. A. D. Carbon Dots (C-dots) from Cow Manure with Impressive Subcellular Selectivity Tuned by Simple Chemical Modification. **Chemistry - A European Journal**, vol. 21, no. 13, p. 5055 5060, 2015. <https://doi.org/10.1002/chem.201406330>.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. DE; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 6, p. 1862 1866, 2007.

DIMKPA, C. O.; SINGH, U.; BINDRABAN, P. S.; ELMER, W. H.; GARDEA-TORRESDEY, J. L.; WHITE, J. C. Zinc oxide nanoparticles alleviate drought-induced alterations in sorghum performance, nutrient acquisition, and grain fortification. **Science of the Total Environment**, vol. 688, p. 926–934, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.392>.

DIMKPA, C. O.; BINDRABAN, P. S. Nanofertilizers: New Products for the Industry? **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.66, n.26, p. 6462 – 6476, 2018.

DU JARDIN, Patrick. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. **Scientia Horticulturae**, vol. 196, p. 3–14, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>.

DU JARDIN, P. The science of biostimulants - a bibliographic analysis. Contract 30 CE0455515/00-96, ad hoc Study on bio-stimulants products., p. 37, 2012. Disponível em: https://www.ec.europa.eu/.../final_report_bio_2012_en.pdf. Acesso em: 14 jun. 2026.

DUHAN, J. S.; KUMAR, R.; KUMAR, N.; KAUR, P.; NEHRA, K.; DUHAN, S. Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. **Biotechnology Reports**, vol. 15, p. 11–23, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.03.002>.

ELEMIKE, E. E. et al. The role of nanotechnology in the fortification of plant nutrients and improvement of crop production. **Applied Sciences**, v. 9, n. 3, p.2-32, 2019.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.

EUROPEAN UNION. Regulation (EU) 2019/943 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the internal market for electricity. 2019. **Official Journal of the European Union**. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1699523636645&uri=CELEX:32019R0943>. Acesso em: 14 jun. 2026.

FIALHO, J. d. M. **Influência de Nanofertilizantes nas Variáveis Fisiológicas do Milho (*Zea mays*)**. Trabalho de Conclusão de Curso. 2025. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. 35p.

GREEN, J.M.; BEESTMAN, G. B. Recently patented and commercialized formulation and adjuvant technology. 2007. **Crop Prot** 26:320–32.

HAVLIN, J. M. et al. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**, 7. ed. New Jersey: Pearson Prentice, 2005. chap. 7. 528p.

HOE, P. T.; MAI, N. C.; LIEN, L. Q.; BAN, N. K.; VAN MINH, C.; CHAU, N. H.; BUU, N. Q.; HIEN, D. T.; VAN, N. T.; HIEN, L. T. T.; LINH, T. M. Germination responses of soybean seeds under Fe, ZnO, Cu and Co nanoparticle treatments. **International Journal of Agriculture and Biology**, vol. 20, no. 7, p. 1562–1568, 2018. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0670>.

HONG, G.; DIAO, S.; ANTARIS, A. L.; DAI, H. Carbon Nanomaterials for Biological Imaging and Nanomedicinal Therapy. **Chemical Reviews**, vol. 115, no. 19, p. 10816–10906, 2015. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00008>.

HOROWITZ, N., e MEURER, E. J. Relação entre atributos de solos e oxidação de enxofre elementar em quarenta e duas amostras de solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31, 455–63, 2007. https://doi.org/10.1590/S0100_06832007000300005.

HU, P.; AN, J.; FAULKNER, M. M.; WU, H.; LI, Z.; TIAN, X.; GIRALDO, J. P. Nanoparticle Charge and Size Control Foliar Delivery Efficiency to Plant Cells and Organelles. **ACS Nano**, vol. 14, no. 7, p. 7970–7986, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b09178>.

HUANG, J. J.; ZHONG, Z. F.; RONG, M. Z.; ZHOU, X.; CHEN, X. D.; ZHANG, M. Q. An easy approach of preparing strongly luminescent carbon dots and their polymer based composites for enhancing solar cell efficiency. **Carbon**, vol. 70, p. 190–198, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.12.092>.

HOU, Y.; LU, Q.; DENG, J.; LI, H.; ZHANG, Y. One-pot electrochemical synthesis of functionalized fluorescent carbon dots and their selective sensing for mercury ion. **Analytica Chimica Acta**, vol. 866, p. 69–74, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.01.039>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDS. Nanotechnologies - Plain Journal language explanation of selected terms from the ISO/IEC 80004 series" ISO/TR 18401:2017. 2017. of **Chromatography** A. Available at: <https://www.iso.org/standard/62384.html> <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:18401:ed-1:v1:en>. Acessado em: 15 dezembro de 2025.

JOSHI, A.; SHARMA, L.; KAUR, S.; DHARAMVIR, K.; NAYYAR, H.; VERMA, G. Plant Nanobionic Effect of Multi-walled Carbon Nanotubes on Growth, Anatomy, Yield and Grain Composition of Rice. **BioNanoScience**, vol. 10, no. 2, p. 430–445, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12668-020-00725-1>.

JUÁREZ-MALDONADO, A.; ORTEGA-ORTÍZ, H.; MORALES-DÍAZ, A. B.; GONZÁLEZ-MORALES, S.; MORELOS-MORENO, Á.; CABRERA-DE LA FUENTE, M.; SANDOVAL-RANGEL, A.; CADENAS-PLIEGO, G.; BENAVIDES-MENDOZA, A. Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. **International Journal of Molecular Sciences**, vol. 20, no. 1, p. 162, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijms20010162>.

KAUFFMAN, G. L.; KNEIVEL, D. P.; WATSCHKE, T. L. Effects of a biostimulant on the heat tolerance associated with photosynthetic capacity, membrane thermostability, and

polyphenol production of perennial ryegrass. **Crop Science**, vol. 47, no. 1, p. 261–267, 2007. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.03.0171>.

KERTESZ, M. A.; FELLOWNS, E.; SCHMALENBERGER, A. Rhizobacteria and plant sulfur supply. **Advances in Applied Microbiology**, New York, v. 62, p. 235-268, 2007.

KHAN, I.; SAEED, K.; KHAN, I. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. **Arabian Journal of Chemistry**, vol. 12, no. 7, p. 908–931, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>.

KANWAR, M. K.; SUN, S.; CHU, X.; ZHOU, J. Impacts of Metal and Metal Oxide Nanoparticles on Plant Growth and Productivity. **Nanomaterials and Plant Potential**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 379–392. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05569-1_15.

KOLE, C.; KOLE, P.; RANDUNU, K. M.; CHOUDHARY, P.; PODILA, R.; KE, P. C.; RAO, A. M.; MARCUS, R. K. Nanobiotechnology can boost crop production and quality: First evidence from increased plant biomass, fruit yield and phytomedicine content in bitter melon (*Momordica charantia*). **BMC Biotechnology**, vol. 13, p. 1–10, 2013. <https://doi.org/10.1186/1472-6750-13-37>.

KOU, E.; YAO, Y.; YANG, X.; SONG, S.; LI, W.; KANG, Y.; QU, S.; DONG, R.; PAN, X.; LI, D.; ZHANG, H.; LEI, B. Regulation Mechanisms of Carbon Dots in the Development of Lettuce and Tomato. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, vol. 9, no. 2, p. 944–953, 2021. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08308>.

KUHLGERT, S. et al. Multispeq beta: a tool for large-scale plant phenotyping connected to the open photosynq network. Royal Society open science, **The Royal Society**, v. 3, n. 10, p. 160592, 2016.

LAHIANI, M. H.; DERVISHI, E.; CHEN, J.; NIMA, Z.; GAUME, A.; BIRIS, A. S.; KHODAKOVSKAYA, M. V. Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops. **ACS Applied Materials and Interfaces**, vol. 5, no. 16, p. 7965–7973, 2013. <https://doi.org/10.1021/am402052x>.

LEMOS, L. B. Milho: a utilização de produtos com liberação controlada e fertilizantes organominerais tem aumentado significantivamente, reduzindo perdas e melhorando o solo. Anuário brasileiro de tecnologia em nutrição vegetal. São Paulo: **Cromosete**, p. 43–44, 2017

LI, D. et al. Far-Red Carbon Dots as Efficient Light-Harvesting Agents for Enhanced Photosynthesis. **ACS Applied Materials and Interfaces**, vol. 12, no. 18, p. 21009–21019, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b21576>.

LI, Haitao; KANG, Z.; LIU, Y.; LEE, S. T. Carbon nanodots: Synthesis, properties and applications. **Journal of Materials Chemistry**, vol. 22, no. 46, p. 24230–24253, 2012. <https://doi.org/10.1039/c2jm34690g>.

LI, Hao; HUANG, J.; LIU, Y.; LU, F.; ZHONG, J.; WANG, Y.; LI, S.; LIFSHITZ, Y.; LEE, S. T.; KANG, Z. Enhanced RuBisCO activity and promoted dicotyledons growth with degradable carbon dots. **Nano Research**, vol. 12, no. 7, p. 1585–1593, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12274-019-2397-5>.

LI, Hao; HUANG, J.; LU, F.; LIU, Y.; SONG, Y.; SUN, Y.; ZHONG, J.; HUANG, H.; WANG, Y.; LI, S.; LIFSHITZ, Y.; LEE, S. T.; KANG, Z. Impacts of carbon dots on rice plants: Boosting the growth and improving the disease resistance. **ACS Applied Bio Materials**, vol. 1, no. 3, p. 663–672, 2018. <https://doi.org/10.1021/acsabm.8b00345>.

LI, W.; WU, S.; ZHANG, H.; ZHANG, X.; ZHUANG, J.; HU, C.; LIU, Y.; LEI, B.; MA, L.; WANG, X. Enhanced Biological Photosynthetic Efficiency Using Light-Harvesting Engineering with Dual-Emissive Carbon Dots. **Advanced Functional Materials**, vol. 28, no. 44, 2018. <https://doi.org/10.1002/adfm.201804004>.

LI, W.; ZHENG, Y.; ZHANG, H.; LIU, Z.; SU, W.; CHEN, S.; LIU, Y.; ZHUANG, J.; LEI, B. Phytotoxicity, Uptake, and Translocation of Fluorescent Carbon Dots in Mung Bean Plants. **ACS Applied Materials and Interfaces**, vol. 8, no. 31, p. 19939–19945, 2016. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b07268>.

LI, Y.; XU, X.; WU, Y.; ZHUANG, J.; ZHANG, X.; ZHANG, H.; LEI, B.; HU, C.; LIU, Y. A review on the effects of carbon dots in plant systems. **Materials Chemistry Frontiers**, vol. 4, no. 2, p. 437–448, 2020a. <https://doi.org/10.1039/c9qm00614a>.

LI, Y.; GAO, J.; XU, X.; WU, Y.; ZHUANG, J.; ZHANG, X.; ZHANG, H.; LEI, B.; ZHENG, M.; LIU, Y.; HU, C. Carbon Dots as a Protective Agent Alleviating Abiotic Stress on Rice (*Oryza sativa* L.) through Promoting Nutrition Assimilation and the Defense System. **ACS Applied Materials and Interfaces**, vol. 12, no. 30, p. 33575–33585, 2020b. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c11724>.

LI, Y.; PAN, X.; XU, X.; WU, Y.; ZHUANG, J.; ZHANG, X.; ZHANG, H.; LEI, B.; HU, C.; LIU, Y. Carbon dots as light converter for plant photosynthesis: Augmenting light coverage and quantum yield effect. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 410, p. 124534, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124534>.

LIU, C.; ZHANG, P.; TIAN, F.; LI, W.; LI, F.; LIU, W. One-step synthesis of surface passivated carbon nanodots by microwave assisted pyrolysis for enhanced multicolor photoluminescence and bioimaging. **Journal of Materials Chemistry**, vol. 21, no. 35, p. 13163–13167, 2011. <https://doi.org/10.1039/c1jm12744f>.

LU, J.; YEO, P. S. E.; GAN, C. K.; WU, P.; LOH, K. P. Transforming C 60 molecules into graphene quantum dots. **Nature Nanotechnology**, vol. 6, no. 4, p. 247–252, 2011. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.30>.

LV, Z.; JIANG, R.; CHEN, J.; CHEN, W. Nanoparticle-mediated gene transformation strategies for plant genetic engineering. **Plant Journal**, vol. 104, no. 4, p. 880–891, 2020. <https://doi.org/10.1111/tpj.14973>.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas - Princípios e Aplicações** (2ª Edição). Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

MASWADA, H. F.; MAZROU, Y. S. A.; ELZAAWELY, A. A.; ALAM-ELDEIN, S. M. Nanomaterials. Effective tools for field and horticultural crops to cope with drought stress: A

review. **Spanish Journal of Agricultural Research**, vol. 18, no. 2, p. 1–15, 2020. <https://doi.org/10.5424/sjar/2020182-16181>.

MOTA, C. S.; CANO, M. A. O. Respostas fisiológicas de plantas jovens de macaúba a condições de seca cíclica. **Brazilian Journal of Forest Research/Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, 2016.

MOUSTAKA, J.; MOUSTAKAS, M. Photoprotective mechanism of the non-target organism *arabidopsis thaliana* to paraquat exposure. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, Elsevier, v. 111, p. 1–6, 2014.

MUKHERJEE, A.; MAJUMDAR, S.; SERVIN, A. D.; PAGANO, L.; DHANKHER, O. P.; WHITE, J. C. Carbon nanomaterials in agriculture: A critical review. **Frontiers in Plant Science**, vol. 7, no. FEB2016, p. 172, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00172>.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do Solo. In: ABREU, C.A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G. XI - Micronutrientes. Viçosa, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. p. 645-736. 2007b.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do Solo. In: ALCARDE, J. C. XII - Fertilizantes. Viçosa, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. p. 737-768b. 2007.

OLIVEIRA, M.W., SILVA, V.S. G.; SOARES, A. R. S.; OLIVEIRA, T. B. A.; SILVA, D. S.; MACHADO, P. A. S. Nutrition status nutriente accumulation and field of corn grown in Yellow Re Oxisol. **Revista GEAMA**, v.6., n.2., p.43-50. 2020.

R Core Team (2022) **R: A Language and Environment for Statistical Computing**.

RAFFI, M. M.; HUSEN, A. Impact of Fabricated Nanoparticles on the Rhizospheric Microorganisms and Soil Environment. **Nanomaterials and Plant Potential**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 529–552. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05569-1_21.

RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

REZENDE, A.V.; SILVA, G.M.; GUTIÉRREZ, A.M.; SIMÃO, E.P.; GUIMARÃES, J.M.; MOREIRA, S.G.; BORGHI, E. Indicadores de demanda de macro e micronutrientes por híbridos modernos de milho. **Circular técnica 220**. EMBRAPA, Sete Lagoas - MG. 9 p. 2016.

SAHU, S.; BEHERA, B.; MAITI, T. K.; MOHAPATRA, S. Simple one-step synthesis of highly luminescent carbon dots from orange juice: Application as excellent bio-imaging agents. **Chemical Communications**, vol. 48, no. 70, p. 8835–8837, 2012. <https://doi.org/10.1039/c2cc33796g>.

SAI, L.; LIU, S.; QIAN, X.; YU, Y.; XU, X. Nontoxic fluorescent carbon nanodot serving as a light conversion material in plant for UV light utilization. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, vol. 169, p. 422–428, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.05.047>.

SALEEM, I. et al. Potassium ferrite nanoparticles on DAP to formulate slow release fertilizer with auxiliary nutrients. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 215, 1 jun. 2021.

SCÁRDUA, G. D. **Dissolução de Fertilizantes com Zinco e Boro em Colunas de Substrato Inerte**. Trabalho de Conclusão de Curso. 2024. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. 25p.

SCHNEIDER, J.; RECKMEIER, C. J.; XIONG, Y.; VON SECKENDORFF, M.; SUSHA, A. S.; KASAK, P.; ROGACH, A. L. Molecular fluorescence in citric acid-based carbon dots. **Journal of Physical Chemistry C**, vol. 121, no. 3, p. 2014–2022, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b12519>.

SHARMA, R.; DEWANJEE, S.; KOLE, C. Utilization of nanoparticles for plant protection. **Plant Nanotechnology: Principles and Practices**. [S. l.: s. n.], 2016. p. 305–327. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42154-4_12.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6ª. ed. [S.l.]: Artmed Editora, 2017. 201-273 p.

TAN, T. L.; ZULKIFLI, N. A.; ZAMAN, A. S. K.; JUSOH, M. binti; YAAPAR, M. N.; RASHID, S. A. Impact of photoluminescent carbon quantum dots on photosynthesis efficiency of rice and corn crops. **Plant Physiology and Biochemistry**, vol. 162, p. 737–751, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.031>.

TENESSE VALLEY AUTHORITY. Procedures for determining physical properties of fertilizers. **Special Repor** n. 5.444, Alabama, USA, 1970.

TORNEY, F. et al. Mesoporous silica nanoparticles deliver DNA and chemicals into plants. **Nat Nanotechnol**, 2007. 2:295–300.

TRIPATHI, S.; SARKAR, S. Influence of water soluble carbon dots on the growth of wheat plant. **Applied Nanoscience (Switzerland)**, vol. 5, no. 5, p. 609–616, 2015. <https://doi.org/10.1007/s13204-014-0355-9>.

TSUJI, K. Microencapsulation of pesticides and their improved handling safety. **J. Microencapsul**, 2001, 18:137–147.

VERMA, S. K.; DAS, A. K.; GANTAIT, S.; KUMAR, V.; GUREL, E. Applications of carbon nanomaterials in the plant system: A perspective view on the pros and cons. **Science of the Total Environment**, vol. 667, p. 485–499, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.409>.

WANG, H.; ZHANG, M.; SONG, Y.; LI, H.; HUANG, H.; SHAO, M.; LIU, Y.; KANG, Z. Carbon dots promote the growth and photosynthesis of mung bean sprouts. **Carbon**, vol. 136, p. 94–102, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.051>.

WANG, Q.; HUANG, X.; LONG, Y.; WANG, X.; ZHANG, H.; ZHU, R.; LIANG, L.; TENG, P.; ZHENG, H. Hollow luminescent carbon dots for drug delivery. **Carbon**, vol. 59, p. 192–199, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.03.009>.

WANG, X.; CAO, L.; LU, F.; MEZIANI, M. J.; LI, H.; QI, G.; ZHOU, B.; HARRUFF, B. A.; KERMARREC, F.; SUN, Y. P. Photoinduced electron transfers with carbon dots. **Chemical Communications**, no. 25, p. 3774–3776, 2009. <https://doi.org/10.1039/b906252a>.

WU, L.; CAI, X.; NELSON, K.; XING, W.; XIA, J.; ZHANG, R.; STACY, A. J.; LUDERER, M.; LANZA, G. M.; WANG, L. V.; SHEN, B.; PAN, D. A green synthesis of carbon nanoparticles from honey and their use in real-time photoacoustic imaging. **Nano Research**, vol. 6, no. 5, p. 312–325, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12274-013-0308-8>.

XIONG, D. et al. Spad-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. **Scientific reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 5, n. 1, p. 13389, 2015.

XIONG, J. L.; LI, J.; WANG, H. C.; ZHANG, C. L.; NAEEM, M. S. Fullerol improves seed germination, biomass accumulation, photosynthesis and antioxidant system in Brassica napus L. under water stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, vol. 129, p. 130–140, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.05.026>.

XU, Xiaokai; MAO, X.; ZHUANG, J.; LEI, B.; LI, Y.; LI, W.; ZHANG, X.; HU, C.; FANG, Y.; LIU, Y. PVA-Coated Fluorescent Carbon Dot Nanocapsules as an Optical Amplifier for Enhanced Photosynthesis of Lettuce. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, vol. 8, no. 9, p. 3938–3949, 2020. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b07706>.

XU, Xiaoyou; RAY, R.; GU, Y.; PLOEHN, H. J.; GEARHEART, L.; RAKER, K.; SCRIVENS, W. A. Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. **Journal of the American Chemical Society**, vol. 126, no. 40, p. 12736–12737, 2004. <https://doi.org/10.1021/ja040082h>.

YAN, X.; XU, Q.; LI, D.; WANG, J.; HAN, R. Carbon dots inhibit root growth by disrupting auxin biosynthesis and transport in Arabidopsis. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, vol. 216, p. 112168, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112168>.

YANG, D.; LI, J.; CHENG, Y.; WAN, F.; JIA, R.; WANG, Y. Compound repair effect of carbon dots and Fe²⁺ on iron deficiency in Cucumis melon L. **Plant Physiology and Biochemistry**, vol. 142, p. 137–142, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.06.035>.

ZAHEDI, S. M.; KARIMI, M.; TEIXEIRA DA SILVA, J. A. The use of nanotechnology to increase quality and yield of fruit crops. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, vol. 100, no. 1, p. 25–31, 2020. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10004>.

ZHANG, M.; HU, L.; WANG, H.; SONG, Y.; LIU, Y.; LI, H.; SHAO, M.; HUANG, H.; KANG, Z. One-step hydrothermal synthesis of chiral carbon dots and their effects on mung bean plant growth. **Nanoscale**, vol. 10, no. 26, p. 12734–12742, 2018a. <https://doi.org/10.1039/c8nr01644e>.

ZHANG, M.; WANG, H.; SONG, Y.; HUANG, H.; SHAO, M.; LIU, Y.; LI, H.; KANG, Z. Pristine carbon dots boost the growth of *Chlorella vulgaris* by enhancing photosynthesis. **ACS Applied Bio Materials**, vol. 1, no. 3, p. 894–902, 2018b. <https://doi.org/10.1021/acsbam.8b00319>.

ZHAO, L.; LU, L.; WANG, A.; ZHANG, H.; HUANG, M.; WU, H.; XING, B.; WANG, Z.; JI, R. Nano-Biotechnology in Agriculture: Use of Nanomaterials to Promote Plant Growth and Stress Tolerance. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, vol. 68, no. 7, p. 1935–1947, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06615>.

ZHENG, X. T.; ANANTHANARAYANAN, A.; LUO, K. Q.; CHEN, P. **Glowing graphene quantum dots and carbon dots: Properties, syntheses, and biological applications**. *Small*, vol. 11, no. 14, p. 1620–1636, 2015. <https://doi.org/10.1002/smll.201402648>.

ZHENG, Y.; XIE, G.; ZHANG, X.; CHEN, Z.; CAI, Y.; YU, W.; LIU, H.; SHAN, J.; LI, R.; LIU, Y.; LEI, B. Bioimaging Application and Growth-Promoting Behavior of Carbon Dots from Pollen on Hydroponically Cultivated Rome Lettuce. **ACS Omega**, vol. 2, no. 7, p. 3958–3965, 2017a. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b00657>.

ZHENG, Y.; ZHANG, H.; LI, W.; LIU, Y.; ZHANG, X.; LIU, H.; LEI, B. Pollen derived blue fluorescent carbon dots for bioimaging and monitoring of nitrogen, phosphorus and potassium

uptake in: *Brassica parachinensis* L. **RSC Advances**, vol. 7, no. 53, p. 33459–33465, 2017b. <https://doi.org/10.1039/c7ra04644h>.

ZULFIQAR, F. et al. Nanofertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations. **Plant Sci.** 2019, 289, 110270. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110270>.

7. ANEXOS



Figura 5. Placa compactadora usada na produção de misturas granuladas NPK.

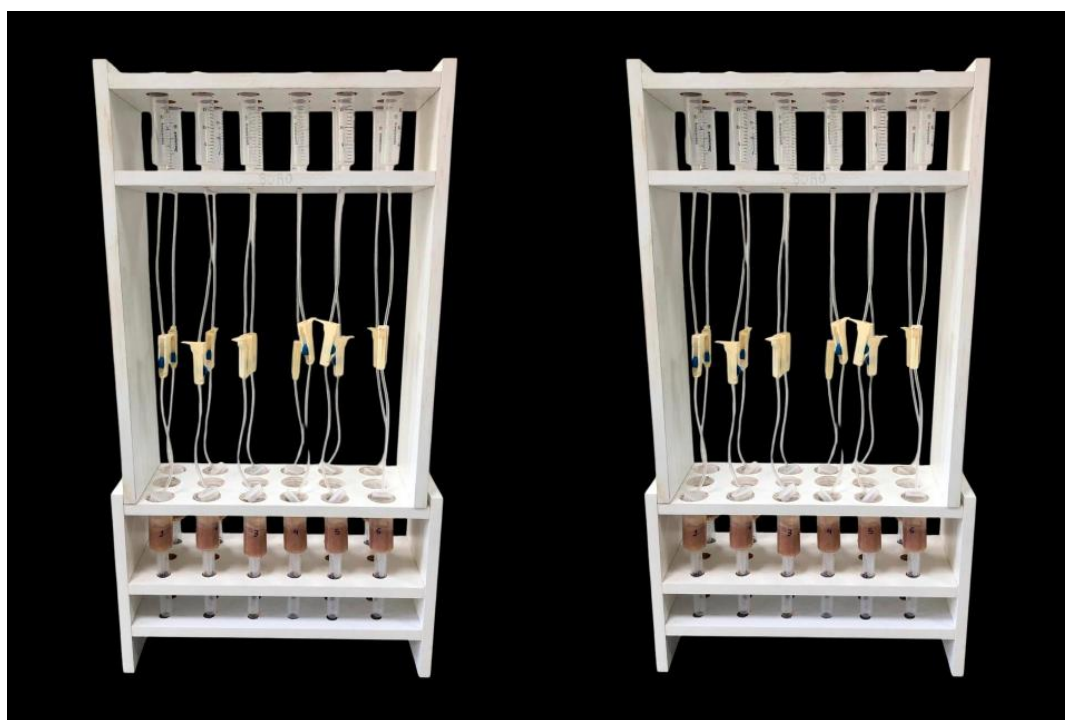


Figura 6. Sistema de avaliação da dissolução de fertilizantes em colunas de substrato inerte.



Figura 7. Área já dessecada e início da demarcação das linhas de plantio.



Figura 8. Abertura dos sulcos e distribuição dos fertilizantes.



Figura 9. Sistema de irrigação por aspersão.



Figura 10. Tratamento controle em comparação ao NPKS_nano.



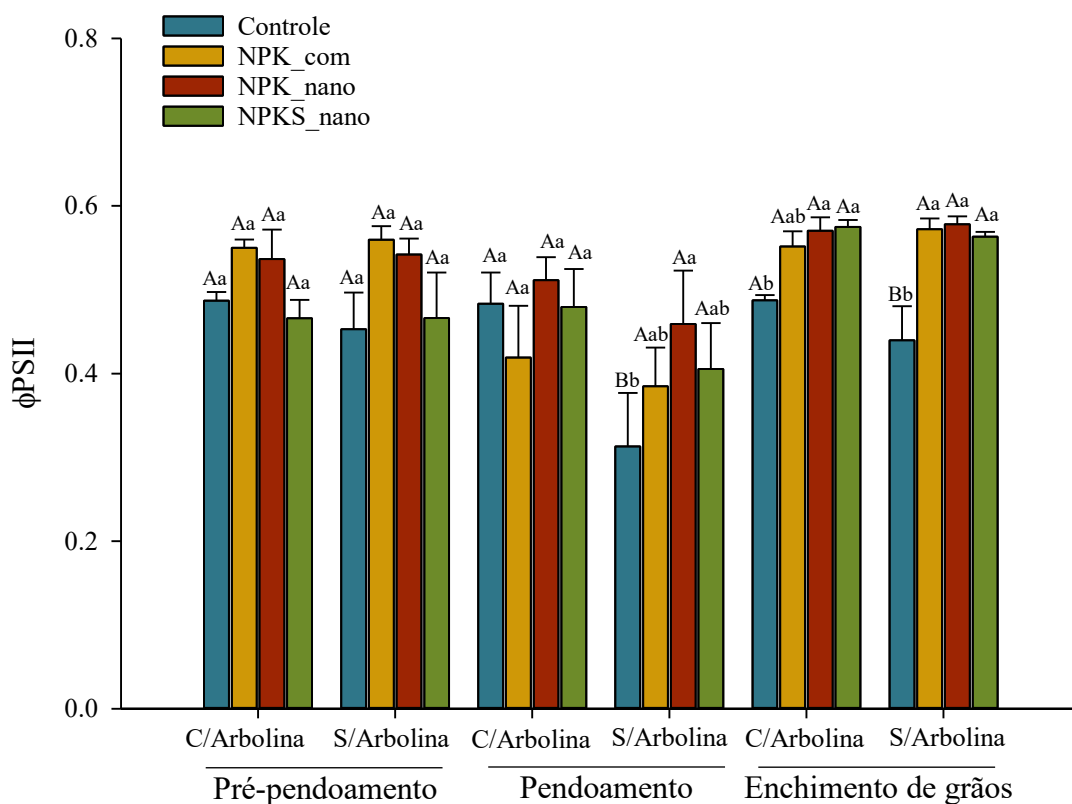
Figura 11. Milho em pré-pendoamento e início das avaliações com o MultispeQ.



Figura 12. Altura de plantas em final de ciclo.

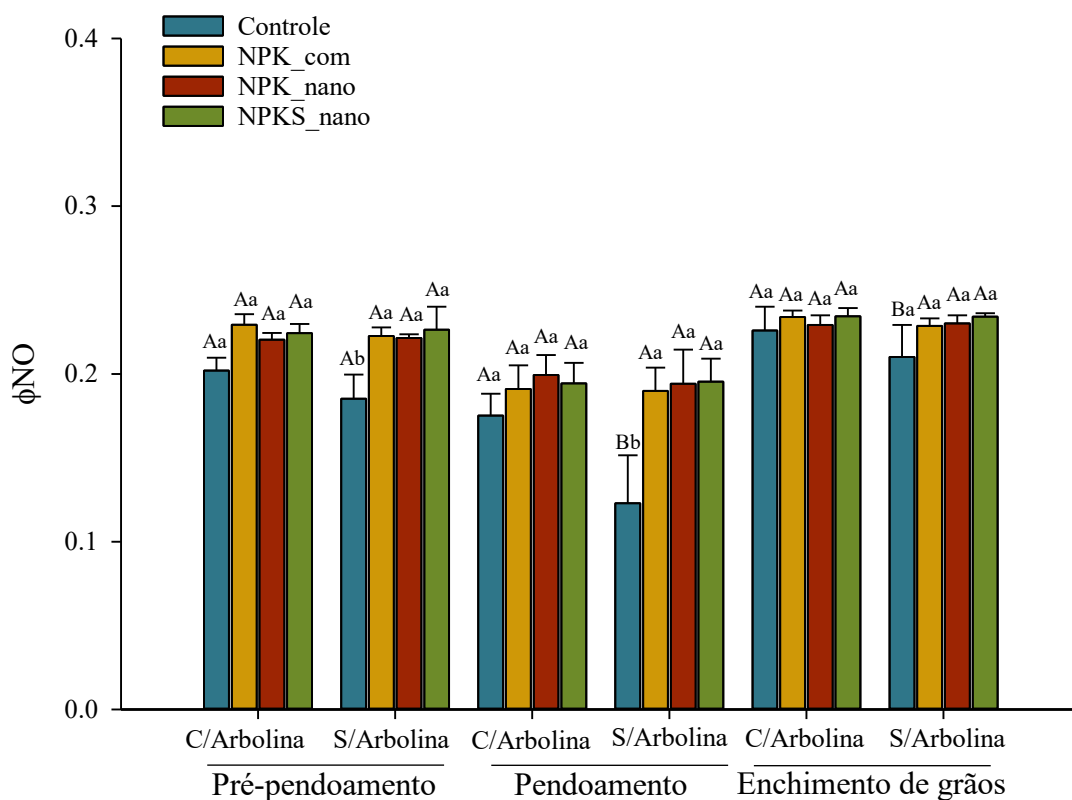


Figura 13. Colheita das três linhas centrais a 30 cm de altura.



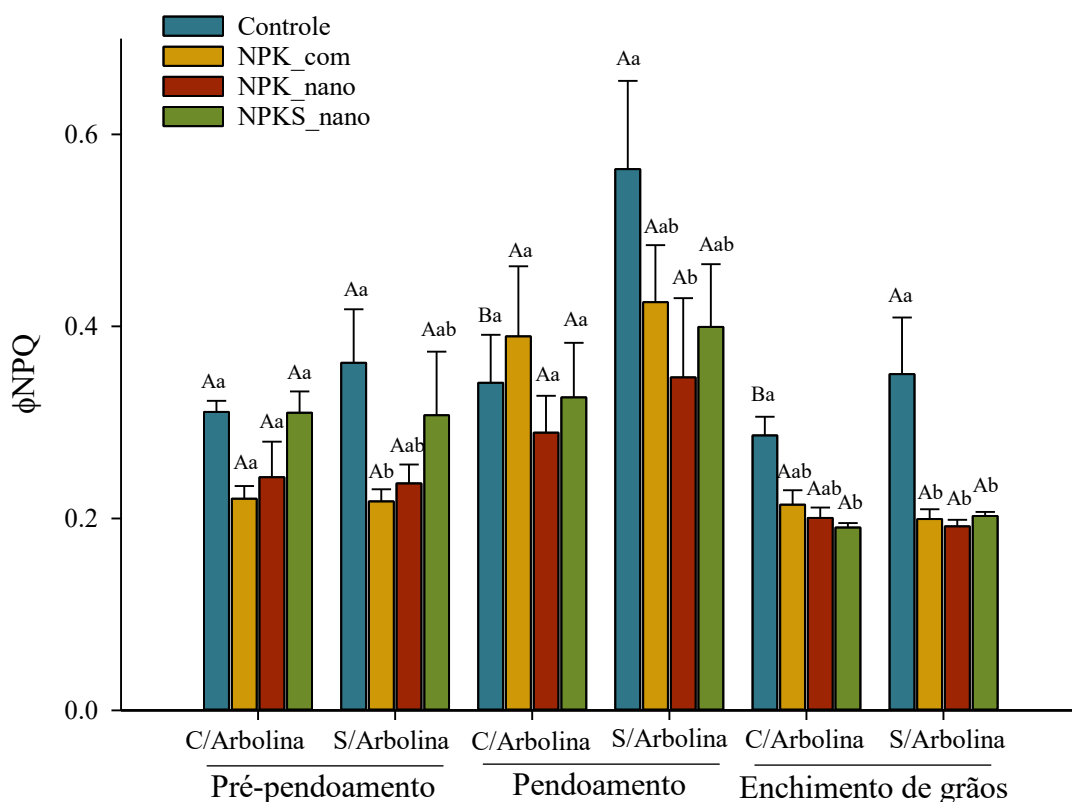
Letras maiúsculas comparam os tratamentos com (C/A) e sem (S/A) adição de Arbolina® via foliar, dentro do estágio fenológico, e letras minúsculas comparam os fertilizantes, dentro do estágio fenológico, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

Figura 14. Rendimento quântico efetivo do PSII - Φ_{II} , em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).



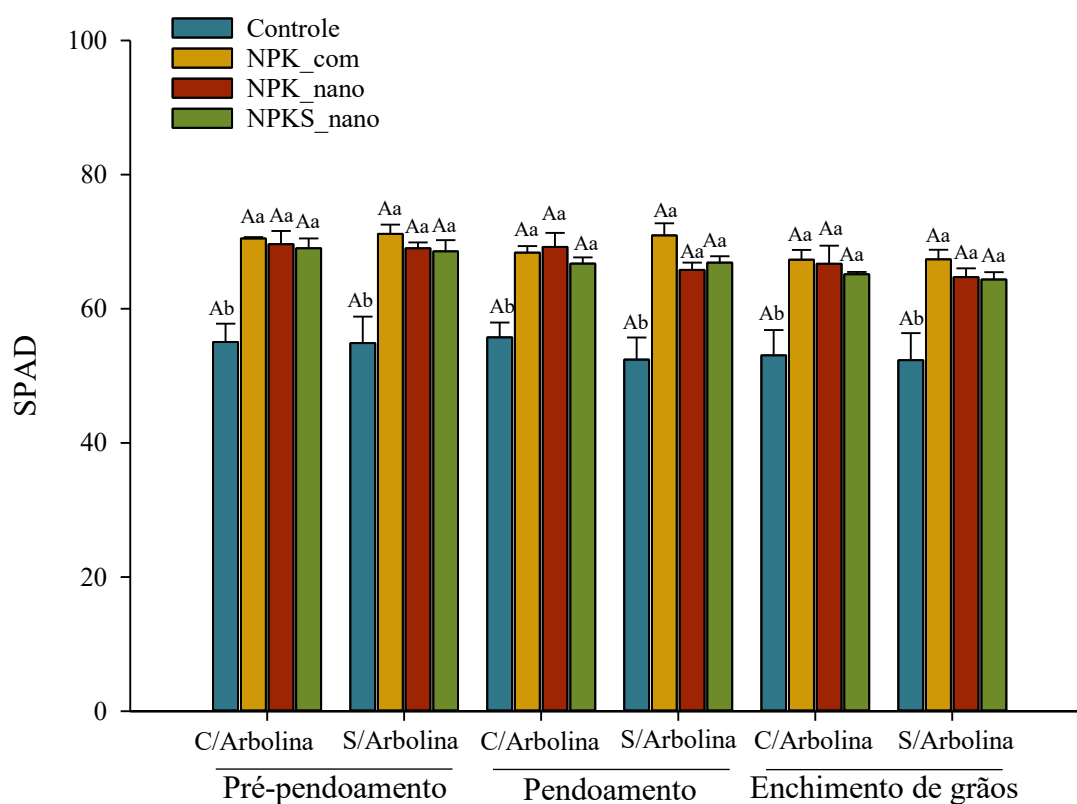
Letras maiúsculas comparam os tratamentos com (C/A) e sem (S/A) adição de Arbolina® via foliar, dentro do estágio fenológico, e letras minúsculas comparam os fertilizantes, dentro do estágio fenológico, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

Figura 15. Rendimento quântico de dissipação não regulada de energia não fotoquímica do PSII, ou dissipação na forma de fluorescência – Φ_{NO} , em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).



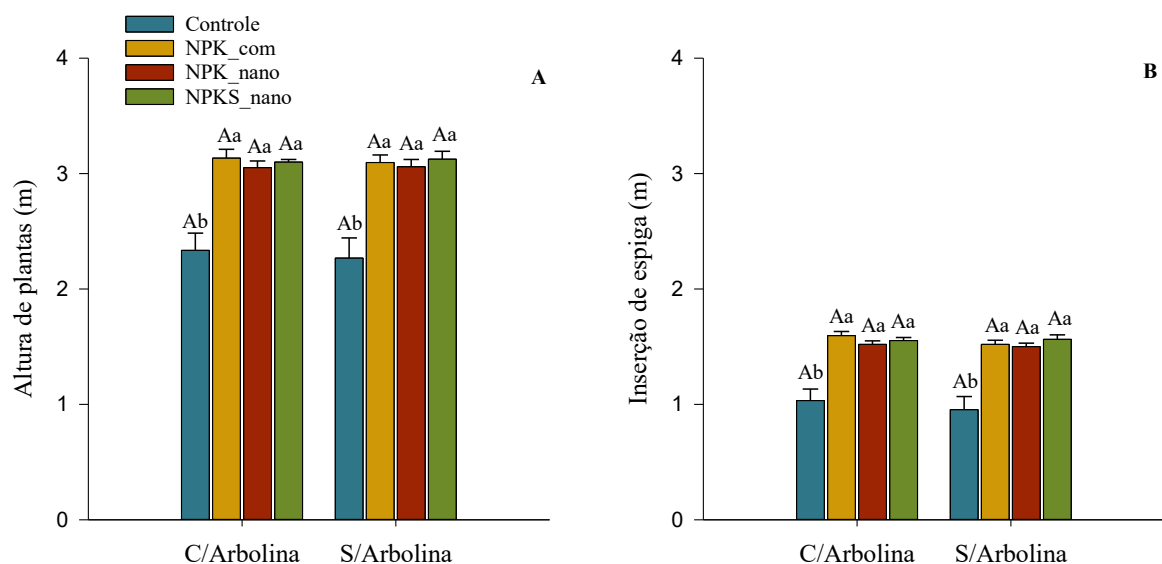
Letras maiúsculas comparam os tratamentos com (C/A) e sem (S/A) adição de Arbolina® via foliar, dentro do estágio fenológico, e letras minúsculas comparam os fertilizantes, dentro do estágio fenológico, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

Figura 16. Rendimento quântico da dissipação regulada de energia não fotoquímica do PSII, ou dissipação na forma de calor - Φ_{NPQ} , em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).



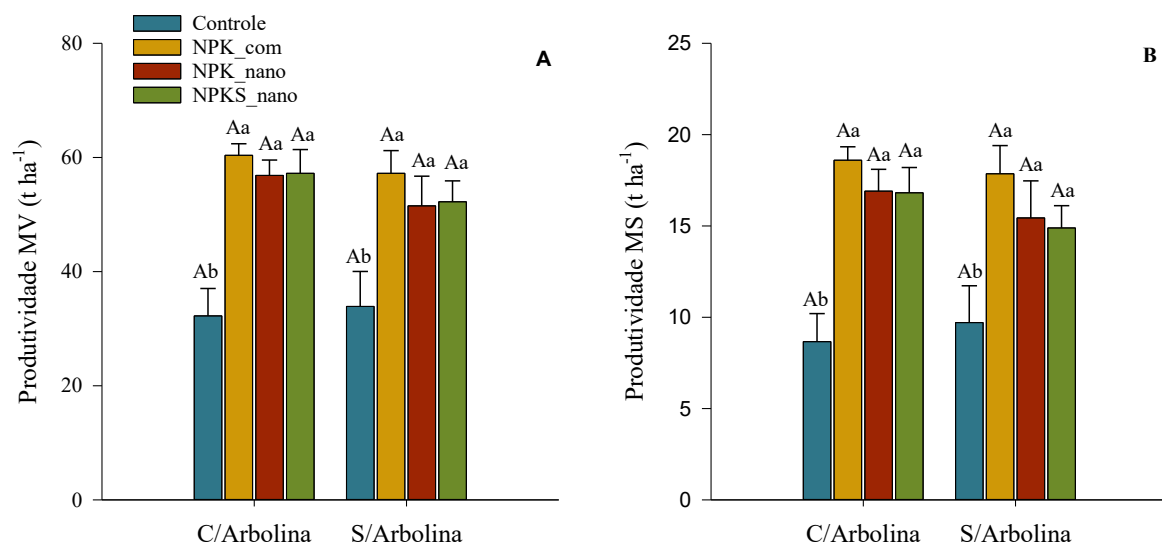
Letras maiúsculas comparam os tratamentos com (C/A) e sem (S/A) adição de Arbolina® via foliar, dentro do estágio fenológico, e letras minúsculas comparam os fertilizantes, dentro do estágio fenológico, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

Figura 17. Soil Plant Analysis Development - SPAD, em função do estágio fenológico das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).



Letras maiúsculas comparam os tratamentos com (C/A) e sem (S/A) adição de Arbolina® via foliar e letras minúsculas comparam os fertilizantes, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

Figura 18. Altura de plantas (A) e altura de inserção de espiga (B) das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).



Letras maiúsculas comparam os tratamentos com (C/A) e sem (S/A) adição de Arbolina® via foliar e letras minúsculas comparam os fertilizantes, ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

Figura 19. Produtividade de matéria verde (A) e produtividade de matéria seca (B) das plantas de milho cultivadas sem aplicação de fertilizante de plantio (CONTROLE), com aplicação de NPK comercial 08-28-16 (NPK_com), com aplicação de NPK 12-30-20 com Nano_C2 (NPK_nano) e com aplicação de NPKS 11-28-17+5,6S com Nano_C2 (NPKS_nano), com e sem aplicação de bioestimulante (Arbolina®).