

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**VITÓRIA PRATES PETRUCCI**

**MARCHA DE ABSORÇÃO DE NUTRIENTES DE MILHETO GRANÍFERO  
CULTIVADO EM HIDROPONIA**

Ilha solteira  
2025

**VITÓRIA PRATES PETRUCCI**

**MARCHA DE ABSORÇÃO DE NUTRIENTES DE MILHETO  
GRANÍFERO CULTIVADO EM HIDROPONIA**

Trabalho de Conclusão de Curso,  
apresentada à Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira –  
UNESP como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Bióloga.

Prof. Dr. Marcelo Carvalho  
Minhoto Teixeira Filho  
**Orientador**

Ilha solteira  
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Petrucci, Vitória Prates.

P498m      Marcha de absorção de nutrientes do milho granífero em cultivo hidropônico / Vitória Prates Petrucci. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025  
39 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Ciências Biológicas) -  
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,  
2025

Orientador: Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho

Inclui bibliografia

1. Agricultura. 2. Milho. 3. Nutrientes. 4. Sistema hidropônico.

## ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Marcha de absorção de nutrientes de milho  
granífero cultivado em hidroponia**

Vitória Prates Petrucci

## REGULAMENTO SOBRE A AVALIAÇÃO:

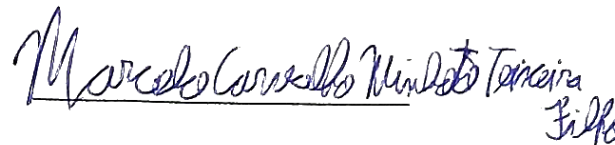
Artigo 25º - § 2º A apresentação pública do trabalho de TCC deverá ser de no mínimo 20 (vinte) minutos e máxima de 40 (quarenta) minutos. Após um intervalo de 5 (cinco) minutos, haverá a arguição do Trabalho pelos examinadores. O tempo de arguição, será de até 15 (quinze) minutos para cada examinador, e até 15 (quinze) minutos o tempo para a resposta da aluna a cada examinador ou no caso de se optar pelo diálogo o tempo conjunto entre examinador e acadêmico(a) será de no máximo 30 (trinta) minutos.

Artigo 24º – No julgamento do TCC, a banca examinadora deverá avaliar a apresentação oral, escrita e a defesa do trabalho durante a arguição. O conceito final será APROVADO ou REPROVADO.

## COMISSÃO EXAMINADORA

1ª EXAMINADOR (Orientador-Presidente)

Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho



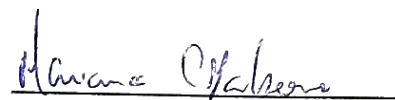
2ª EXAMINADOR

Profa. Dra. Thaís Soto Boni



3ª EXAMINADOR

Me. Mariana Cristina Barbosa



## CONCEITO

 Aprovado Reprovado

Ilha Solteira - SP, 16 de junho de 2025.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus, por abençoar meu caminho, permitir correr atrás dos meus sonhos, por me conceder saúde, coragem e sabedoria para não desistir.

Agradeço imensamente à minha mãe, Valquiria e minha avó, Tereza por lutarem incansavelmente para me dar todo suporte necessário e à minha irmã, Beatriz por me incentivar durante toda trajetória da faculdade, sem vocês eu não estaria aqui!

Agradeço ao meu orientador e professor Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho, pela oportunidade de fazer parte da equipe, por confiar no meu potencial, e por todo ensinamento e orientação durante a realização da pesquisa.

Agradeço a todos meus amigos que estiveram presentes nesses anos, agradeço por compartilharem momentos incríveis e por tornarem a faculdade mais leve.

Aos meus amigos de turma, em especial Jordana Alvares, Ana Beatriz Borges e Lídia Maria por me ajudarem e darem tanto apoio em momentos difíceis, sua amizade e apoio são inestimáveis e carregarei por toda minha vida.

Agradeço aos meus colegas do grupo de pesquisa, por toda ajuda durante a condução e avaliação da pesquisa e ao laboratório de Nutrição de Plantas.

Agradeço à minha república, Só Fadinhas e a todas as meninas que por lá passaram, vocês marcaram minha vida e são uma parte importante da minha história acadêmica e crescimento pessoal.

Agradeço à UNESP-FEIS “Universidade Estadual Paulista do Campus de Ilha Solteira” por todo o suporte, estrutura e oportunidades permitindo meu crescimento pessoal e profissional, me tornando assim uma profissional responsável e competente.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais (FEPAF).

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu mais sincero muito obrigada.

“Os sonhos determinam onde queremos chegar. A disciplina e a ação determinam o caminho.”  
— Cury, Augusto

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar a marcha de absorção dos nutrientes do milheto granífero (*Pennisetum glaucum*) em meio hidropônico com intuito de compreender a dinâmica de absorção de nutrientes ao longo de todo o seu ciclo de vida. A partir de experimentos conduzidos em um ambiente protegido, em uma estufa hidropônica com sombreamento de 30%, pertencente à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP/FEIS) foram feitas avaliações que buscaram registrar seu nível de crescimento e desenvolvimento até seus níveis nutricionais analisados em laboratório. O método do cultivo hidropônico vem crescendo assim como a utilização do milheto granífero para alimentação animal visto que é uma cultura que beneficia o lado econômico e nutricional. Além disso, o cultivo hidropônico, ainda que mais comum em hortaliças, surge como alternativa complementar para pequenos produtores e agricultura urbana, promovendo sustentabilidade e uso racional dos recursos naturais. A marcha de absorção de nutrientes revela que os macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) desempenham papel crucial para o desenvolvimento e produtividade da cultura, exigindo monitoramento e ajustes no manejo da adubação para evitar deficiências ou excessos. No final das análises foram observados alguns acúmulos crescentes de macronutrientes até o florescimento e redistribuição posterior dos fotossimilados para os órgãos reprodutivos, os principais macronutrientes acumulados foram potássio (K) e nitrogênio (N) sendo eles os mais exigidos pela planta, seguindo a ordem de  $K > N > P > Ca > Mg > S$ , com esses dados foi possível estabelecer os dias que serão necessários uma adubação mais regrada para manter a cultura em desenvolvimento. A maior necessidade de adubação esta entre 10 e 20 dias antes do florescimento, sendo estes nutrientes de extrema importância na regulação osmótica, crescimento celular e na ativação enzimática. Em relação aos micronutrientes, foi notado uma alta necessidade de ferro principalmente durante a fase vegetativa, sendo a sequência de acúmulo  $Fe > Mn > Zn > B > Cu$ . A maior utilização foi do ferro que pode ser justificável por conta de sua função na fotossíntese, respiração celular e síntese de clorofila. Em suma, agregar um método de cultivo a uma cultura de baixo custo quando comparado a outras trazendo uma interessante integração entre conhecimentos técnicos, análises nutricionais, práticas agronômicas sustentáveis e meio de produção beneficia tanto produtores quanto consumidores.

**Palavras-chave:** Agricultura. Milheto. Nutrientes. Sistema Hidropônico.

## ABSTRACT

This study aimed to analyze the nutrient uptake curve of grain pearl millet (*Pennisetum glaucum*) grown in a hydroponic system in order to understand the dynamics of nutrient absorption throughout its entire life cycle. The experiment was conducted in a protected environment, in a hydroponic greenhouse with 30% shading, located at the School of Engineering of Ilha Solteira (UNESP/FEIS). Evaluations were performed to assess the plant's growth and development, as well as its nutritional levels, which were later analyzed in the laboratory. Hydroponic cultivation has been expanding, as has the use of grain pearl millet for animal feed, due to its economic and nutritional advantages. Although hydroponics is more commonly applied to vegetables, it presents a complementary alternative for small-scale producers and urban agriculture, promoting sustainability and the rational use of natural resources. The nutrient uptake curve revealed that the macronutrients nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) play a crucial role in the development and productivity of the crop, requiring monitoring and adjustments in fertilization management to avoid deficiencies or excesses. The analyses showed progressive accumulation of macronutrients until the flowering stage, followed by the redistribution of photo-assimilates to the reproductive organs. Potassium and nitrogen were the most accumulated macronutrients, in the order of  $K > N > P > Ca > Mg > S$ , indicating their higher demand by the plant. Based on these findings, it was possible to determine the period requiring more precise fertilization, which occurs between 10 and 20 days before flowering. These nutrients are essential for osmotic regulation, cell growth, and enzymatic activation. Regarding micronutrients, there was a high demand for iron, especially during the vegetative phase, with the following accumulation sequence:  $Fe > Mn > Zn > B > Cu$ . Iron was the most absorbed micronutrient, likely due to its fundamental role in photosynthesis, cellular respiration, and chlorophyll synthesis. In summary, combining a controlled cultivation method with a low-cost crop offers an interesting integration of technical knowledge, nutritional analysis, sustainable agronomic practices, and a production model that benefits both producers and consumers

**Keywords:** Agriculture. Pearl millet. Nutrient. Hydroponic systems

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
2.1 Milheto .....	12
2.2 Marcha de Absorção de Nutrientes .....	13
2.3 Sistema Hidropônico .....	15
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1 localização e caracterização da área.....	17
3.2 Preparo das mudas e condução do experimento .....	17
3.3 Procedimentos de coleta e avaliações realizadas .....	19
3.4 Análises estatísticas.....	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	20
REFERÊNCIAS .....	38

## 1. INTRODUÇÃO

O milheto granífero (*Pennisetum glaucum* L.), conhecido no Brasil principalmente como planta de cobertura do solo, tem despertado crescente interesse como cultura produtora de grãos, embora sua utilização com essa finalidade ainda seja pouco explorada em âmbito nacional (Pereira Filho et al., 2003; Garcia e Duarte, 2009). Tradicionalmente cultivado para ciclagem de nutrientes e formação de palhada no sistema de plantio direto, o milheto apresenta características agrônômicas vantajosas, como rusticidade, rápida taxa de crescimento e resistência a condições adversas de clima e solo, o que favorece sua adaptação a diversas regiões agrícolas do país (Silva et al., 2014; Gonçalves et al., 2010).

Nos últimos anos, pesquisas vêm demonstrando o potencial do milheto como alternativa econômica ao milho na alimentação animal, devido ao seu custo de produção aproximadamente 40% inferior e à sua eficiência nutricional na formulação de rações, sem perdas significativas em desempenho zootécnico (Garcia e Duarte, 2010; Bergamaschine et al., 2011). No entanto, apesar de seus benefícios agrônômicos e econômicos, a cultura do milheto granífero ainda carece de dados específicos sobre exigências nutricionais e práticas de manejo adequadas, o que limita seu uso em larga escala como cultivo comercial de grãos (Cantarella et al., 2022).

Essa lacuna de conhecimento técnico evidencia uma problemática central: como desenvolver recomendações agrônômicas adequadas para o milheto granífero, considerando suas particularidades fisiológicas e nutricionais, sem depender de parâmetros estabelecidos para outras culturas, como o milho? Tal dependência pode comprometer a eficiência da adubação, elevando os custos de produção ou provocando deficiências nutricionais e queda no rendimento da cultura.

Para que se estabeleçam práticas de manejo nutricional mais precisas, é fundamental compreender a dinâmica de absorção de nutrientes pelas plantas ao longo de seu ciclo de desenvolvimento. Nesse contexto, o estudo da marcha de absorção de nutrientes se mostra uma ferramenta essencial, pois permite identificar os períodos de maior exigência nutricional, os padrões de acúmulo de matéria seca e a quantidade de nutrientes exportada pelos grãos ou pela parte aérea da planta (Bertino et al., 2022; Dominico et al., 2020). Tal conhecimento possibilita a formulação de estratégias de adubação mais sustentáveis, evitando tanto a aplicação excessiva quanto a insuficiente de nutrientes, promovendo o equilíbrio no sistema solo-planta e favorecendo a

sustentabilidade produtiva (Raij et al., 2001; Malavolta, 2006).

Adicionalmente, o uso de sistemas de cultivo controlados, como a hidroponia, oferece condições ideais para isolar variáveis ambientais e acompanhar de forma mais precisa a absorção de nutrientes pelas plantas. A hidroponia, além de permitir o cultivo durante todo o ano, proporciona maior eficiência no uso de água e nutrientes, alto grau de uniformidade entre plantas, e menor uso de defensivos agrícolas, configurando-se como uma tecnologia moderna com potencial para ampliar o conhecimento científico na área de nutrição vegetal (Alberoni, 1998; Oliveira, 2012; Furlani et al., 1999).

Apesar da expansão do cultivo hidropônico em hortaliças e outras culturas de ciclo curto, sua aplicação no estudo de gramíneas graníferas ainda é incipiente, o que levanta a seguinte questão: quais são as exigências nutricionais específicas do milho granífero ao longo de seu desenvolvimento, quando cultivado sob condições controladas de hidroponia? A resposta a essa pergunta pode abrir novos caminhos para o manejo nutricional da cultura, inclusive em sistemas de produção convencionais.

Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar a marcha de absorção de nutrientes do milho granífero cultivado em sistema hidropônico, visando compreender as exigências nutricionais da cultura, identificar os períodos críticos de absorção e quantificar a exportação de nutrientes. Espera-se, com isso, gerar subsídios para a formulação de estratégias de adubação mais eficientes e específicas, contribuindo para o avanço técnico-científico sobre a cultura do milho e sua consolidação como alternativa produtiva viável no Brasil.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Milheto

O milheto (*Pennisetum glaucum* L.), também conhecido como Pearl Millet, é atualmente o sexto grão mais produzido no mundo, ficando atrás apenas do arroz, trigo, milho, cevada e sorgo. Sua relevância vem crescendo não apenas como planta de cobertura e forrageira, mas também como importante fonte de segurança alimentar, especialmente em países com déficit hídrico severo, como os localizados na Ásia e na África (SATYAVATHI et al., 2021; RANI et al., 2022; FAO, 2023). Essa cultura ganhou reconhecimento global em 2023, quando a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) declarou o Ano Internacional do Milheto, com o objetivo de promover sua produção sustentável e resiliente, sua importância nutricional e sua capacidade de enfrentar os desafios das mudanças climáticas (ONU/FAO, 2023).

O grão de milheto apresenta alto valor nutricional, sendo comparável ou superior a cereais amplamente consumidos como milho e trigo. Possui alto teor de proteínas (10–12%) com perfil balanceado de aminoácidos essenciais, além de ser fonte relevante de fibras alimentares, vitamina A, antioxidantes e minerais como ferro, zinco, fósforo e magnésio (SINGH; RAGHUVANSHI, 2012; DIAS-MARTINS et al., 2018; KRISHNAN; MEERA, 2018; SHOBANA et al., 2013). No entanto, esses teores podem variar consideravelmente conforme o genótipo utilizado, as condições edafoclimáticas, o manejo nutricional e os métodos de processamento (DIAS-MARTINS et al., 2018; UPADHYAYA et al., 2021).

Além de seu valor nutricional, o milheto é considerado uma cultura estratégica para o desenvolvimento sustentável e para a resiliência dos sistemas agroalimentares. Sua rusticidade permite cultivo em regiões de baixa disponibilidade hídrica (até <350 mm/ano), solos pobres e ambientes com estresses térmicos, onde culturas tradicionais como milho e trigo apresentam baixa produtividade (EMBRAPA MILHO E SORGO, 2016; SRIVASTAVA et al., 2022; SHRESTHA et al., 2023; VIEIRA JUNIOR et al., 2023). Sua eficiência no uso da água e dos nutrientes, aliada a um sistema radicular profundo e agressivo, destaca seu potencial como alternativa para o milho na safrinha, especialmente em regiões com riscos climáticos crescentes (APARECIDO et al., 2020; YADAV et al., 2021; BURGARELLA et al., 2018).

Apesar de todo esse potencial, no Brasil a cultura do milheto granífero ainda é subexplorada. A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), em seus boletins mensais de acompanhamento de safra, não inclui dados oficiais sobre a área plantada, produtividade ou produção nacional de grãos de milheto (CONAB, 2024). Da mesma

forma, as recomendações oficiais de adubação para a cultura são inexistentes no Estado de São Paulo e bastante limitadas no restante do país, sendo muitas vezes substituídas pelas diretrizes voltadas ao milho, o que desconsidera as especificidades nutricionais do milheto (CANTARELLA et al., 2022; RAIJ et al., 2001).

Esse cenário evidencia a necessidade urgente de mais estudos que aprofundem a compreensão do comportamento fisiológico, da marcha de absorção de nutrientes e do manejo nutricional ideal para o milheto granífero. A lacuna de informações técnico-científicas sobre o cultivo do milheto como cultura alimentar representa um obstáculo à sua expansão e uso estratégico em sistemas agrícolas sustentáveis, sobretudo em regiões vulneráveis às mudanças climáticas.

## **2.2 Marcha de Absorção de Nutrientes**

A marcha de absorção de nutrientes é um estudo fundamental para compreender as exigências nutricionais das plantas ao longo de seu ciclo de desenvolvimento. No caso do milheto granífero (*Pennisetum glaucum*), essa análise é essencial para otimizar a adubação, especialmente em sistemas hidropônicos, onde a disponibilidade de nutrientes é controlada artificialmente e há maior precisão na reposição de macro e micronutrientes (PRADO, 2022).

Segundo Epstein e Bloom (2006), o conceito de essencialidade dos nutrientes reforça que cada elemento desempenha funções específicas e insubstituíveis na planta, sendo sua ausência ou carência prejudicial ao desenvolvimento vegetal. Com base nessa premissa, estudar a dinâmica de absorção ao longo dos estágios fenológicos permite identificar os períodos de maior exigência e ajustar o manejo nutricional de forma estratégica (PEREIRA e OLIVEIRA, 2024).

A aplicação balanceada de fertilizantes é uma das estratégias mais eficazes para melhorar a produtividade e a qualidade do milheto. Divya et al. (2017) e Yadav et al. (2021) destacam que a correta nutrição mineral tem impacto direto no crescimento vegetativo, na formação de grãos e na tolerância a estresses abióticos, especialmente em solos de baixa fertilidade ou sob regime de sequeiro. Entre os nutrientes mais relevantes para a cultura, destacam-se o nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), cujas funções são essenciais para o metabolismo vegetal, como formação de proteínas, ATP e regulação osmótica.

O conceito de marcha de absorção, conforme proposto por Bull (1993), permite acompanhar a quantidade de nutrientes absorvidos pelas plantas em diferentes fases,

desde a emergência até a colheita, sendo possível, assim, identificar o momento ideal para adubações de cobertura ou fertirrigação. Esse modelo favorece uma adubação mais racional e está alinhado ao conceito de Manejo 4C (fonte correta, dose correta, época correta e local correto), promovendo maior eficiência agrônômica e ambiental (Casarin e Stipp, 2013).

Em sistemas hidropônicos, a marcha de absorção ganha ainda mais importância, uma vez que a solução nutritiva pode ser ajustada com precisão para atender às exigências nutricionais específicas de cada fase do desenvolvimento. Pesquisa de Kumar et al. (2020) demonstrou que híbridos de milho cultivados em hidroponia apresentaram máxima absorção de nitrogênio e potássio entre os estágios V6 e R1, o que justifica adubações com maior concentração nesses períodos. Já em estudo com diferentes substratos orgânicos, Costa et al. (2023) observaram variações no acúmulo de fósforo e magnésio na matéria seca da parte aérea do milho, influenciadas pela textura do meio de cultivo e pela condutividade elétrica da solução.

Além disso, fatores ambientais como estresse hídrico, intensidade luminosa e temperatura afetam significativamente a eficiência de absorção e uso dos nutrientes. Srivastava et al. (2022) demonstraram que o milho, quando submetido a déficit hídrico, aumenta a eficiência de uso do fósforo por meio da exsudação de ácidos orgânicos, um mecanismo adaptativo importante em ambientes áridos. Essa característica faz do milho uma cultura promissora para regiões com escassez hídrica, como o semiárido brasileiro (Aparecido et al., 2020).

Outros estudos também reforçam o potencial agrônômico do milho em diferentes condições edafoclimáticas. Vieira Júnior et al. (2023), ao avaliarem o acúmulo de nutrientes em milho granífero em latossolos de baixa fertilidade, observaram que o pico de absorção de nitrogênio ocorreu entre os 30 e 45 dias após a semeadura, o que indica a necessidade de dividir a adubação nitrogenada em pelo menos duas aplicações.

A compreensão detalhada da marcha de absorção de nutrientes no milho granífero, especialmente em sistemas hidropônicos ou em cultivos de sequeiro em áreas marginais, é essencial para o desenvolvimento de estratégias de manejo nutricional que maximizem o rendimento e a qualidade da cultura. A adoção dessa abordagem contribui para a sustentabilidade e eficiência da produção agrícola, reduzindo desperdícios e impactos ambientais associados à adubação excessiva ou mal posicionada.

## 2.3 Sistema Hidropônico

Tradicionalmente, a agricultura está associada ao cultivo direto no solo, onde as plantas obtêm os nutrientes essenciais para seu desenvolvimento. No entanto, como explicam Epstein e Bloom (2006), o solo atua primariamente como um meio físico de sustentação e como reservatório de nutrientes e água. Isso significa que, desde que esses elementos possam ser fornecidos de outra forma, é possível que o crescimento das plantas ocorra independentemente do solo. Esse princípio fundamenta os sistemas de cultivo hidropônico, nos quais os nutrientes minerais são diluídos em solução aquosa e oferecidos diretamente às raízes das plantas.

A hidroponia é definida como uma técnica de cultivo sem solo, na qual a solução nutritiva contém macro e micronutrientes em concentrações controladas, o que proporciona maior eficiência no uso dos insumos e crescimento mais rápido das plantas (Resh, 2021; Prado, 2022). Além disso, permite o controle preciso das condições do meio de cultivo — como pH, condutividade elétrica (CE), temperatura da solução, oxigenação e composição nutricional — fatores que impactam diretamente na absorção dos nutrientes e na fisiologia vegetal.

Segundo Kannan et al. (2022), a hidroponia permite a economia de até 90% de água quando comparada ao cultivo tradicional, por operar em sistemas fechados ou semiabertos que promovem o reuso da água e da solução nutritiva. Essa economia hídrica é particularmente importante em regiões áridas e semiáridas, ou em locais com restrições ambientais para o uso intensivo da terra. Adicionalmente, como destacam Dubey e Nain (2020), a hidroponia contribui para a redução do uso de fertilizantes e defensivos químicos, dado o menor risco de lixiviação e o ambiente mais controlado, minimizando perdas e contaminações ambientais.

Estudos demonstram o potencial da hidroponia para diversas culturas, desde hortaliças folhosas até cereais alternativos, como o milho (*Pennisetum glaucum*). Vieira Júnior et al. (2023) observaram que o milho cultivado em sistema hidropônico apresentou maior eficiência na absorção de nitrogênio e fósforo nas fases iniciais do desenvolvimento, em comparação com plantas cultivadas no solo. Esses nutrientes são fundamentais para a formação de tecidos vegetais, fotossíntese e síntese de proteínas. A marcha de absorção do milho em hidroponia revelou picos de exigência nutricional específicos, o que possibilita o ajuste dinâmico da solução nutritiva, maximizando o aproveitamento dos nutrientes (Mendonça et al., 2022).

Além disso, o cultivo hidropônico tem sido amplamente pesquisado como solução para os desafios da agricultura urbana e da segurança alimentar. Segundo

pesquisa de Barbosa et al. (2015), sistemas verticais hidropônicos implantados em centros urbanos podem produzir até 11 vezes mais alimentos por metro quadrado em comparação com métodos convencionais, utilizando menos recursos naturais e com menor impacto ambiental. Essa característica se mostra estratégica diante da crescente urbanização global e da necessidade de produção local de alimentos.

Contudo, a hidroponia exige cuidados técnicos e infraestrutura específica. É fundamental garantir a oxigenação adequada da solução nutritiva para evitar hipóxia radicular, que compromete o metabolismo das raízes. Também é necessário monitorar constantemente o pH (ideal entre 5,5 e 6,5 para a maioria das culturas) e a condutividade elétrica, que reflete a concentração de sais na solução. De acordo com Kitaya et al. (2008), variações bruscas na CE podem provocar estresse osmótico e toxidez por sais, resultando em queda de produtividade.

Outro fator importante diz respeito ao risco de contaminação microbiológica da água. Como apontam Keswani et al. (2019), a recirculação da solução pode facilitar a disseminação de fitopatógenos. Por isso, técnicas como o uso de luz ultravioleta (UV), ozônio ou biofilmes microbianos benéficos estão sendo testadas para mitigar esse risco e promover um ambiente mais seguro para o desenvolvimento das plantas.

Apesar do maior custo inicial para instalação das estruturas (estufas, sistemas de irrigação e controle automatizado), estudos de viabilidade econômica, como o de Silva et al. (2023), mostram que o retorno sobre o investimento na hidroponia pode ocorrer em médio prazo, especialmente quando associada a técnicas de agricultura de precisão e automação. A integração com sistemas de Internet das Coisas (IoT), sensores e inteligência artificial permite o monitoramento em tempo real das condições do cultivo, elevando a eficiência e a produtividade agrícola.

Ademais, experiências internacionais como a de Goto et al. (2016), no Japão, demonstraram que a combinação entre LED agrícola e hidroponia em ambientes controlados aumentou em até 30% a taxa de crescimento de hortaliças como alface e espinafre, com ciclos mais curtos e melhor qualidade pós-colheita.

Em suma, a hidroponia representa uma solução tecnológica promissora e sustentável frente aos desafios da agricultura moderna, sendo especialmente vantajosa em sistemas controlados, regiões de escassez hídrica e na produção intensiva de alimentos com alto valor agregado. Para o cultivo do milho, esse sistema oferece condições ideais para o monitoramento da marcha de absorção de nutrientes, contribuindo para estratégias de manejo nutricional mais precisas, eficientes e produtivas.

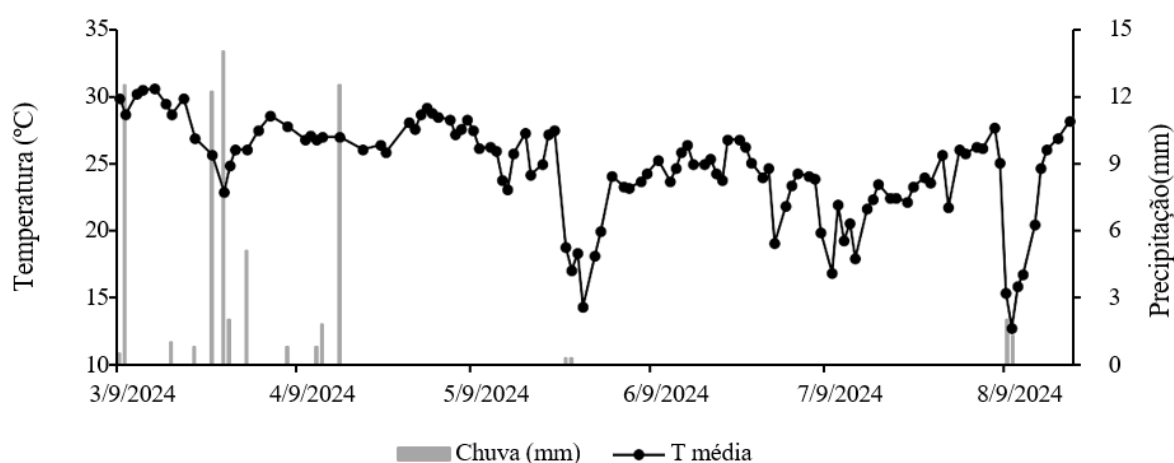
### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 localização e caracterização da área

O experimento foi conduzido em ambiente protegido, especificamente em uma estufa hidropônica com sombreamento de 30%, pertencente à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP/FEIS). A unidade está situada no município de Ilha Solteira, estado de São Paulo, localizado às coordenadas geográficas 20°25'07" de latitude sul e 51°20'31" de longitude oeste, com altitude aproximada de 376 metros acima do nível do mar.

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima predominante na região é do tipo Aw — tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. A média anual de precipitação é de aproximadamente 1.370 mm, com temperatura média em torno de 23 °C e umidade relativa do ar variando entre 70 e 80%.

Durante a condução do experimento, foram monitoradas diariamente as condições meteorológicas, especialmente a temperatura média e a precipitação pluvial. Esses dados foram registrados para análise e estão apresentados graficamente na Figura 1, a fim de possibilitar a melhor compreensão do ambiente de cultivo e suas possíveis influências sobre o desempenho das plantas avaliadas.



**Figura 1.** Precipitação pluvial e temperatura média registradas pela estação meteorológica durante os experimentos, no período de março de 2024 a agosto de 2024, em Ilha Solteira - SP.

#### 3.2 Preparo das mudas e condução do experimento

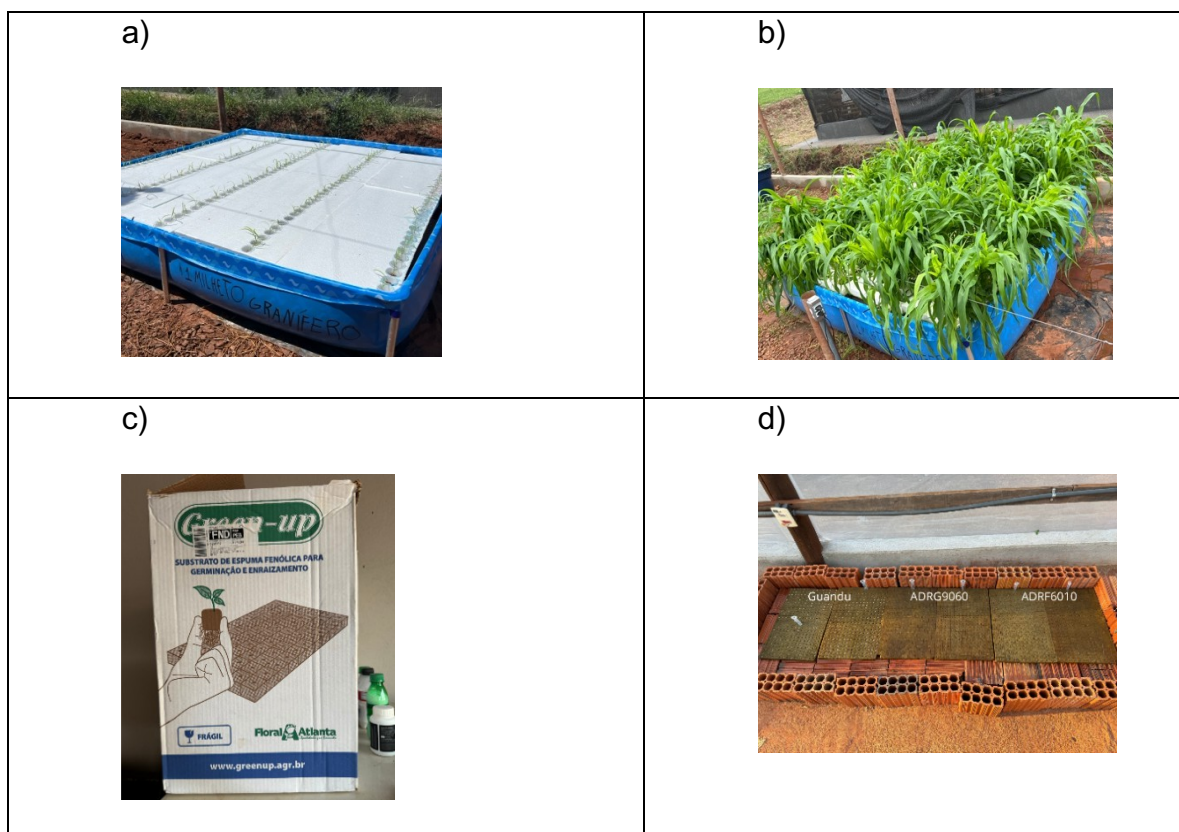
As sementes de milho granífero utilizadas no experimento foram adquiridas da empresa Atto Sementes. A semeadura foi realizada em blocos de espuma fenólica

no dia 27 de fevereiro de 2024, com o objetivo de obtenção das mudas para posterior cultivo. As plântulas foram mantidas sob condições controladas até alcançarem o estágio adequado para o transplante.

No dia 08 de março de 2024, ou seja, 10 dias após a sementeira, as mudas foram transplantadas para o sistema hidropônico. O experimento de marcha de absorção foi conduzido utilizando o sistema floating, instalado em tanques de vinil com capacidade volumétrica de 1.185 litros (Figura 2 - a, b, c e d).

Nesse sistema, as plantas foram alocadas em vasos floating com orifício central, permitindo o livre desenvolvimento do sistema radicular. Esses vasos foram fixados em placas de isopor com 3 cm de espessura, dispostas sobre a superfície da solução nutritiva. Para garantir adequada oxigenação das raízes, foram utilizadas bombas de aquário com vazão de  $1.500 \text{ L h}^{-1}$ .

A solução nutritiva empregada foi uma adaptação da formulação proposta por Hoagland e Arnon (1950), amplamente reconhecida para cultivos hidropônicos. A condutividade elétrica (CE) da solução foi monitorada e ajustada ao longo do ciclo de cultivo, apresentando valor inicial de  $900 \mu\text{S cm}^{-1}$ , sendo posteriormente elevada até  $3.200 \mu\text{S cm}^{-1}$ , conforme a exigência nutricional dos híbridos de milho utilizados.



**Figura 2.** a) Piscina com 1.185 L no dia de implantação do experimento; b) Piscina com milho granífero em 28 de março de 2024; c) Espuma fenólica utilizada para sementeira; d) Culturas semeadas em espuma fenólica no dia 27 de fevereiro de 2024.

### 3.3 Procedimentos de coleta e avaliações realizadas

As coletas para avaliação da marcha de absorção de nutrientes foram realizadas a cada cinco dias, até que as plantas atingissem o estágio de maturidade fisiológica, considerado como o ponto ideal de colheita. Ao todo, foram realizadas 17 épocas de amostragem, avaliando-se três plantas por intervalo amostral.

As variáveis analisadas para o milho granífero compreenderam os seguintes parâmetros:

a) Índice de clorofila foliar (ICF):

A determinação do ICF foi efetuada utilizando um clorofilômetro digital (modelo ClorofiLOG CFL1030, da empresa Falker), sendo as medições realizadas na folha diagnose e no período da manhã, nos dias previamente estabelecidos para coleta. Este índice fornece uma estimativa indireta do teor de clorofila, correlacionado com o estado nutricional da planta, sobretudo em relação ao nitrogênio.

b) Altura da planta e componentes da produção:

A altura das plantas foi mensurada do colo (base da planta) até o ápice, desconsiderando-se o sistema radicular. Na última coleta, também foram avaliados o comprimento e o diâmetro da panícula, a massa de grãos por panícula e a massa de 100 grãos, utilizando-se balança de precisão. Os valores de massa de grãos foram corrigidos para uma umidade padrão de 13% (base úmida).

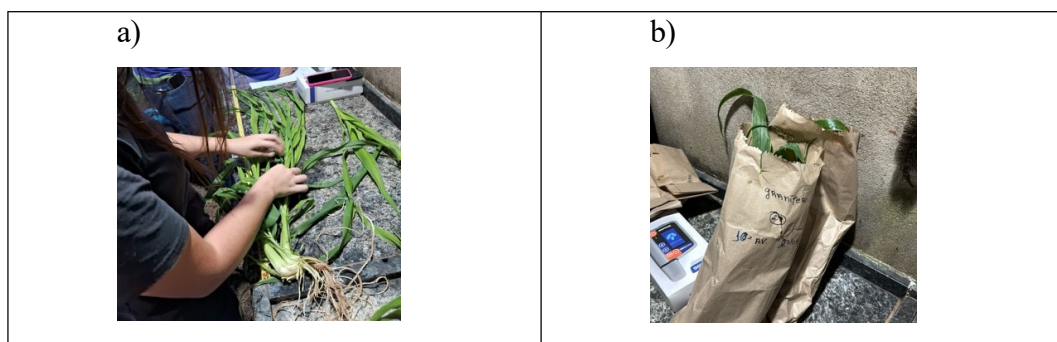
c) Produção de massa fresca e seca da parte aérea, raízes e grãos:

Durante cada amostragem, as plantas foram cuidadosamente retiradas das piscinas e separadas em parte aérea, raízes e panículas (estas últimas apenas nas coletas finais, quando presentes). Cada componente foi pesado para obtenção da massa fresca. As panículas foram debulhadas manualmente para separação e pesagem dos grãos. Em seguida, o material foi acondicionado em sacos de papel identificados (Figura 3 a e b) e levado ao Laboratório de Nutrição de Plantas, onde foi submetido à secagem em estufa com circulação de ar forçado a 65 °C, por um período de 72 horas. Após a secagem, as amostras foram pesadas novamente para determinação da massa seca, sendo os resultados expressos por planta.

d) Acúmulo de nutrientes na planta:

Após a obtenção da matéria seca, as amostras da parte aérea, raízes e grãos foram moídas em moinho tipo Wiley e submetidas à análise química para determinação das concentrações de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn). As análises seguiram a metodologia descrita por Malavolta, Vitti e Oliveira

(1997). Posteriormente, foi calculado o acúmulo de nutrientes por planta, por meio da multiplicação da concentração dos nutrientes pelo peso da matéria seca de cada parte da planta.



**Figura 3.** a) Medição da altura do Milheto Granífero no dia 2 de abril de 2024; b) Amostra de milheto Granífero após coleta de dados do dia 27 de abril de 2024.

### 3.4 Análises estatísticas

Os dados obtidos no experimento foram submetidos à análise de variância (ANOVA), por meio do teste F, com o objetivo de verificar a significância estatística das variáveis analisadas ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas. Para avaliar a dinâmica da marcha de absorção de nutrientes ao longo do tempo, aplicou-se análise de regressão polinomial, considerando-se os diferentes estágios fenológicos das plantas. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software SISVAR, versão 5.6 (FERREIRA, 2011), adequado para análise de experimentos agrônômicos em delineamentos com medidas repetidas no tempo.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

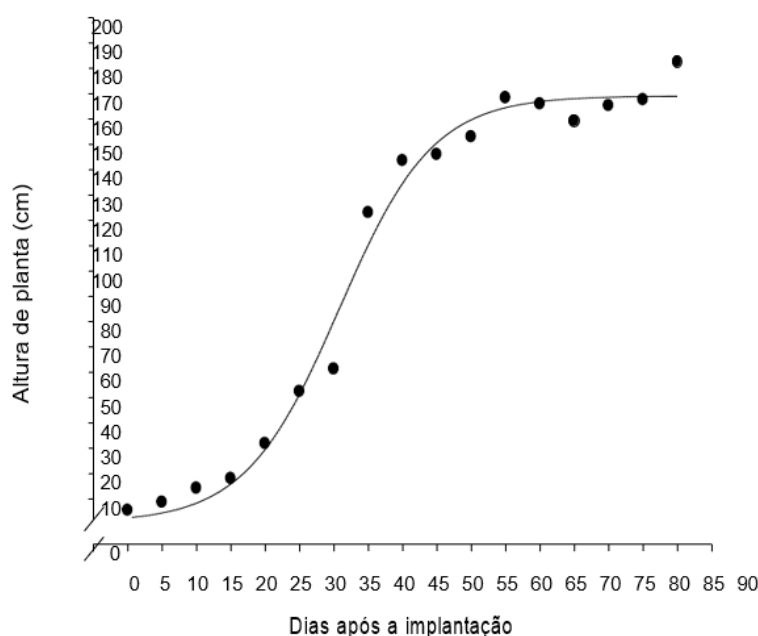
A análise do desenvolvimento em altura das plantas de milheto granífero revelou que a maior taxa de crescimento vegetativo foi observada até os 45 dias após a implantação (DAI) do experimento. Nesse período, a cultura ainda se encontrava em sua fase vegetativa, caracterizada por intensa atividade meristemática, formação de folhas e alongamento do colmo. Ao atingir os 45 DAI, com aproximadamente 105 cm de altura, observou-se a transição do estágio vegetativo para o reprodutivo, evidenciado pelo início da emissão da panícula, marcando o florescimento.

Segundo Taiz et al. (2017), o crescimento vegetal durante a fase vegetativa está diretamente associado à divisão e alongação celular, sendo influenciado por fatores como disponibilidade de nutrientes, luz e água. Em cultivos hidropônicos, essa disponibilidade é maximizada, o que favorece o desenvolvimento acelerado da cultura, como observado neste estudo.

Do florescimento até o início da fase de enchimento dos grãos (67 DAI), foi registrada uma redução gradual na taxa de incremento em altura. Embora a planta continue crescendo em estatura, os aumentos tornam-se progressivamente menores, indicando o redirecionamento do metabolismo vegetal para processos relacionados à reprodução, como o desenvolvimento das estruturas florais e o acúmulo de reservas nos grãos. Conforme enfatizado por Fageria et al. (2011), durante o florescimento, a planta prioriza a translocação de fotoassimilados para os órgãos reprodutivos, o que pode limitar o crescimento em altura.

O porte final das plantas foi atingido por volta dos 67 DAI, com altura média de 165 cm, mantendo-se estável até o fim do ciclo aos 85 DAI. Essa estabilidade confirma que, após a definição do estágio reprodutivo, o crescimento vegetativo praticamente cessa, e a planta concentra sua energia na formação e maturação dos grãos. Estudos similares conduzidos por Lavres Júnior et al. (2010) com outras gramíneas cultivadas em sistemas controlados também relatam essa desaceleração do crescimento em altura na transição para a fase reprodutiva.

Esse padrão de crescimento evidencia a importância da marcha de absorção de nutrientes ser acompanhada com precisão até o final da fase vegetativa, uma vez que os nutrientes essenciais, sobretudo nitrogênio e potássio, são mais exigidos nesse intervalo para a formação de tecidos estruturais. Conforme Malavolta (2006), conhecer os estágios de maior demanda nutricional permite um manejo mais eficiente da adubação, otimizando o desempenho da cultura e promovendo maior sustentabilidade nos sistemas de produção.



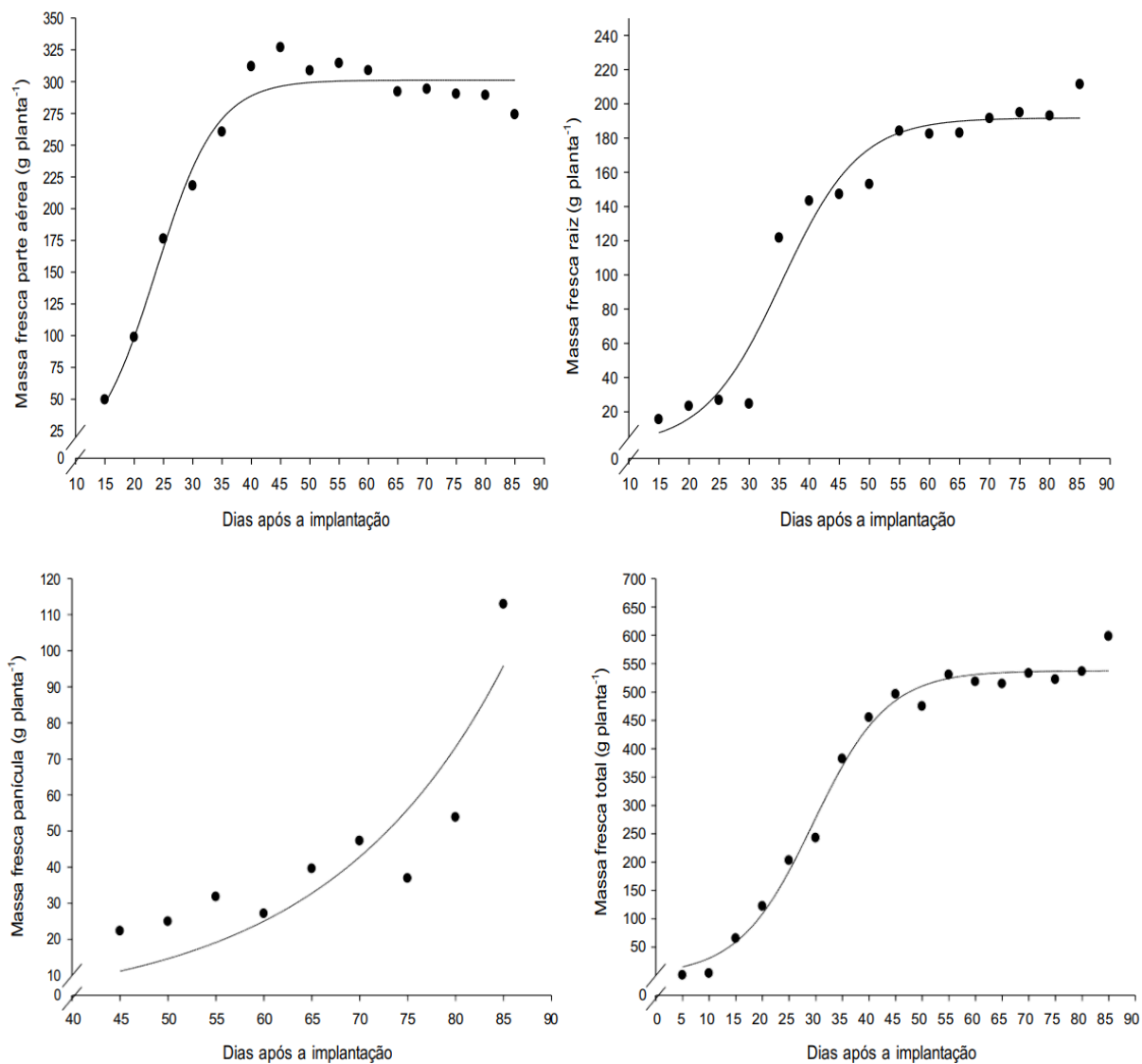
**Figura 4** - Altura da planta de milho granífero em função dos dias após implantação (DAI).

A produção de massa fresca da parte aérea (folhas + colmo) do milho granífero atingiu o valor máximo de aproximadamente 300,0 g planta<sup>-1</sup> aos 50 dias após a emergência (DAE), ou seja, cinco dias após o início do florescimento (45 DAE), estabilizando-se a partir dessa fase. O mesmo comportamento foi observado para a massa fresca das raízes e da planta como um todo, que atingiram máximos de 185,0 g planta<sup>-1</sup> e 530,0 g planta<sup>-1</sup>, respectivamente. Quanto à panícula, os dados ajustaram-se ao modelo de crescimento exponencial, com incremento contínuo até o final do ciclo, quando foi registrada a massa fresca máxima de 95,0 g planta<sup>-1</sup> (Figura 5).

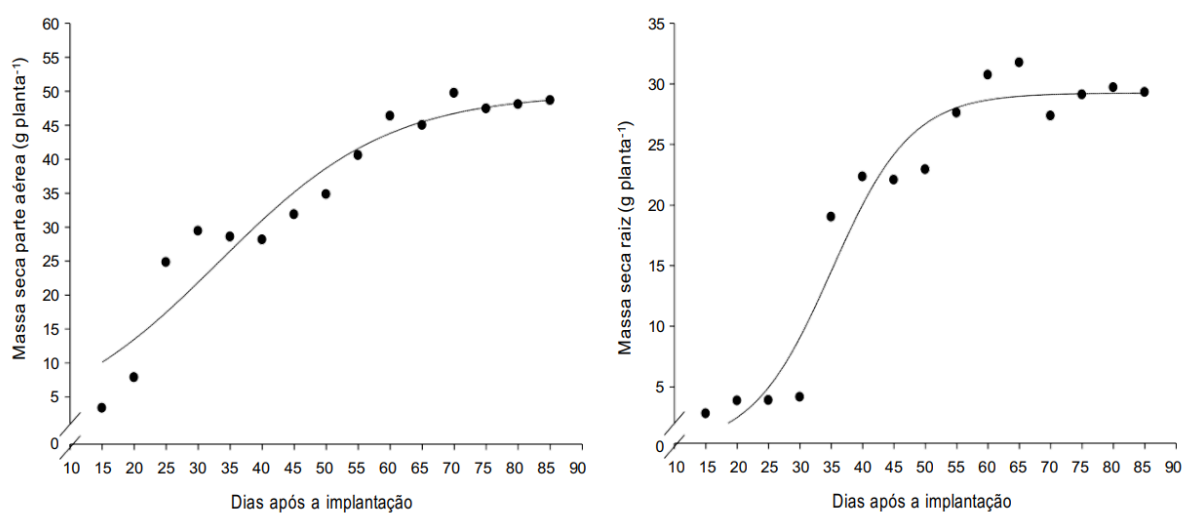
A massa seca da parte aérea, das raízes e da planta total seguiu tendência semelhante à da massa fresca, apresentando valores máximos aos 50 DAE e permanecendo estáveis até o final do ciclo (85 DAE). Os valores médios observados foram de 48,0 g planta<sup>-1</sup> para a parte aérea, 28,0 g planta<sup>-1</sup> para as raízes e 100,0 g planta<sup>-1</sup> para o total da planta. Em relação à panícula, a dinâmica da massa seca seguiu um padrão sigmoide, com aumentos acelerados entre 45 e 55 DAE e incremento mais lento entre 55 e 67 DAE, fase correspondente ao início do enchimento de grãos. Após esse período, a massa seca da panícula manteve-se praticamente estável, com valor máximo de 24,0 g planta<sup>-1</sup> (Figura 6).

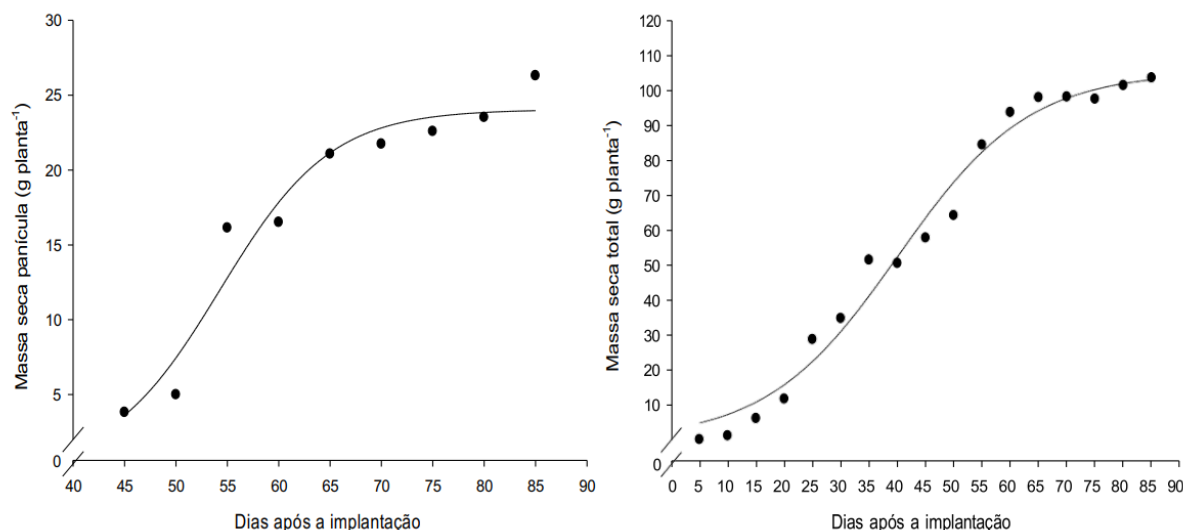
Esses resultados indicam que a acumulação de biomassa vegetal é mais intensa até o início do enchimento dos grãos (67 DAE), momento em que ocorre a definição da arquitetura estrutural da planta. Após esse estágio, os fotoassimilados produzidos pelas folhas são majoritariamente direcionados para os órgãos reprodutivos, especialmente para os grãos, caracterizando o processo de translocação de reservas, como descrito por Taiz et al. (2017) e Fageria, Baligar e Jones (2011). Essa redistribuição de biomassa é típica em culturas graníferas, sendo essencial para garantir a formação e o enchimento adequado dos grãos (Lavres Júnior et al., 2010).

Adicionalmente, a estabilização dos valores de massa seca após o florescimento é compatível com os relatos de Malavolta (2006), que enfatiza que o pico de acúmulo de matéria seca precede o pico de acúmulo de nutrientes e que, na fase final do ciclo, o metabolismo é voltado para o amadurecimento dos produtos da reprodução.



**Figura 5 -** Massa fresca da parte aérea, raiz, panícula e total da planta de milho granífero em função dos dias após implantação.



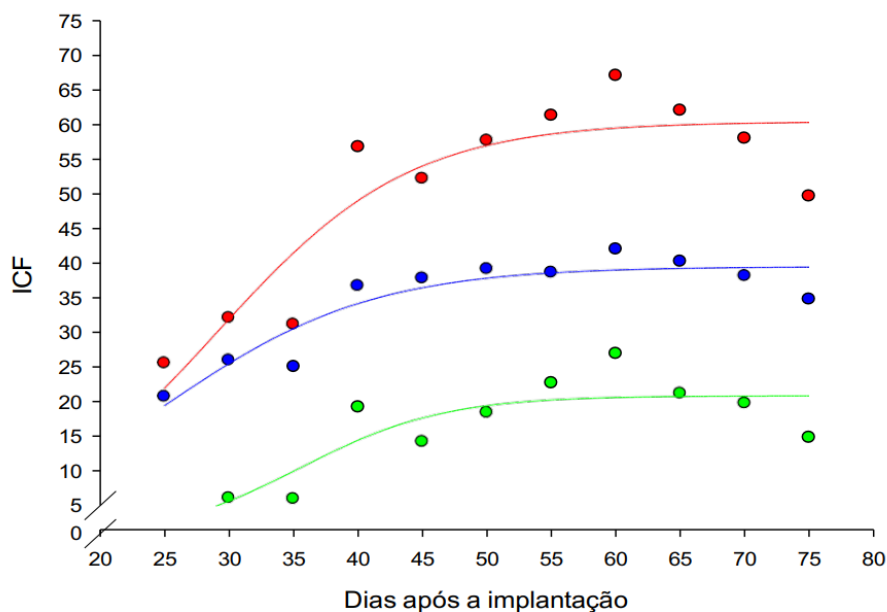


**Figura 6** - Massa seca da parte aérea, raiz, panícula e total da planta de milho granífero em função dos dias após implantação.

A síntese das clorofilas a, b e total ao longo do ciclo fenológico da cultura do milho granífero apresentou comportamento típico de curva sigmoide, com acréscimos progressivos entre os 25 e 55 dias após a instalação (DAI), seguidos por incrementos decrescentes entre 55 e 67 DAI — período que coincide com o início da fase de enchimento dos grãos. A partir desse ponto até o final do ciclo (85 DAI), observou-se uma estabilização na produção de clorofilas (Figura 7).

Esse padrão evidencia a transição fisiológica da planta do estágio vegetativo para o reprodutivo, com redirecionamento dos fotoassimilados e recursos metabólicos para o enchimento dos grãos e, posteriormente, para o início do processo de senescência foliar. Conforme descrito por Taiz et al. (2017), durante a senescência, há degradação das clorofilas, redução da atividade fotossintética e mobilização de nutrientes e compostos energéticos para os órgãos de reserva e reprodução, como grãos ou sementes.

Fageria, Baligar e Jones (2011) também corroboram esse comportamento fisiológico, destacando que, em gramíneas de ciclo anual, a máxima eficiência fotossintética geralmente ocorre durante o enchimento dos grãos, seguido por um declínio, devido à priorização metabólica do acúmulo de biomassa nos órgãos reprodutivos. Dessa forma, o padrão observado neste estudo está em consonância com a literatura especializada sobre fisiologia vegetal e estratégias de alocação de assimilados em culturas graníferas.



**Figura 7** - Clorofila a (●), b (●) e total (●) das folhas da planta de milho granífero em função dos dias após implantação.

A análise dos acúmulos de macronutrientes na parte aérea da planta de milho granífero demonstrou que os dados ajustaram-se a uma função linear (Figura 8). A máxima concentração de N, P, K, Ca, Mg e S foi observada ao final do ciclo, especificamente aos 85 DAI, com acúmulos de 1,10 g planta<sup>-1</sup> de N, 0,30 g planta<sup>-1</sup> de P, 1,90 g planta<sup>-1</sup> de K, 0,28 g planta<sup>-1</sup> de Ca, 0,09 g planta<sup>-1</sup> de Mg e 0,12 g planta<sup>-1</sup> de S. Entre esses, o cálcio (Ca) apresentou a maior inclinação na reta de crescimento, o que corrobora com a literatura, uma vez que o Ca é um nutriente de baixa mobilidade nas plantas e tende a ser acumulado nas folhas e colmos, sendo limitado na redistribuição para outros órgãos (Oliveira et al., 2012). Essa característica é observada especialmente em plantas com altos requerimentos de Ca para o desenvolvimento celular e para o fortalecimento da parede celular, processos frequentemente relacionados com o crescimento vegetativo (Fageria et al., 2011).

Os resultados de acúmulo de N, P, Ca, Mg e S nas raízes mostraram que até os 55 DAI os valores estavam próximos ao máximo, permanecendo praticamente estáveis até o final do ciclo (Figura 9). Essa estabilidade sugere que, após esse período, a planta começa a direcionar seus nutrientes para os órgãos reprodutivos, como observado por Souza et al. (2013) em estudos com outros cereais de grãos pequenos. Contrariamente, o K apresentou acúmulo máximo já aos 30 DAI, logo após o estágio vegetativo, o que está alinhado com estudos de Lima et al. (2015), que indicam que o K é um nutriente essencial para o desenvolvimento inicial das plantas, especialmente no crescimento vegetativo.

Em relação à panícula, os acúmulos de N, P, Ca e S atingiram o máximo aos 67 DAI, que corresponde ao início do enchimento dos grãos (Figura 10). Já os acúmulos de K e Mg seguiram um padrão crescente desde o início do florescimento (45 DAI) até o final do ciclo (85 DAI), sugerindo um maior envolvimento desses nutrientes no processo de desenvolvimento e formação de grãos, como reportado por Dávila et al. (2017), que destacam o papel crucial de K e Mg na formação de compostos energéticos essenciais durante a fase reprodutiva.

A maior taxa de acúmulo total de N, P, K, Mg e S ocorreu durante a fase vegetativa, especificamente entre 0 e 45 DAI, com picos de acúmulo aos 35; 45; 25; 40 e 45 DAI para N, P, K, Mg e S, respectivamente (Figura 11). O Ca apresentou o maior acúmulo aos 50 DAI, período que coincide com o início da fase de florescimento. Essa distribuição de acúmulos está em linha com o encontrado por Prasad et al. (2009), que descrevem a fase vegetativa como o momento de maior exigência por macronutrientes para o crescimento e estabelecimento da planta, enquanto a fase reprodutiva é mais voltada para o armazenamento de nutrientes nos grãos.

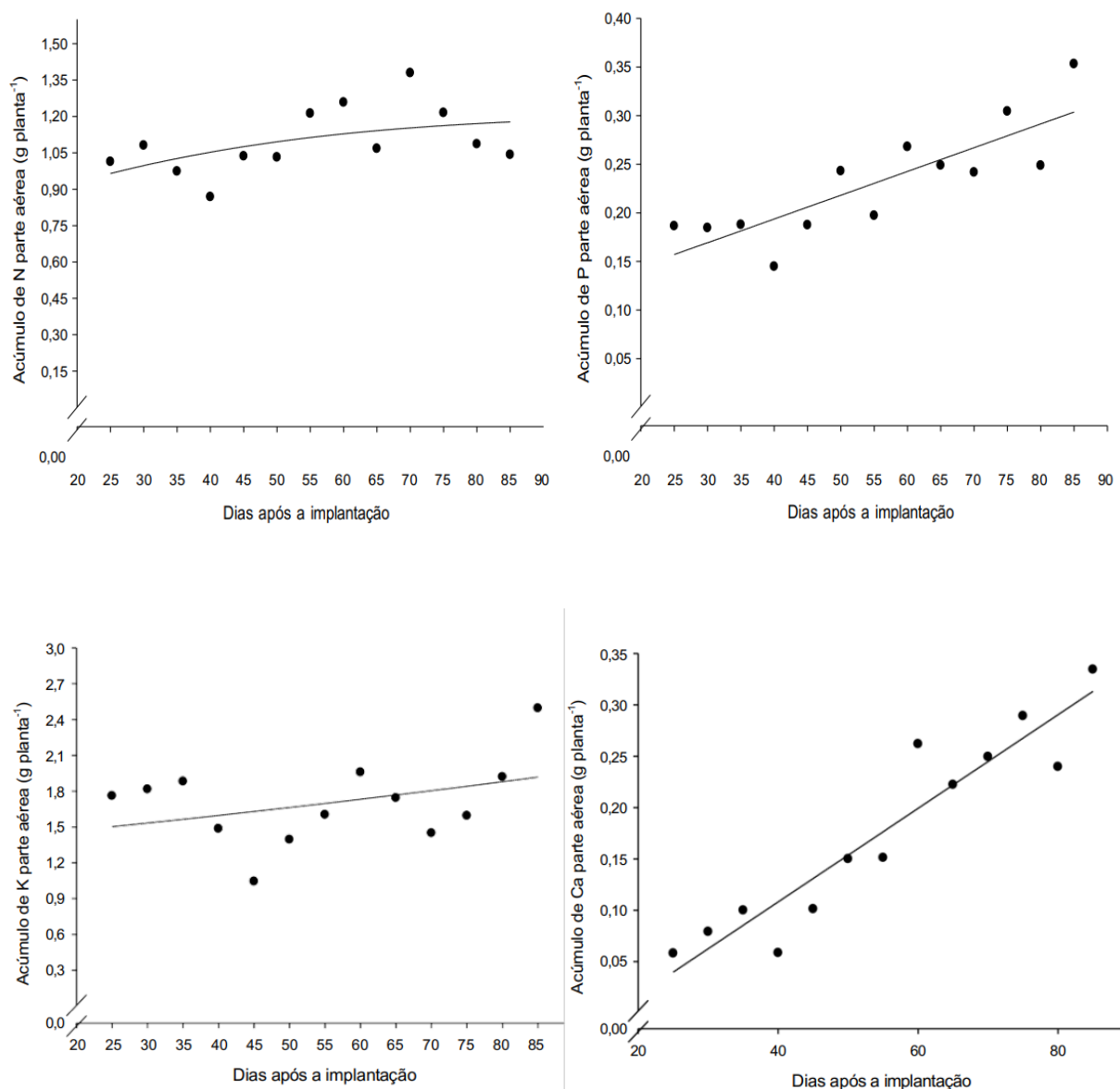
O acúmulo de micronutrientes na parte aérea foi caracterizado pela baixa mobilidade dos elementos, como observado no comportamento do Cu, cujos dados não se ajustaram a nenhum modelo matemático (Figura 12). Por outro lado, os acúmulos de B, Fe, Mn e Zn ajustaram-se à função quadrática, com incrementos decrescentes e máximos observados aos 85 DAI, de 0,75; 8,90; 13,0 e 13,3 mg planta<sup>-1</sup>, respectivamente. Esse padrão de acúmulo está em consonância com a literatura que afirma que os micronutrientes apresentam baixa mobilidade e são predominantemente acumulados na parte aérea da planta até o final do ciclo (Marschner, 2012). Em plantas como o milho, a mobilidade de micronutrientes como o B e o Mn é restrita, o que limita sua redistribuição para os órgãos reprodutivos (Fageria et al., 2011).

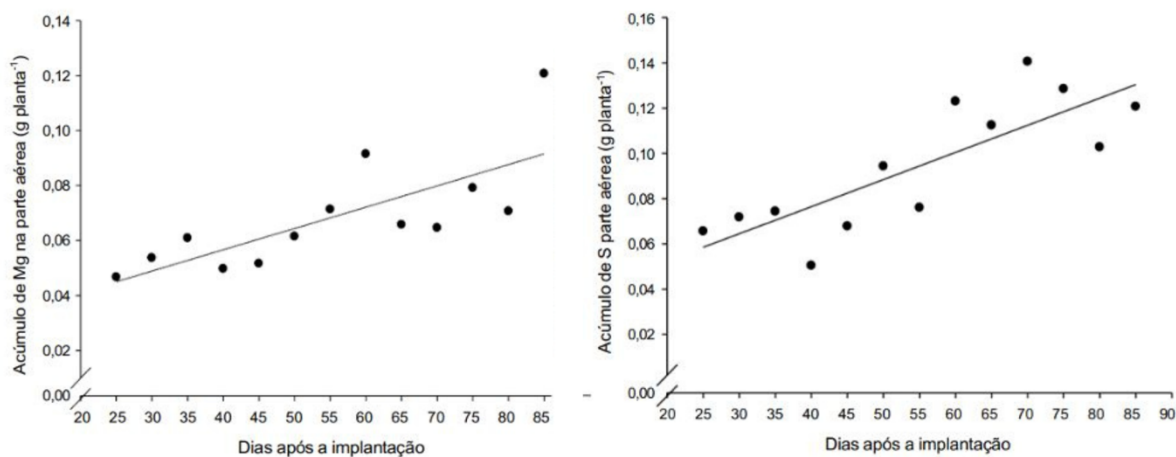
Nos resultados de acúmulo de micronutrientes na raiz, observou-se que B, Mn e Zn atingiram seus valores máximos até os 55 DAI, com estabilidade até o final do ciclo (Figura 13). Isso corrobora com o que foi evidenciado por Lima et al. (2014), que relataram o rápido transporte e acúmulo desses micronutrientes nas raízes, com pouca mobilização para outros órgãos vegetativos ou reprodutivos após a fase inicial do desenvolvimento. Por outro lado, o Cu e o Fe apresentaram um pico de acúmulo somente aos 85 DAI, o que reflete a tendência de acumulação desses nutrientes durante as fases mais avançadas do ciclo, principalmente nas raízes, como também descrito por Oliveira et al. (2017).

Na panícula, o acúmulo de B, Cu, Mn e Zn atingiu o máximo aos 67 DAI (início

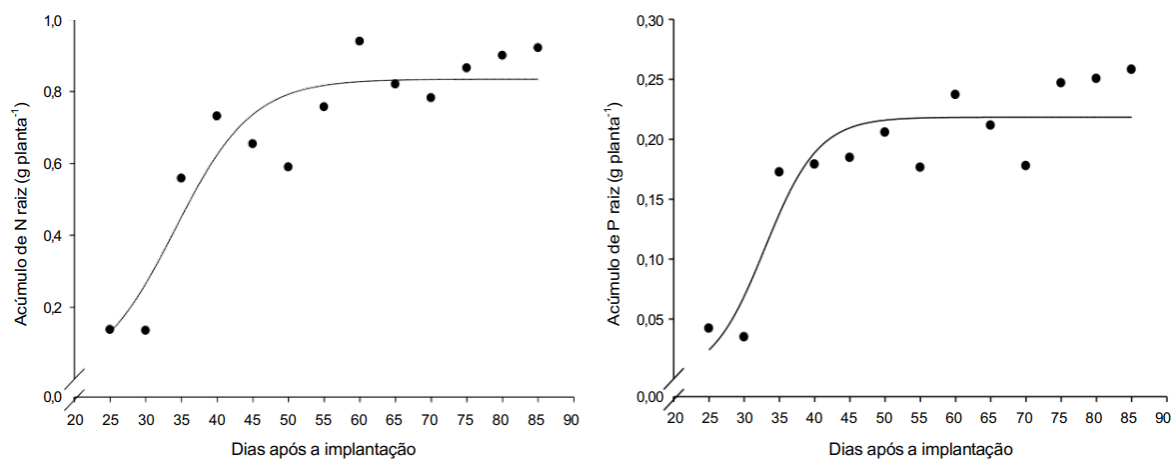
do enchimento dos grãos) (Figura 14), enquanto o Fe apresentou aumento contínuo até o final do ciclo (85 DAI). Esse comportamento é compatível com as observações de Souza et al. (2013), que indicaram que o acúmulo de Fe na panícula é importante para a ativação de enzimas antioxidantes durante o processo de enchimento de grãos.

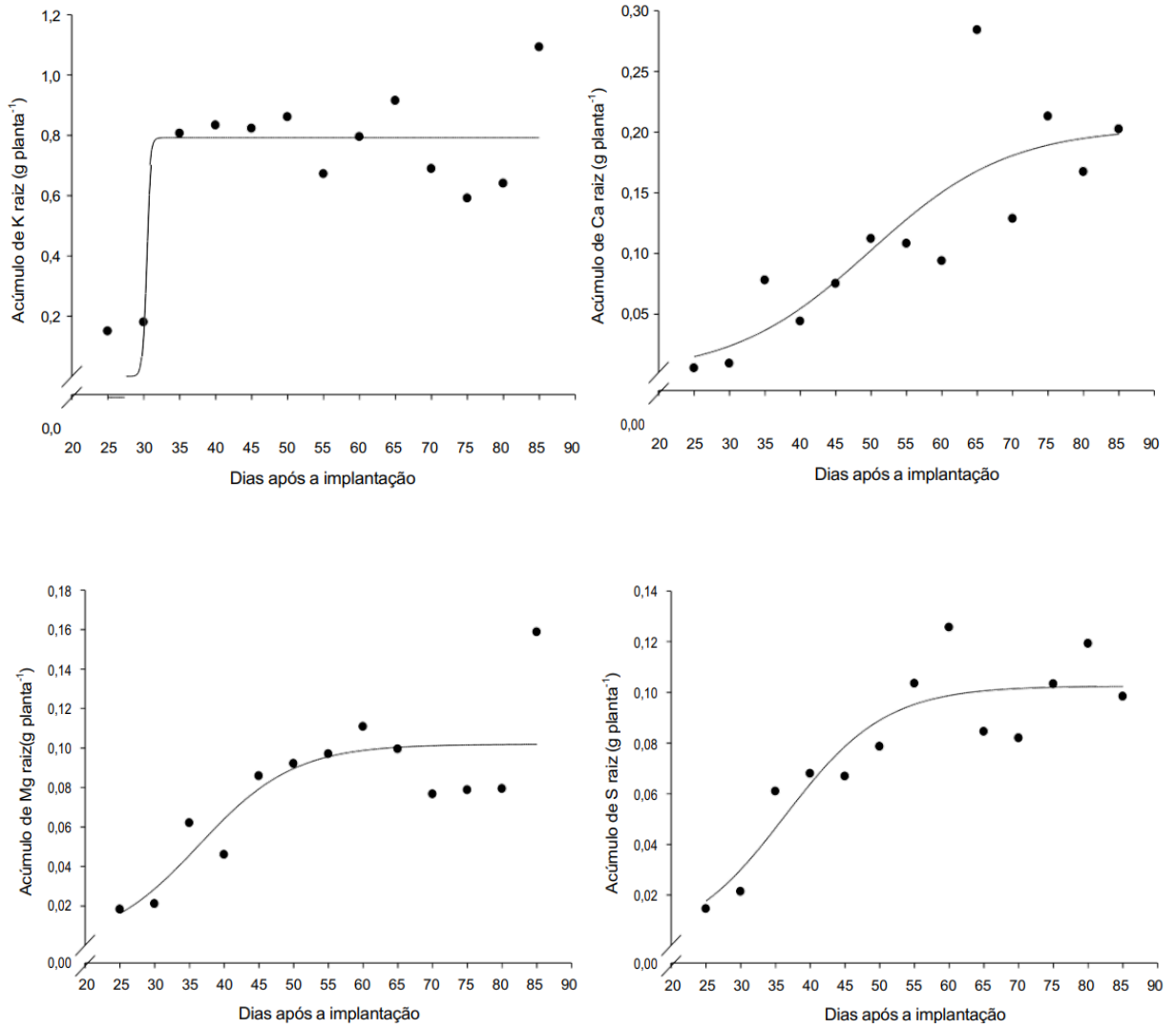
A maior taxa de acúmulo total de B, Cu, Fe, Mn e Zn ocorreu durante a fase vegetativa, entre 0 e 45 DAI, com picos máximos de acúmulo observados aos 35; 45; 45; 40 e 40 DAI (Figura 15), respectivamente. Esses dados corroboram com os achados de Taiz et al. (2017), que destacam o envolvimento de micronutrientes como o Fe e Mn no metabolismo celular e na defesa contra estresses ambientais, particularmente no desenvolvimento inicial das plantas.



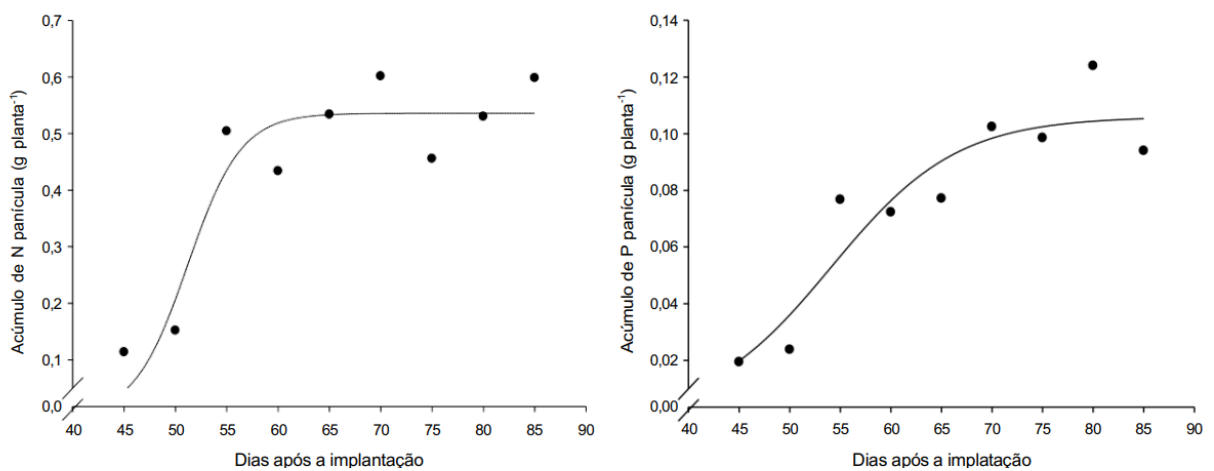


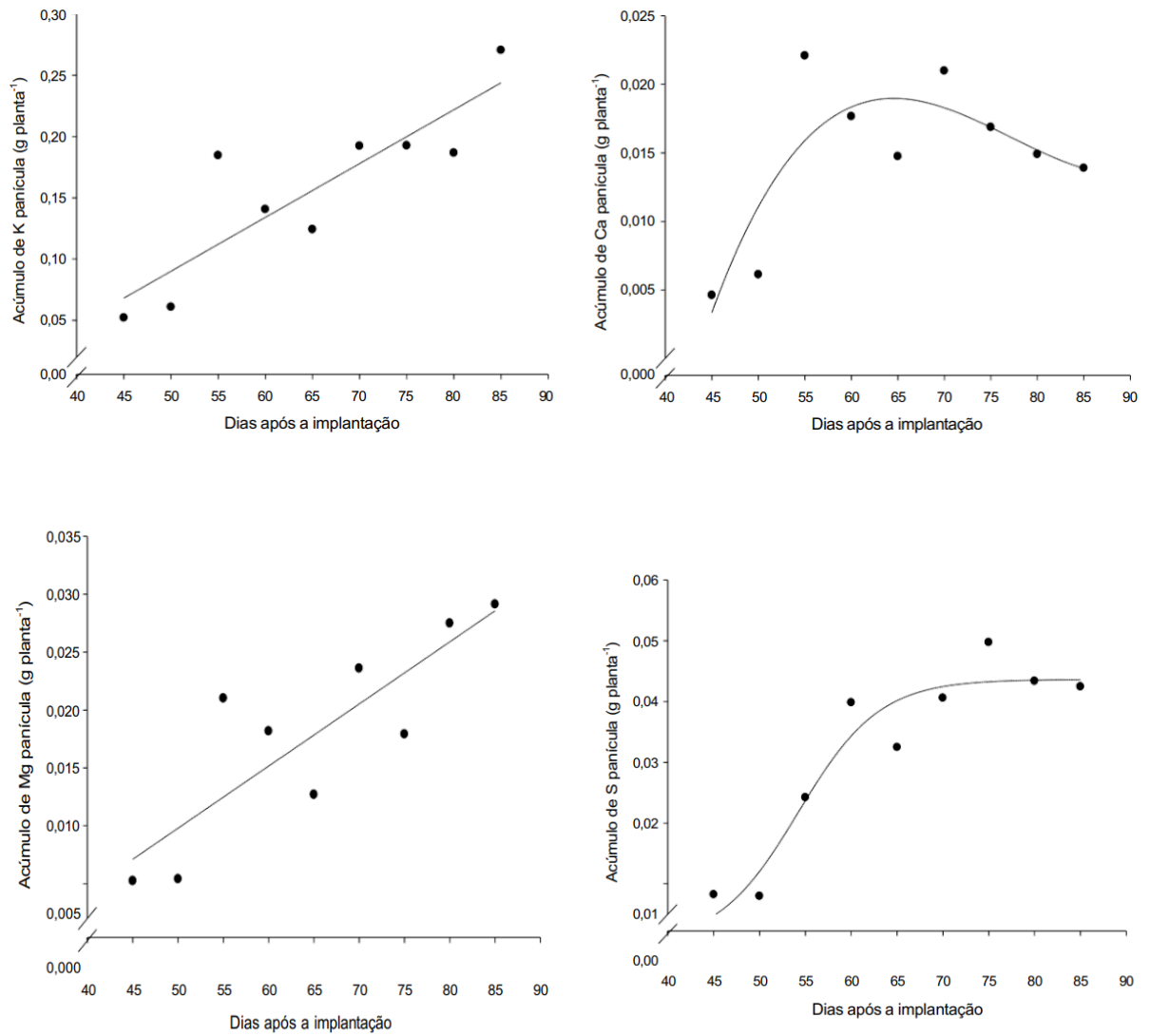
**Figura 8** - Acúmulo de macronutrientes na parte aérea da planta de milho granífero em função dos dias após implantação.



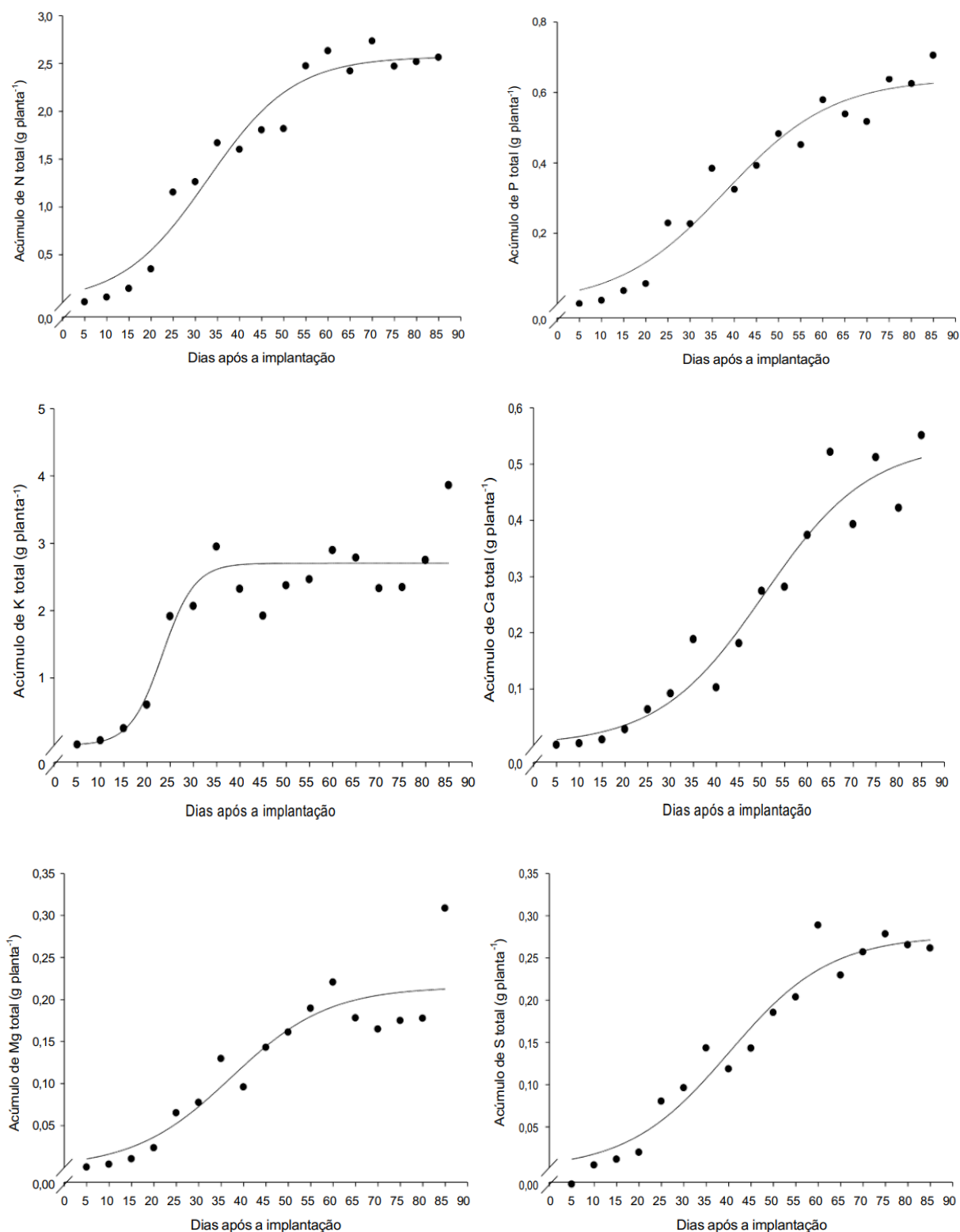


**Figura 9 -** Acúmulo de macronutrientes na raiz da planta de milheto granífero em função dos dias após implantação.

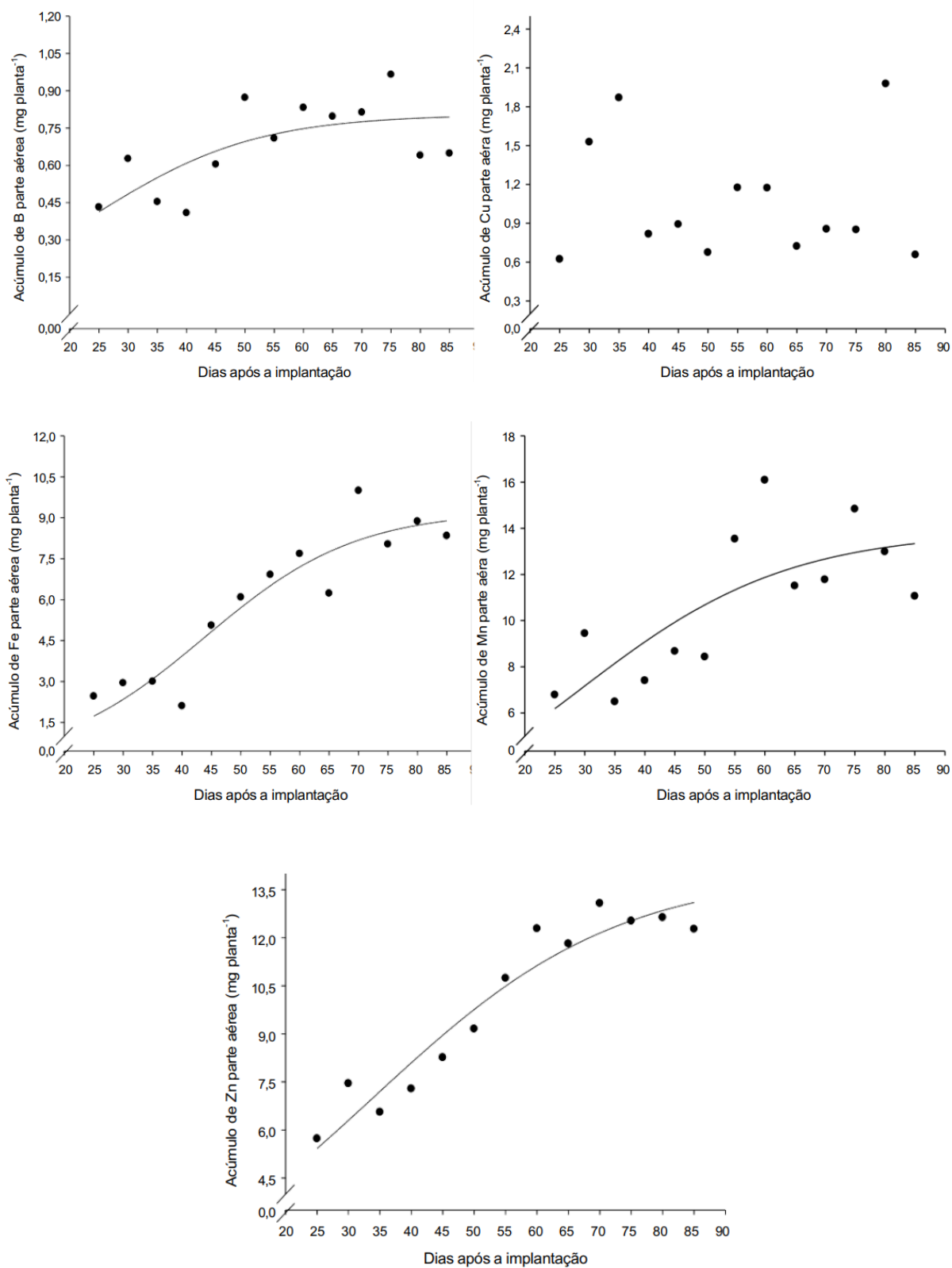




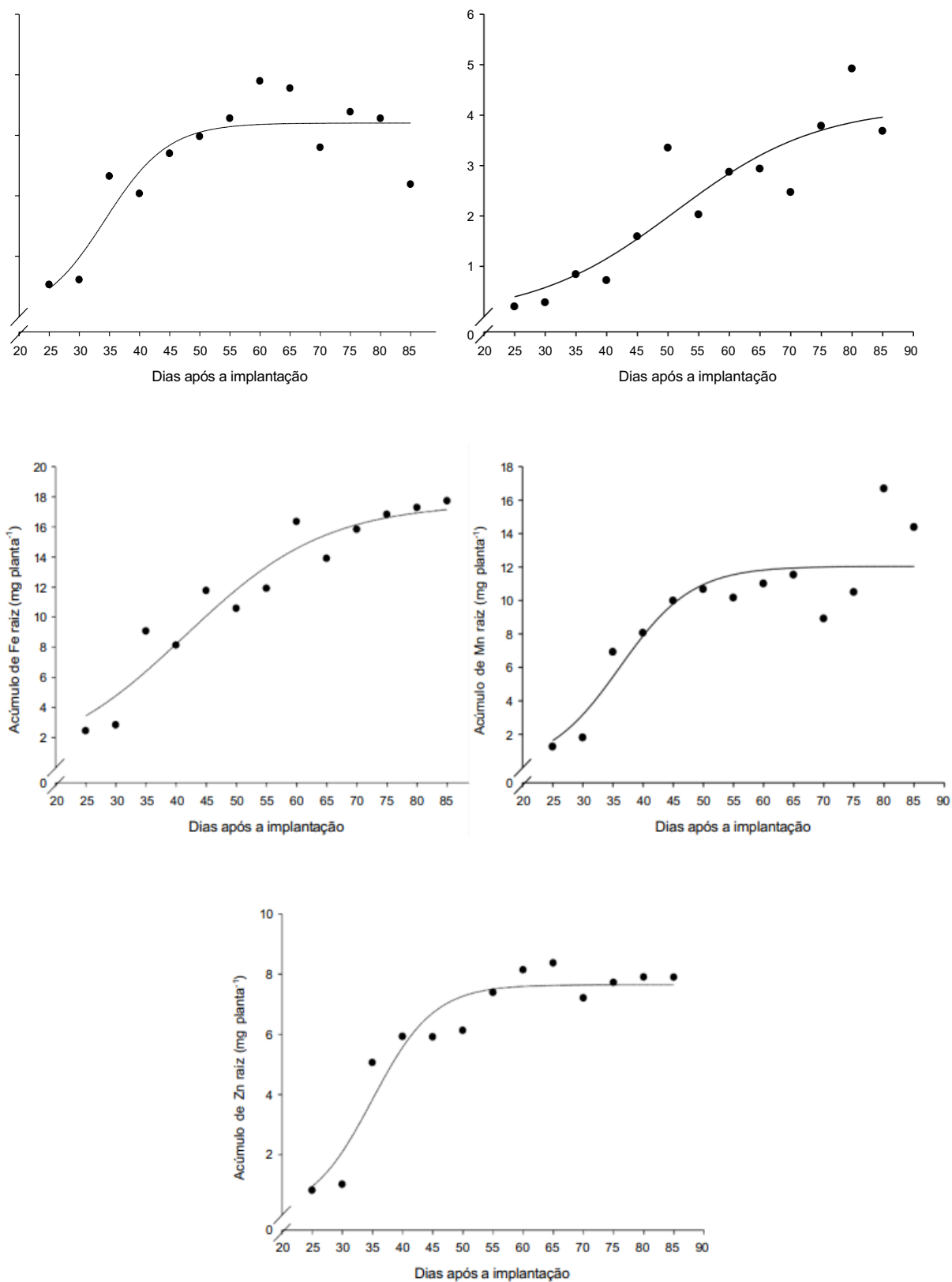
**Figura 10** - Acúmulo de macronutrientes na panícula da planta de milho granífero em função dos dias após implantação.



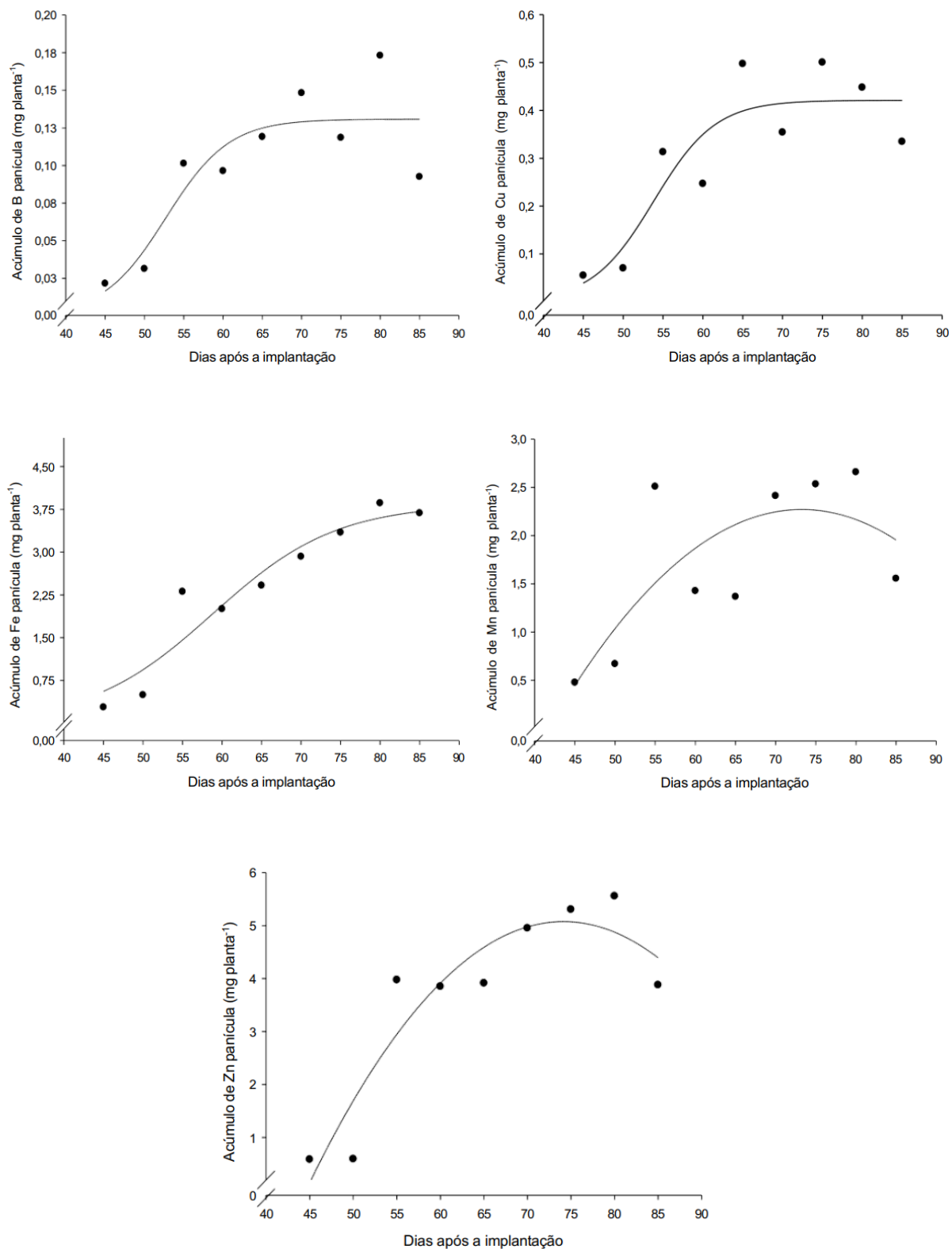
**Figura 11** - Acúmulo total de macronutrientes na planta de milho granífero em função dos dias após implantação.



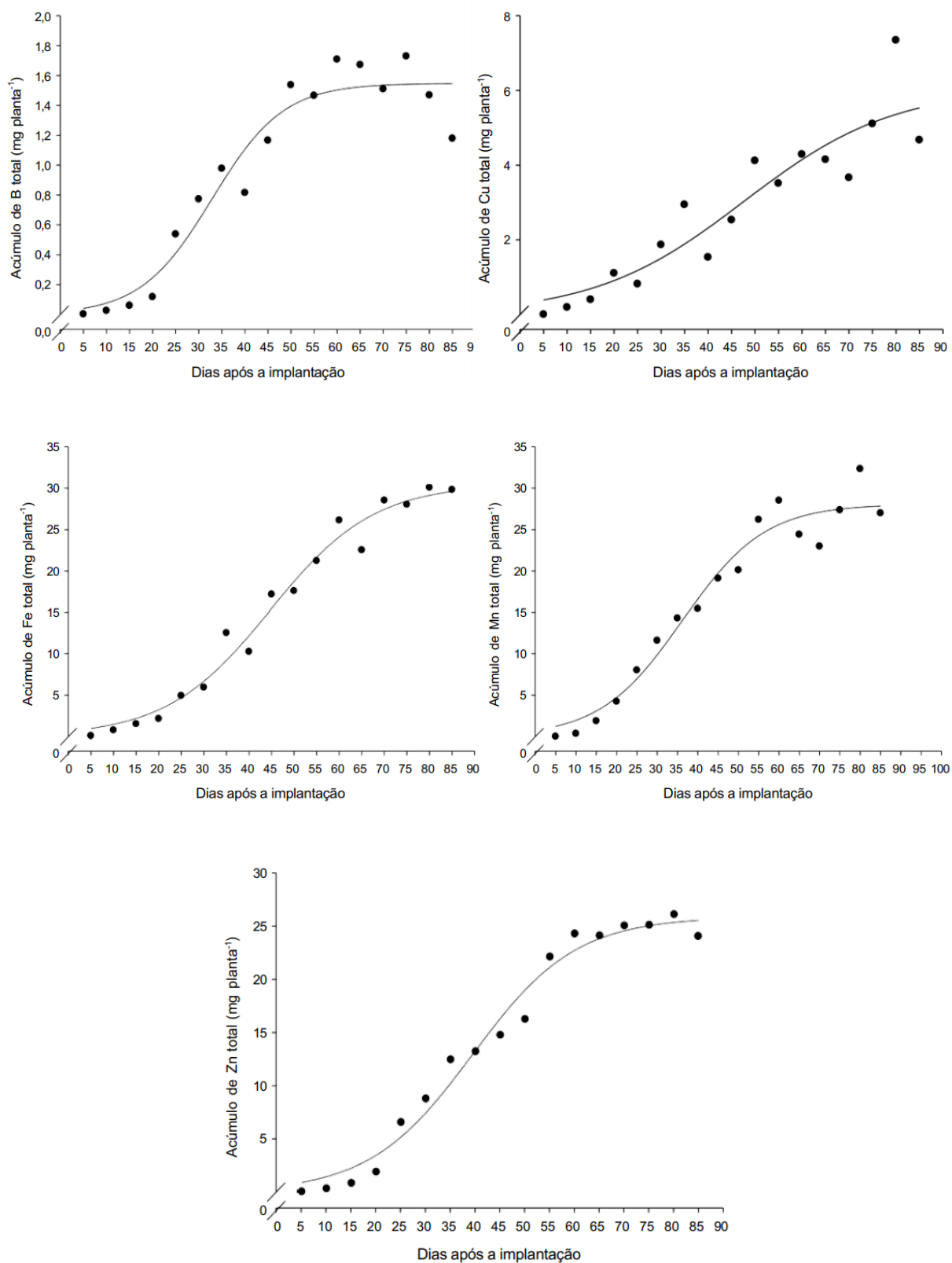
**Figura 12** - Acúmulo de micronutrientes na parte aérea da planta de milho granífero em função dos dias após implantação.



**Figura 13** - Acúmulo de micronutrientes na raiz da planta de milho granífero em função dos dias após implantação.



**Figura 14** - Acúmulo de micronutrientes na panícula da planta de milho granífero em função dos dias após implantação.



**Figura 15** - Acúmulo total de micronutrientes na planta de milho granífero em função dos dias após implantação.

Observou-se que, no milho granífero, os teores de proteína bruta (PB), fibra em detergente neutro (FDN) e fibra em detergente ácido (FDA) variaram entre os diferentes compartimentos da planta. Na palhada, os valores médios observados foram de 12,02% de PB, 42,09% de FDN e 18,56% de FDA. Nos grãos, por sua vez, os teores foram de 12,88% de PB, 32,40% de FDN e 9,92% de FDA. Esses resultados indicam que, embora os grãos apresentem maior teor de proteína bruta, a palhada possui maior concentração de frações fibrosas, características desejáveis para formulações específicas na alimentação animal, especialmente em sistemas de pastejo rotacionado ou uso como forragem conservada.

Esses dados estão em consonância com os achados de Rodrigues et al. (2018), que destacam o milho como uma alternativa forrageira com boa composição proteica e moderado teor de fibras. Ainda segundo Pereira et al. (2020), a menor concentração de FDA nos grãos em comparação à palhada evidencia maior digestibilidade da fração energética, sendo benéfica para dietas com foco em ganho de peso animal. Além disso, Van Soest (1994) ressalta que a quantificação das frações fibrosas (FDN e FDA) é fundamental para a avaliação do valor nutritivo dos alimentos, dado seu impacto direto sobre o consumo voluntário e a digestibilidade pelos ruminantes.

A ordem de acúmulo dos macronutrientes foi estabelecida como  $K > N > P > Ca > Mg > S$ , sendo o potássio e o nitrogênio os elementos mais exigidos pela planta. Ambos demonstraram altas taxas de absorção entre 10 e 20 dias antes do florescimento, o que aponta para a necessidade de adubação de cobertura precisamente nesse intervalo. Essa constatação está alinhada aos estudos de Malavolta et al. (1997) e Marschner (2012), os quais destacam o papel fundamental desses nutrientes na regulação osmótica, no crescimento celular e na ativação enzimática.

A redistribuição de nutrientes dentro da planta também revelou importantes diferenciações. O cálcio, por sua baixa mobilidade no floema, permanece predominantemente nas folhas e colmos, o que justifica sua curva de acúmulo distinta dos demais macronutrientes. Tal comportamento fisiológico está em consonância com os achados de Epstein e Bloom (2005), que apontam que nutrientes como Ca e B são estruturalmente fixados nas paredes celulares, dificultando sua mobilidade interna.

Em relação aos micronutrientes, a sequência de acúmulo observada foi  $Fe > Mn > Zn > B > Cu$ , evidenciando a alta demanda de ferro pela planta, especialmente

durante a fase vegetativa. A elevada exigência de Fe está associada à sua função na fotossíntese, respiração celular e síntese de clorofila. Estudos de Taiz et al. (2017) sustentam essa importância, destacando o papel central dos micronutrientes no metabolismo secundário e no funcionamento dos complexos enzimáticos.

A baixa mobilidade de micronutrientes como B, Mn e Zn no interior da planta reforça a importância da sua disponibilização adequada nas fases iniciais de crescimento, uma vez que a redistribuição para os grãos é limitada. Dessa forma, a eficiência da absorção desses elementos depende diretamente da disponibilidade no solo e da aplicação em momentos estratégicos, sendo essencial para sustentar o potencial produtivo da cultura.

## 5. CONCLUSÃO

A dinâmica de acúmulo de nutrientes no milheto granífero (*Pennisetum glaucum* L.) ao longo de seu ciclo de desenvolvimento evidencia padrões fisiológicos bem definidos e com forte relevância para o manejo nutricional da cultura. Observou-se que os macronutrientes apresentam acúmulo crescente até o florescimento, com posterior redistribuição dos fotoassimilados para os órgãos reprodutivos. O conhecimento sobre essas fases críticas é essencial para otimizar práticas de adubação e garantir o melhor aproveitamento dos nutrientes aplicados ao solo.

A compreensão da marcha de absorção do milheto granífero se mostrou de grande ajuda e importância, o manejo nutricional do milheto granífero deve ser fundamentado na compreensão detalhada da demanda fisiológica da planta ao longo de seu ciclo. O planejamento adequado da adubação, considerando o tipo e a época de aplicação de macro e micronutrientes, constitui-se como uma estratégia agrônômica indispensável para promover a sustentabilidade produtiva e a maximização da eficiência do uso de fertilizantes, resultando em sistemas agrícolas mais rentáveis e ecologicamente equilibrados.

## REFERÊNCIAS

- ALBERONI, G. L. Hidroponia. 2. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 1998.
- ALBERONI, T. L. Fundamentos da hidroponia. Curitiba: UFPR, 1998.
- APARECIDO, L. E. O. et al. Modelagem da produtividade do milho safrinha em função das

- condições climáticas do Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 26, 2020.
- BERGAMASCHINE, A. F. et al. Potencial forrageiro de híbridos de milho em cultivo de verão. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo, Sete Lagoas*, v. 10, n. 3, p. 213–223, 2011.
- BERGAMASCHINE, A. F.; FREITAS, R. V. L.; VALÉRIO FILHO, W. V.; BASTOS, J. F. P.; MELLO, S. Q. S.; CAMPOS, Z. R. Substituição do milho e farelo de algodão pelo milho no concentrado da dieta de novilhos em confinamento. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 40, n. 1, p. 154–159, 2011.
- BERTINO, A. M. P. et al. Macronutrient absorption rate of a Runner-type peanut cultivar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, n. 6, p. 433–440, 2022.
- BERTINO, L. A. et al. Adubação: teoria e prática. 2. ed. Curitiba: Instituto Federal do Paraná, 2022.
- BÜLL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. (org.). *Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba: Potafos, 1993. p. 63–145.
- BURGARELLA, C. et al. A western Sahara centre of domestication inferred from pearl millet genomes. *Nature Ecology & Evolution*, v. 2, p. 1377–1380, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0643-y>.
- CANTARELLA, H. et al. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2022. (Boletim Técnico, 100).
- COSTA, C. A. et al. Sistema de cultivo hidropônico: uma alternativa para agricultura familiar. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 14, n. 3, p. 376–381, 2023.
- CURY, Augusto. *Nunca desista de seus sonhos*. São Paulo: Sextante, 2005
- EMBRAPA. *Cultivo do milho: produção de sementes e grãos*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009.
- EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- FAO. Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. *International Year of Millets 2023*
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.
- FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. van. Micronutrientes. In: RAIJ, B. van et al. (ed.). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto

Agrônômico, 2001. p. 143–160.

FONTES, L. R. et al. Taxa de crescimento e acúmulo de nutrientes pelo milho (*Pennisetum glaucum* L.) em função de adubação mineral. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 4, p. 1199–1207, 2012.

KUMAR, R. et al. Nutrient uptake and productivity of pearl millet under hydroponic conditions. *International Journal of Plant and Soil Science*, v. 32, n. 6, p. 88–96, 2020

MANTOVANI, E. C. et al. Sistema para análise de dados meteorológicos: Manual de referência do usuário. Versão 4.0. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2009.

MELO, L. F. C. et al. Marcha de absorção de nutrientes pelo milho. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 56, n. 5, p. 645–652, 2009.

MENDONÇA, J. R. et al. Absorção de nutrientes por milho em sistema hidropônico. *Revista Agro@ambiente On-line*, v. 16, n. 1, p. 1–10, 2022.

PEREIRA, L. G. R. et al. Potencial forrageiro do milho sob diferentes épocas de semeadura. *Revista Brasileira de Zootecnia*, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 576–582, 2003.

RESH, H. M. *Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. 8. ed. Boca Raton: CRC Press, 2021.

SOUZA, C. F. et al. Taxa de absorção de nutrientes por gramíneas forrageiras em solos de Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 4, p. 1237–1245, 2011.