

RESPOSTAS PRODUTIVAS E FISIOLÓGICAS DO ALGODOEIRO (*GOSSYPIMUM HIRSUTUM* L.) À DEFICIÊNCIA INDUZIDA DE MACRO E MICRONUTRIENTES EM CONDIÇÕES CONTROLADAS DE VASO

Marcelo Morita Lindolfo¹
Verônica Borges de Souza²
Julian Junio de Jesus Lacerda³

RESUMO: O desequilíbrio nutricional é um dos principais fatores limitantes da produtividade e da qualidade da fibra do algodoeiro. Objetivou-se avaliar as respostas produtivas, fisiológicas e tecnológicas da cultivar FM 974 GLT sob a omissão de macro e micronutrientes. O experimento foi conduzido em condições controladas de vaso, utilizando a técnica de diagnose por subtração com 16 tratamentos: testemunha completa (com todos nutrientes), omissão individual de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Zn, Mn, Fe, Mo, aplicação exclusiva de macronutrientes, aplicação exclusiva de micronutrientes e testemunha zero. As omissões de N e P causaram as maiores restrições ao desenvolvimento vegetativo, reduzindo a altura das plantas em até 30% e a massa seca radicular em 62%. A carência de B resultou em abortamento massivo de estruturas reprodutivas, reduzindo a massa de pluma para 24,47 g, apesar do crescimento vegetativo preservado. A omissão de K reduziu o número de capulhos, porém, por meio de plasticidade fisiológica, as fibras remanescentes apresentaram comprimento superior (33,4 mm) e resistência de 33,4 g/tex. A análise de componentes principais (ACP) revelou assinaturas iônicas distintas, onde o equilíbrio entre B e K na fibra correlacionou-se positivamente com a excelência tecnológica (HVI). Conclui-se que, enquanto os macronutrientes sustentam a base estrutural e produtiva, os micronutrientes, especialmente o boro, são os principais reguladores da qualidade tecnológica da fibra.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L. diagnose por subtração. Nutrição mineral. Qualidade de fibra. HVI.

ABSTRACT: Nutritional imbalance is one of the main limiting factors for cotton productivity and fiber quality. This study aimed to evaluate the productive, physiological, and technological responses of the FM 974 GLT cultivar under the omission of macro and micronutrients. The experiment was conducted under controlled pot conditions, using the subtraction diagnosis technique with 16 treatments: complete control (with all nutrients), individual omission of N, P, K, Ca, Mg, S, B, Zn, Mn, Fe, Mo, exclusive application of macronutrients, exclusive application of micronutrients, and zero control. Omissions of N and P caused the greatest restrictions to vegetative development, reducing plant height by up to 30% and root dry mass by 62%. Boron deficiency resulted in massive abortion of reproductive structures, reducing lint mass to 24.47 g, despite preserved vegetative growth. The omission of K reduced the number of bolls; however, through physiological plasticity, the remaining fibers exhibited greater length (33.4 mm) and a resistance of 33.4 g/tex. Principal component analysis (PCA) revealed distinct ionic signatures, where the balance between B and K in the fiber correlated positively with technological excellence (HVI). It is concluded that, while macronutrients support the structural and productive base, micronutrients, especially boron, are the main regulators of the technological quality of the fiber.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L. subtraction diagnosis. mineral nutrition. fiber quality. HVI.

¹Mestre em Agronomia, Universidade Federal do Piauí.

²Graduada em Engenharia Agrônoma, Universidade Federal do Piauí.

³Doutor em Ciências do Solo, Universidade Federal do Piauí.

I. INTRODUÇÃO

O algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) consolida-se como a principal cultura de fibras naturais em escala global, sendo responsável por mais de 95% da pluma destinada à indústria têxtil, com papel estratégico tanto na economia agrícola quanto na cadeia industrial de transformação (Bange; Milroy; Thorbjornsen, 2016). No Brasil, o avanço tecnológico do setor, aliado à adoção de cultivares modernas de alto potencial produtivo, intensificou a dependência do manejo nutricional preciso, sobretudo em ambientes tropicais caracterizados por solos altamente intemperizados e de baixa fertilidade natural (Beltrão; Azevedo, 2008; Raij et al., 2011).

A complexidade fisiológica do algodoeiro decorre de seu hábito de crescimento indeterminado e da coexistência de drenos vegetativos e reprodutivos ao longo do ciclo. Essa característica impõe uma elevada demanda por nutrientes minerais, cuja disponibilidade regula desde a expansão foliar inicial até os processos altamente especializados de diferenciação e maturação da fibra (Oosterhuis, 2011; Rosolem, 2017). Nesse contexto, o equilíbrio nutricional emerge como o principal eixo integrador da produtividade e da qualidade tecnológica da pluma, modulando a eficiência fotossintética, a alocação de fotoassimilados e a integridade estrutural da parede celular da fibra (Carvalho et al., 2011; Taiz et al., 2017).

A nutrição mineral atua diretamente na base bioquímica e molecular do metabolismo vegetal. O nitrogênio (N), como componente estrutural de aminoácidos, proteínas e clorofilas, sustenta a capacidade fotossintética da planta, sendo determinante para a formação de área foliar funcional e para o balanço fonte-dreno ao longo do ciclo (Pettigrew; Meredith, 1997; Gutiérrez-Boem et al., 2019). Sua omissão compromete não apenas o crescimento vegetativo, mas também a translocação de carboidratos para os órgãos reprodutivos, resultando em abortamento floral e redução expressiva do rendimento (Rosolem; Silva; Esteves, 2003).

De maneira complementar, o fósforo (P) exerce papel central na bioenergética celular, integrando moléculas de ATP, ácidos nucleicos e fosfolipídios de membrana. Em algodoeiro, a deficiência de P limita severamente o crescimento radicular e a capacidade de absorção de água e nutrientes, criando um gargalo metabólico que repercute negativamente sobre a arquitetura da planta e sobre o enchimento dos capulhos (Grant et al., 2001; Marschner, 2012; Griffin; Kelley; Oosterhuis, 1995). Assim, N e P configuram-se como os principais sustentáculos do crescimento estrutural e da viabilidade produtiva da cultura.

No âmbito da qualidade tecnológica da fibra, o potássio (K) assume função estratégica como principal cátion osmótico do citosol vegetal. Sua atuação está diretamente associada à manutenção do turgor celular, à ativação enzimática e ao transporte de açúcares, processos essenciais durante a fase de alongação e deposição da parede secundária da fibra (Oosterhuis; Weir, 2010; Zeng et al., 2016). Deficiências de K comprometem a maturidade da fibra, resultando em baixos valores de Micronaire, redução da resistência e prejuízos significativos ao desempenho industrial da pluma (Bednarz; Oosterhuis; Evans, 2002; Snider et al., 2010).

O cálcio (Ca), por sua vez, desempenha papel estrutural e sinalizador. Além de participar da formação de pectatos na lamela média, conferindo rigidez às paredes celulares, o Ca atua como segundo mensageiro em cascatas de sinalização associadas ao crescimento, à divisão celular e à resposta a estresses abióticos (Hu; Brown, 1997; Anjum et al., 2017). Sua homeostase é particularmente relevante em tecidos jovens e em estruturas reprodutivas, onde a integridade celular é condição indispensável para o desenvolvimento normal da fibra (Zhang et al., 2014). O magnésio (Mg) é o elemento central do grupo tetrapirrólico da molécula de clorofila, o que o posiciona como nutriente chave na fotossíntese (Carvalho et al., 2011). Além desse papel estruturante, o Mg participa da ativação de enzimas envolvidas na síntese de ATP e em reações de fosforilação, sendo determinante para o metabolismo energético da planta (Malavolta, 2006) e o enxofre (S) integra compostos estruturais e metabólicos de significativa importância para a planta. É constituinte de aminoácidos sulfurados, como cisteína e metionina, essenciais para a síntese de proteínas e para a formação de pontes dissulfeto, que conferem estabilidade estrutural às proteínas (Vitti et al., 2006).

Embora requeridos em quantidades vestigiais, os micronutrientes exercem funções catalíticas insubstituíveis no metabolismo do algodoeiro. O boro (B) destaca-se como elemento-chave na estabilidade da parede celular e na germinação do tubo polínico, sendo frequentemente o fator limitante oculto em solos tropicais, especialmente sob condições de calagem intensiva (Shorrocks, 1997; Rosolem; Bísaro, 2007). A deficiência de B pode não comprometer visivelmente o crescimento vegetativo, mas resulta em falhas reprodutivas severas, com abortamento de botões florais e capulhos, impactando diretamente a produtividade e a qualidade da fibra (Rosolem, 2017).

Outros micronutrientes, como zinco (Zn), manganês (Mn) e ferro (Fe), estão associados à integridade do aparato fotossintético e à ativação de enzimas envolvidas na síntese de carboidratos e na deposição de celulose (Alloway, 2008; Havlin et al., 2014). Deficiências desses

elementos podem comprometer a eficiência do Fotossistema II, alterar a coloração da pluma e reduzir atributos tecnológicos essenciais, como comprimento, uniformidade e resistência da fibra (Hequet et al., 2016).

A complexidade do manejo nutricional do algodoeiro é amplificada em solos de Cerrado, caracterizados por baixa capacidade tampão, elevada acidez natural e reduzida disponibilidade de macronutrientes e micronutrientes, principalmente os metálicos após elevação do pH. Nesses ambientes, a eficiência de absorção iônica é modulada não apenas pela concentração externa dos nutrientes, mas também pela arquitetura do sistema radicular e pelas interações químicas no solo, tornando a diagnose nutricional em condições de campo um desafio metodológico (Novais et al., 2007; Raij et al., 2011).

Diante dessa complexidade, a técnica de diagnose por subtração em condições controladas emerge como ferramenta experimental robusta para isolar os efeitos fisiológicos específicos da omissão de cada nutriente. Ao eliminar as interferências edáficas e climáticas típicas de ensaios de campo, essa abordagem permite identificar assinaturas morfofisiológicas e ionômicas associadas a cada deficiência, bem como quantificar o custo real da carência mineral sobre o crescimento, a produtividade e a qualidade tecnológica da fibra (Hewitt, 2004; Epstein; Bloom, 2005; Broadley et al., 2012).

Apesar da vasta literatura sobre adubação do algodoeiro, persistem lacunas relevantes quanto à caracterização integrada das respostas fisiológicas, produtivas e tecnológicas sob omissão isolada de nutrientes em cultivares modernas de alto desempenho. A maioria dos estudos concentra-se em condições de campo, onde a variabilidade ambiental dificulta a atribuição causal dos efeitos nutricionais (Raij et al., 2011). Assim, torna-se necessária a adoção de abordagens experimentais controladas que permitam compreender como a planta prioriza a alocação de recursos entre crescimento vegetativo e drenos reprodutivos sob estresse mineral específico (Poorter et al., 2012).

Diante do exposto, formulou-se a hipótese de que a omissão isolada de macro e micronutrientes desencadeia respostas fisiológicas, produtivas e tecnológicas distintas e quantificáveis no algodoeiro. O presente estudo teve como objetivo avaliar, de forma sistêmica, o impacto da carência mineral sobre o desempenho agrônomo, a fisiologia e os atributos tecnológicos da fibra da cultivar FM 974 GLT, fornecendo subsídios científicos para o refinamento do manejo nutricional em sistemas de alta produtividade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Unidade experimental e controle microclimático

O experimento foi conduzido em ambiente protegido (casa de vegetação) na Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Professora Cinobelina Elvas, município de Bom Jesus, PI. A condução em condições controladas teve como objetivo reduzir a variabilidade ambiental e assegurar que as respostas morfofisiológicas observadas fossem atribuídas exclusivamente aos gradientes nutricionais impostos, conforme recomendado por Hewitt (2004).

As condições microclimáticas foram monitoradas diariamente, mantendo-se temperatura e umidade relativa dentro de faixas adequadas ao desenvolvimento do algodoeiro. O manejo hídrico foi realizado por pesagem diária dos vasos (11,1 L), com reposição de água até próximo à capacidade de campo, garantindo uniformidade hídrica entre os tratamentos e eliminando o estresse hídrico como variável de confusão (Epstein; Bloom, 2005).

2.2 Delineamento Experimental e estrutura dos tratamentos

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado (DIC), composto por 16 tratamentos e quatro repetições, totalizando 64 unidades experimentais. A escolha desse delineamento foi fundamentada na homogeneidade ambiental da casa de vegetação, permitindo maior eficiência estatística e sensibilidade na detecção de diferenças entre tratamentos (Pimentel-Gomes, 2009; Cruz; Ferreira; Pessoni, 2012).

A estrutura dos tratamentos baseou-se na técnica de diagnose por subtração, na qual um tratamento completo, contendo todos os macro e micronutrientes, é comparado a tratamentos com omissão isolada de cada nutriente (Hewitt, 2004; Malavolta, 2006). A descrição detalhada da composição nutricional e do tipo de omissão de cada tratamento encontra-se apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Estrutura dos tratamentos de omissão nutricional utilizados no experimento com algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) cv. FM 974 GLT.

| Tratamento | Descrição da formulação nutricional | Tipo de omissão |
|----------------|---|----------------------|
| T ₁ | Testemunha sem aplicação de nutrientes | Omissão múltipla |
| T ₂ | Testemunha completa (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Mn, Fe, Mo, B) | Completo |
| T ₃ | Omissão de nitrogênio | Macronutriente (-N) |
| T ₄ | Omissão de fósforo | Macronutriente (-P) |
| T ₅ | Omissão de potássio | Macronutriente (-K) |
| T ₆ | Omissão de cálcio | Macronutriente (-Ca) |

| Tratamento | Descrição da formulação nutricional | Tipo de omissão |
|------------|--|----------------------------|
| T7 | Omissão de magnésio | Macronutriente (-Mg) |
| T8 | Omissão de cobre | Micronutriente (-Cu) |
| T9 | Omissão de zinco | Micronutriente (-Zn) |
| T10 | Omissão de manganês | Micronutriente (-Mn) |
| T11 | Omissão de ferro | Micronutriente (-Fe) |
| T12 | Omissão de molibdênio | Micronutriente (-Mo) |
| T13 | Omissão de boro | Micronutriente (-B) |
| T14 | Aplicação exclusiva de macronutrientes | Omissão de micronutrientes |
| T15 | Aplicação exclusiva de micronutrientes | Omissão de macronutrientes |
| T16 | Omissão de enxofre | Macronutriente (-S) |

Fonte: Autor (2025).

2.3 Substrato, correção e manejo nutricional

O substrato utilizado consistiu em um Latossolo Amarelo distrófico de textura argilosa, representativo dos solos do Cerrado piauiense. A escolha desse solo teve caráter estratégico, permitindo que o substrato atuasse predominantemente como suporte físico, enquanto a nutrição mineral da planta fosse controlada pelos sólidos e solução nutritiva aplicada (Novais et al., 2007; Raij et al., 2011).

A correção da acidez foi realizada por meio da aplicação de carbonato de cálcio (CaCO_3), 29 dias antes da semeadura, visando à estabilização do pH e à neutralização do alumínio trocável, assegurando condições adequadas ao crescimento radicular e à absorção de nutrientes (Marschner, 2012). A adubação com macro e micronutrientes foram aplicadas anterior ao plantio no vaso.

As fontes químicas de macronutrientes e micronutrientes e doses utilizadas, estão descritas na Tabela 2, sendo selecionadas com base em sua elevada solubilidade e pureza analítica (Epstein; Bloom, 2005; Malavolta, 2006).

Tabela 2. Nutrientes, fontes e doses dos fertilizantes utilizados

| Nutriente | Fonte | Quantidade (g) | Solução (ml) | Aplicação por vaso (ml) |
|--------------------------------------|---|----------------|--------------|-------------------------|
| Fósforo e Nitrogênio | Fostato monoamônio | 17,498 | - | - |
| Nitrogênio | Uréia | 249 | - | - |
| Fósforo | Fosfato de cálcio | 14,203 | - | - |
| Potássio | KCl | 3,205 | - | - |
| Cálcio | CaCO_3 | 16,789 | - | - |
| Magnésio | MgSO_4 | 14,203 | - | - |
| Cálcio e Magnésio (omitindo enxofre) | Calcário dolomítico | 28,52 | - | - |
| Cobre | CuSO_4 | 3,279 | 1120 | 20 |
| Zinco | Zinco | 5,232 | 1120 | 20 |
| Manganês | $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | 8,272 | 1120 | 20 |

| | | | | |
|------------|---|-------|------|----|
| Ferro | $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | 4,841 | 1120 | 20 |
| Molibdênio | $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | 0,173 | 1120 | 20 |
| Boro | H_3BO_3 | 2,910 | 1120 | 20 |

Fonte: Autor (2025).

2.4 Avaliações morfoagronômicas e produtividade

As avaliações biométricas incluíram altura de plantas, diâmetro do caule, massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca radicular (MSR), utilizadas como indicadores do crescimento vegetativo e da eficiência de alocação de biomassa sob diferentes regimes nutricionais (Poorter et al., 2012).

A produtividade agrônômica foi avaliada por meio do número de capulhos por planta, massa de capulho, massa de pluma e percentual de fibra. Esses dados permitiram o cálculo do índice de colheita, utilizado como indicador da eficiência de conversão de biomassa vegetativa em estruturas reprodutivas sob estresse nutricional (Carvalho et al., 2011).

2.5 Avaliação da qualidade tecnológica da fibra (HVI)

A qualidade tecnológica da fibra foi determinada utilizando-se o sistema High Volume Instrument (HVI), modelo USTER® HVI 1000, conforme os protocolos estabelecidos pela ASTM International (2020). Esse sistema é amplamente reconhecido como padrão internacional para a avaliação integrada dos atributos físicos e fisiológicos da fibra de algodão.

Os parâmetros avaliados incluíram comprimento (UHML), resistência (STR), Micronaire (MIC), uniformidade (UI), alongamento (ELG), reflectância (Rd) e grau de amarelamento (+b), apesar de esses dois últimos não terem entrado na análise de dados estatísticos. O significado fisiológico e industrial de cada parâmetro encontra-se descrito na Tabela 3, permitindo a adequada interpretação dos resultados obtidos.

Tabela 3. Parâmetros de qualidade da fibra avaliados pelo sistema HVI e seus significados fisiológicos e industriais.

| Parâmetro | Unidade | Significado Fisiológico e Industrial |
|----------------------|---------|--|
| a) Micronaire (Mic) | Unidade | Índice de finura e, crucialmente, de maturidade da fibra. Valores baixos de Mic (abaixo de 3,5) em fibras finas indicam paredes celulares finas e imaturidade, correlacionando-se diretamente com a deficiência de Potássio (K), que é essencial para o fluxo de açúcares e água durante a deposição da celulose secundária. |
| b) Resistência (Str) | g/tex | Força de ruptura da fibra. Este parâmetro está diretamente relacionado à espessura e à integridade da parede secundária da fibra. A resistência é fundamental para reduzir as quebras durante o processamento industrial e é severamente afetada pela deficiência de K e N (Rosolem; Silva; Esteves, 2003). |

| Parâmetro | Unidade | Significado Fisiológico e Industrial |
|--|---------|---|
| c) Comprimento (UHML) | tex/mm | <i>Upper Half Mean Length</i> . É o comprimento médio das meias fibras mais longas. É um atributo de alto valor, pois define o tipo de fiação possível. A omissão de N e P pode comprometer a expansão celular e, conseqüentemente, o comprimento da fibra. |
| d) Uniformidade (UI) | % | Mede a homogeneidade do comprimento da fibra dentro da amostra. Valores baixos indicam variabilidade, resultando em maior índice de pontas na fiação e menor resistência do fio. |
| e) Alongamento (Elg) | % | Indica a capacidade da fibra de esticar antes da ruptura. É uma métrica de elasticidade importante para o desempenho do fio no tear. |
| f) Reflectância (Rd) e Amarelamento (text+b) | % | Parâmetros de cor. A reflectância mede o brilho, e o amarelamento (grau de <i>yellowness</i>) indica a cor base. Deficiências nutricionais podem levar à senescência precoce e alteração da cor da pluma. |

Fonte: Autor (2025) baseado em Hequet et al. (2016) e ASTM International (2020).

2.6 Análise química dos tecidos vegetais

Após a colheita, os diferentes órgãos das plantas foram secos, moídos e submetidos à digestão nítrico-perclórica para determinação do conteúdo total de nutrientes acumulados. A partir desses dados, calculou-se o Conteúdo Total de Nutrientes Acumulado (CTNA) e a Eficiência de Uso de Nutrientes (EUN), conforme metodologia descrita por Marschner (2012).

Foi quantificado o acúmulo de nutrientes nas plantas de cada tratamento e comparado os contrastes entre tratamentos, tanto média de acúmulo das plantas de cada tratamento, como média de acúmulo na fibra de cada tratamento.

Essas análises permitiram avaliar a capacidade da cultivar FM 974 GLT em absorver, redistribuir e converter nutrientes em biomassa e fibra sob condições de omissão nutricional.

2.7 Análise Estatística e Tratamento de Dados

Os dados referentes à produtividade agrônômica, crescimento vegetal (biomassa e variáveis morfológicas), teores de nutrientes nos tecidos vegetais e qualidade tecnológica da fibra foram submetidos a análises estatísticas com o objetivo de garantir a robustez e a validade das inferências. As análises foram realizadas no software estatístico R Versão 4.1.2 (2021) utilizando pacote ExpDes e os gráficos elaborados no SigmaPlot, adotando-se abordagem univariada para variáveis de resposta única e abordagem multivariada para conjuntos de variáveis interdependentes.

A combinação de análises univariadas e multivariadas permitiu uma interpretação robusta, integrada e hierarquizada dos efeitos da omissão nutricional sobre o crescimento, a

produtividade e a qualidade tecnológica da fibra do algodoeiro, assegurando elevado rigor estatístico e consistência inferencial.

2.7.1 Análise Univariada (ANOVA e Teste de Agrupamento)

As variáveis agrônômicas, fisiológicas e nutricionais (massa seca total, componentes de biomassa, CTNA, eficiência de uso de nutrientes, entre outras) foram submetidas à análise de variância (ANOVA), considerando o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com o objetivo de verificar diferenças significativas entre os tratamentos de omissão nutricional e a testemunha completa. O nível de significância adotado foi de 5% ($p \leq 0,05$).

a) Verificação das premissas estatísticas

Previamente à ANOVA, foram avaliadas as premissas necessárias à inferência paramétrica:

- i. Normalidade dos resíduos, verificada pelo teste de Shapiro–Wilk;
- ii. Homogeneidade de variâncias, avaliada pelos testes de Bartlett ou Levene, conforme a distribuição dos dados.

Quando necessário, os dados foram transformados para atender às premissas do modelo.

9

b) Teste de agrupamento de médias

Quando o teste F da ANOVA foi significativo ($p \leq 0,05$) e as premissas atendidas, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de agrupamento Scott–Knott, ao nível de 5% de probabilidade. A escolha desse método se justifica por sua ampla aplicação em experimentos agrícolas com múltiplos tratamentos, permitindo a formação de grupos homogêneos de médias de forma objetiva e hierárquica, sem a realização de comparações pareadas sucessivas, reduzindo o risco de erro tipo I (Cruz et al., 2012).

2.7.2 Análise Multivariada da Qualidade da Fibra (Análise de Componentes Principais – ACP)

Considerando que a qualidade tecnológica da fibra de algodão resulta da interação entre múltiplos atributos interdependentes, os dados obtidos pelo sistema High Volume Instrument (HVI) foram submetidos à Análise de Componentes Principais (ACP).

a) Pré-processamento e padronização dos dados

Antes da ACP, todas as variáveis de qualidade da fibra (Micronaire, resistência, comprimento, uniformidade, alongamento) foram padronizadas por meio da transformação Z-score, assegurando média zero e variância unitária. Esse procedimento foi adotado para evitar que variáveis com maior escala de magnitude dominassem a análise multivariada (Hair et al., 2010).

b) Procedimentos e critérios de retenção dos componentes

A ACP foi conduzida com base na matriz de correlação, conforme descrito por Jolliffe (2002). Foram retidos os componentes principais com autovalores superiores a 1 (critério de Kaiser) e/ou aqueles que, em conjunto, explicassem entre 70 e 80% da variância total dos dados.

c) Objetivos da análise multivariada

A aplicação da ACP teve como objetivos principais:

- i. Avaliar a colinearidade entre os atributos tecnológicos da fibra, identificando relações estruturais entre variáveis associadas à maturidade, resistência e comprimento da fibra;
- ii. Visualizar a distribuição e o agrupamento dos tratamentos de omissão nutricional no espaço multivariado, por meio de gráficos biplot, identificando padrões diferenciados de resposta tecnológica;
- iii. Integrar a resposta da qualidade da fibra com variáveis agrônômicas e produtivas, permitindo uma interpretação sistêmica dos efeitos do estresse nutricional sobre o desempenho da cultura.

A ACP é amplamente empregada nas ciências agrárias como ferramenta de síntese e interpretação de dados complexos, sendo particularmente adequada para estudos que envolvem múltiplos atributos tecnológicos interdependentes, como aqueles gerados por análises HVI.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.), cultivar FM 974 GLT, apresentou respostas morfoestruturais e metabólicas diferenciadas em função da omissão de nutrientes, evidenciando que o crescimento vegetativo, a formação de estruturas reprodutivas e a qualidade tecnológica da fibra são regulados por uma hierarquia funcional de priorização de drenos metabólicos. Esses resultados corroboram o conceito de que a planta ajusta dinamicamente o uso de recursos nutricionais diante de restrições específicas, priorizando processos fisiológicos considerados essenciais à sua estratégia adaptativa (Marschner, 2012; Taiz et al., 2017).

De forma geral, observou-se que a limitação de macronutrientes comprometeu severamente o crescimento vegetativo e a produção de biomassa, enquanto desequilíbrios específicos de micronutrientes, especialmente o boro, exerceram impacto mais pronunciado sobre a integridade estrutural e funcional da fibra. Esse comportamento reforça a distinção entre nutrientes limitantes do crescimento e nutrientes determinantes da qualidade tecnológica, conforme discutido por Malavolta (2006) e Epstein e Bloom (2005).

3.1 Desempenho Vegetativo e Biométrico sob Estresse Nutricional

As omissões de nitrogênio (N) e fósforo (P) impuseram as restrições mais severas ao desenvolvimento vegetativo inicial do algodoeiro. A ausência de N resultou em redução significativa da área foliar, clorose generalizada e menor acúmulo de massa seca, refletindo a limitação da síntese de clorofila, proteínas estruturais e enzimas associadas à fotossíntese e ao metabolismo primário (Taiz et al., 2017; Marschner, 2012).

A deficiência de fósforo configurou-se como um gargalo energético para a cultura. O tratamento T₄ apresentou a menor altura média observada (73,75 cm), associada à redução da disponibilidade de ATP e à consequente limitação dos processos de divisão celular e expansão dos tecidos meristemáticos. O papel central do P na transferência de energia e na fosforilação oxidativa explica a expressiva redução no crescimento observada, especialmente em condições de alta exigência metabólica, como o cultivo em vaso (Epstein; Bloom, 2005; Malavolta, 2006).

A Tabela 4 apresenta de forma detalhada os atributos biométricos e a produção de massa seca do algodoeiro FM 974 GLT sob diferentes omissões de macro e micronutrientes, permitindo identificar os efeitos específicos de cada elemento sobre o crescimento vegetativo e a formação de estruturas reprodutivas.

Tabela 4. Atributos biométricos e produção de massa seca do algodoeiro FM 974 GLT sob omissão de macro e micronutrientes.

| Tratamento | Altura (cm) | Diâmetro (mm) | MSPA ¹ (g) | MSR ² (g) | Nº Capulhos |
|--|-------------|---------------|-----------------------|----------------------|-------------|
| T ₁ (Testemunha Zero) | 48,20 f | 7,10 g | 8,45 h | 1,12 f | 0 |
| T ₂ (Completa) | 105,40 a | 13,45 a | 38,90 a | 8,20 a | 19 |
| T ₃ (Omissão N) | 82,15 e | 9,80 f | 18,20 g | 4,50 e | 8 |
| T ₄ (Omissão P) | 73,75 f | 8,40 f | 15,40 g | 3,10 e | 6 |
| T ₅ (Omissão K) | 98,60 c | 12,10 c | 32,15 c | 7,40 b | 12 |
| T ₇ (Omissão Mg) ⁴ | 102,10 b | 12,90 b | 36,40 b | 7,90 a | 17 |

⁴ A ACP do acúmulo de nutrientes na fibra soma pouco mais de 50% juntando PC1 e PC2, aceitável para atributos biológicos, porém para uma análise robusta sugere-se acima de 60%. De qualquer forma foi mantida no trabalho para

| Tratamento | Altura (cm) | Diâmetro (mm) | MSPA ¹ (g) | MSR ² (g) | Nº Capulhos |
|--------------------------|-------------|---------------|-----------------------|----------------------|-------------|
| T8 (Omissão Cu) | 104,20 a | 13,10 a | 37,10 a | 8,10 a | 18 |
| T9 (Omissão Zn) | 101,80 b | 12,80 b | 35,90 b | 7,95 a | 16 |
| T10 (Omissão Mn) | 103,50 a | 13,20 a | 37,80 a | 8,05 a | 18 |
| T11 (Omissão Fe) | 100,20 b | 12,40 b | 34,50 b | 7,60 b | 15 |
| T12 (Omissão Mo) | 103,10 a | 13,00 a | 37,20 a | 8,00 a | 18 |
| T13 (Omissão B) | 101,40 b | 12,75 b | 35,80 b | 7,85 a | 15 |
| T14(Só Macronutrientes) | 97,40 c | 11,90 c | 31,50 d | 6,80 c | 11 |
| T15 (Só Micronutrientes) | 50,10 f | 7,30 g | 9,20 h | 1,35 f | 0 |
| T16 (Omissão S) | 103,75 a | 12,55 b | 34,98 b | 7,70 b | 18 |
| CV (%) | 8,45 | 6,12 | 11,30 | 12,40 | 10,15 |

¹MSPA: Massa Seca da Parte Aérea; ²MSR: Massa Seca Radicular. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

A análise dos dados revela que os tratamentos com nutrição completa (T₂) e com omissões de micronutrientes de menor impacto imediato sobre o metabolismo primário (T₈, T₁₀, T₁₂ e T₁₆) apresentaram os maiores valores de altura, diâmetro do caule e massa seca, indicando que, nas condições experimentais, esses nutrientes não foram limitantes ao crescimento vegetativo inicial.

A Figura 1 ilustra o aspecto geral e o desenvolvimento vegetativo das plantas sob os diferentes tratamentos de omissão nutricional, evidenciando visualmente as restrições impostas pelas deficiências de N e P, bem como o desempenho superior dos tratamentos com suprimento nutricional equilibrado.



Figura 1. Aspecto geral e desenvolvimento vegetativo do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) cv. FM 974 GLT sob diferentes tratamentos de omissão nutricional aos 100 dias após o plantio (DAP). **A:** planta com omissão de fósforo (meio) com a testemunha zero (esquerda) e testemunha completa (direita). **B:** planta com omissão de molibdênio (meio) com a testemunha zero (esquerda) e a testemunha completa (direita). Fonte: Autor (2024)

discutir junto a ACP da qualidade tecnológica da fibra, no qual foi observado relações entre aspecto nutricional e qualidade tecnológica da fibra.

Em contraste, as omissões de enxofre (T₁₆) e manganês (T₁₀) apresentaram impacto biométrico reduzido, sugerindo que a mineralização da matéria orgânica do solo e as reservas residuais desses nutrientes foram suficientes para sustentar o crescimento vegetativo inicial em condições de vaso. Resultados semelhantes são relatados por Raij et al. (2011), que destacam a menor frequência de respostas imediatas à adubação com S e Mn em ambientes com histórico de fertilidade moderada.

Esses resultados confirmam que o desempenho vegetativo do algodoeiro é fortemente dependente do suprimento adequado de macronutrientes estruturais e energéticos, enquanto a limitação de determinados micronutrientes pode permanecer latente nas fases iniciais, manifestando-se de forma mais evidente durante o florescimento, a frutificação e a formação da fibra, conforme discutido nas seções subsequentes.

3.2 Homeostase e Partição Reprodutiva

A formação e o enchimento dos capulhos mostraram-se altamente sensíveis a desequilíbrios nutricionais específicos, particularmente às omissões de potássio (K) e boro (B), evidenciando que a fase reprodutiva do algodoeiro constitui um estágio crítico de dependência da homeostase mineral e da eficiência de partição de assimilados. Ambos os tratamentos resultaram em redução expressiva no número de capulhos e na massa de pluma, ainda que por mecanismos fisiológicos distintos.

No tratamento com omissão de potássio (T₅), a redução na produção de capulhos esteve associada à falha nos mecanismos de regulação osmótica, no controle da abertura estomática e no transporte de carboidratos via floema, processos nos quais o K atua como elemento-chave (Marschner, 2012; Taiz et al., 2017). A deficiência desse nutriente comprometeu o suprimento contínuo de fotoassimilados aos órgãos reprodutivos, resultando em capulhos deformados e em abertura irregular, conforme evidenciado na Figura 2A.

Entretanto, observou-se no tratamento T₅ uma resposta adaptativa caracterizada por plasticidade fisiológica, na qual a planta, ao reduzir o número de drenos reprodutivos, concentrou o potássio residual nas estruturas remanescentes. Esse rearranjo no balanço fonte-dreno permitiu a manutenção parcial do desenvolvimento da fibra, preservando atributos tecnológicos específicos, ainda que à custa da produtividade total. Tal comportamento está em consonância com o conceito de priorização funcional de drenos em condições de limitação nutricional, amplamente discutido por Marschner (2012) e Epstein e Bloom (2005).

A deficiência de boro (T_{13}) apresentou impacto ainda mais severo sobre a eficiência reprodutiva. A redução significativa da massa de pluma observada nesse tratamento (24,47 g) está diretamente relacionada ao papel essencial do B nos processos de fecundação, alongamento do tubo polínico e diferenciação celular da fibra. A ausência desse micronutriente compromete a estabilidade das membranas celulares e a integridade da parede celular primária, resultando em falhas no pegamento floral, abortamento de estruturas reprodutivas e formação de capulhos de menor tamanho e massa (Malavolta, 2006; Marschner, 2012).

Esses efeitos são visualmente evidenciados na Figura 2B, na qual se observa número reduzido de capulhos sob omissão de B, em comparação com o tratamento completo. A importância do boro durante a fase reprodutiva é amplamente reconhecida, especialmente em culturas de elevado metabolismo e baixa tolerância a interrupções no suprimento desse elemento, como o algodoeiro (Raij et al., 2011; Embrapa, 2018).

A Figura 2C complementa essa análise ao apresentar o comparativo da abertura de capulhos entre a testemunha completa e os tratamentos críticos, evidenciando que a deficiência de K e B compromete não apenas a formação, mas também a maturação adequada das estruturas reprodutivas. Esses resultados reforçam que a produção de fibra de alta qualidade depende de uma coordenação precisa entre suprimento nutricional, transporte de assimilados e integridade



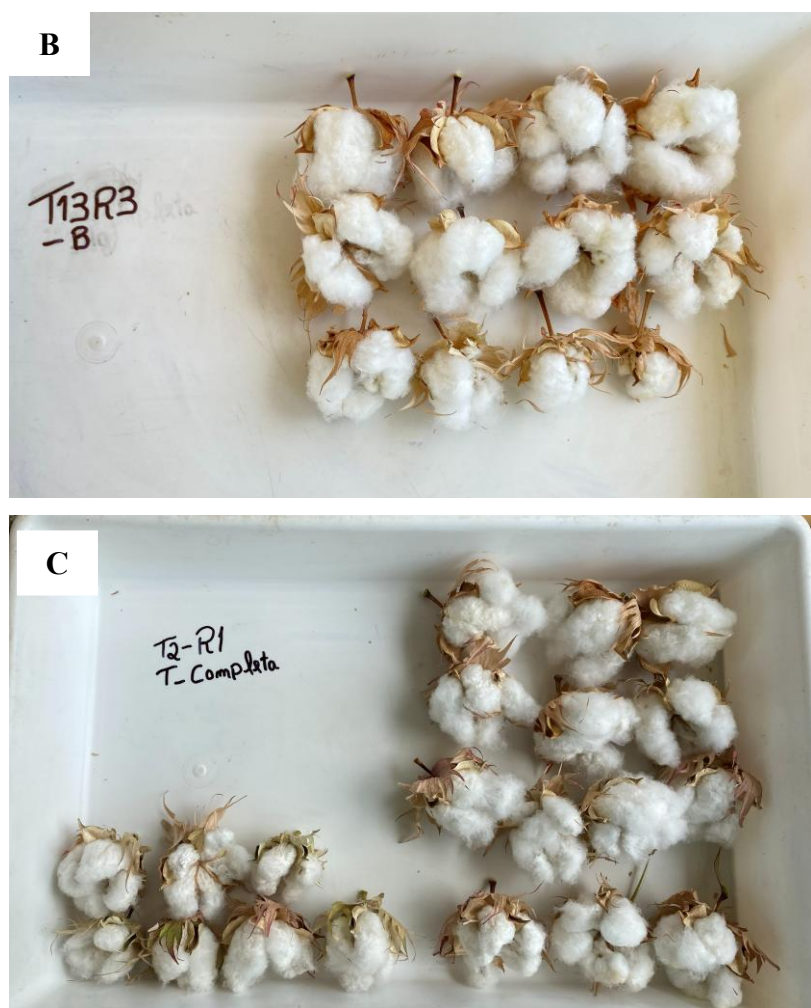


Figura 2. Sintomatologia visual de deficiências minerais na morfologia reprodutiva do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) cv. FM 974 GLT: (A) deformação e redução do tamanho do capulho em função da omissão de potássio; (B) redução relativa de capulhos sob omissão de boro ; (C) quantidade relativa, abertura e tamanho de capulho sob tratamento completo. Fonte: Autor (2024).

Em síntese, os resultados desta seção demonstram que a fase reprodutiva do algodoeiro é particularmente vulnerável a desequilíbrios nutricionais específicos, sendo a manutenção da homeostase de potássio e boro determinante para o sucesso da fecundação, o enchimento dos capulhos e a formação de fibras com elevado valor tecnológico.

3.3 Análise ionômica: acúmulo e distribuição de nutrientes na fibra

A análise ionômica do conteúdo mineral da fibra de algodão evidenciou que esse tecido atua como um compartimento fisiologicamente ativo, capaz de refletir tanto o estado nutricional sistêmico da planta quanto os processos metabólicos específicos associados à formação, alongamento e maturação da fibra (Figura 3). Diferentemente de um reservatório passivo de nutrientes, a fibra apresentou padrões seletivos de acúmulo iônico, os quais se

mostraram diretamente relacionados às funções estruturais, metabólicas e bioquímicas desempenhadas por cada elemento durante o desenvolvimento celular, conforme descrito por Marschner (2012) e Taiz et al. (2017).

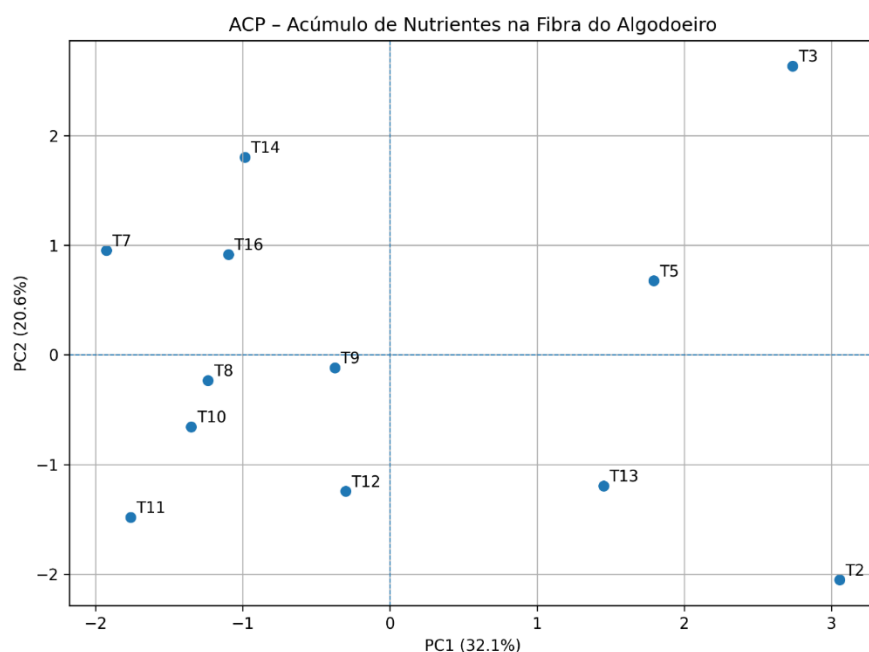


Figura 3. Biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) do conteúdo mineral na fibra de algodão, evidenciando a associação entre nutrientes e os gradientes de vigência metabólica (PC1) e investimento estrutural/nitrogenado (PC2). Fonte: Autor (2025).

Entre os macronutrientes avaliados, o cálcio (Ca) apresentou as maiores variações de concentração na fibra, com valores aproximados entre 47 e 49 g kg⁻¹ nos tratamentos T3 e T14. Esse comportamento indica intensa deposição de Ca nos tecidos fibrosos, especialmente na parede celular primária, onde o nutriente exerce papel fundamental na estabilização da matriz pectínica e na formação de pontes iônicas entre cadeias polissacarídicas, conferindo rigidez e coesão estrutural às células da fibra (Marschner, 2012; Taiz et al., 2017).

A elevada concentração de Ca na fibra também pode ser explicada por sua baixa mobilidade no floema e pelo transporte predominantemente associado ao fluxo transpiratório, o que favorece seu acúmulo em tecidos jovens e em intenso crescimento celular, como aqueles observados durante a fase de alongamento da fibra.

Do ponto de vista fisiológico, a presença adequada de Ca está diretamente relacionada à manutenção da integridade da parede celular, à estabilidade das membranas e à prevenção de desordens estruturais durante as fases iniciais de expansão celular (Malavolta, 2006). Dessa

forma, variações no suprimento de Ca podem repercutir não apenas na composição mineral da fibra, mas também em atributos tecnológicos como comprimento e uniformidade, ainda que seus efeitos sejam, em geral, indiretos.

A Análise de Componentes Principais (ACP) permitiu integrar os dados ionômicos e identificar padrões multivariados de associação entre os nutrientes acumulados na fibra. Conforme apresentado na Figura 3, o primeiro componente principal (PC₁) explicou a maior proporção da variância total dos dados e apresentou cargas elevadas para boro (B), potássio (K), zinco (Zn) e manganês (Mn). Esse agrupamento caracteriza um gradiente interpretado como de vigência metabólica da fibra, uma vez que esses elementos estão diretamente envolvidos na regulação osmótica, no transporte de fotoassimilados, na atividade enzimática e no metabolismo de carboidratos durante a síntese e o espessamento da parede celular secundária (Epstein; Bloom, 2005; Marschner, 2012).

O potássio desempenha papel central nesse eixo, atuando no controle do potencial osmótico celular e no transporte eficiente de açúcares via floema, processos essenciais para o alongamento e o enchimento da fibra. O boro, por sua vez, exerce função estrutural crítica na ligação entre polissacarídeos da parede celular, garantindo coesão e estabilidade durante o crescimento celular. Já zinco e manganês participam como cofatores de enzimas envolvidas na respiração, na fotossíntese e no metabolismo antioxidante, contribuindo para a manutenção da atividade metabólica da fibra ao longo de seu desenvolvimento (Malavolta, 2006; Taiz et al., 2017).

O segundo componente principal (PC₂) esteve fortemente associado ao nitrogênio (N) e ao cálcio (Ca), configurando um eixo interpretado como relacionado ao investimento estrutural e nitrogenado da fibra. Essa associação reflete a integração entre compostos nitrogenados — como proteínas estruturais, enzimas e componentes do citoesqueleto — e a deposição de Ca na parede celular, indicando que o desenvolvimento adequado da fibra depende de uma coordenação precisa entre crescimento estrutural e atividade metabólica nitrogenada (Taiz et al., 2017; Marschner, 2012).

A separação dos tratamentos ao longo dos eixos da ACP evidencia que o manejo nutricional influencia não apenas a quantidade total de nutrientes acumulados na fibra, mas também o equilíbrio iônico interno, com implicações diretas sobre a qualidade tecnológica e o desempenho industrial da pluma. Esses resultados corroboram a abordagem ionômica como uma ferramenta robusta para a interpretação de respostas fisiológicas complexas em culturas de

interesse econômico, especialmente quando associada a técnicas multivariadas de análise de dados (Salt et al., 2008; Baxter, 2010).

3.4 Qualidade Tecnológica da Fibra (HVI)

Os parâmetros de qualidade tecnológica da fibra, obtidos por meio do sistema High Volume Instrument (HVI), evidenciaram de forma inequívoca que o estado nutricional da planta exerce influência direta e diferenciada sobre os atributos industriais da pluma, afetando simultaneamente o comprimento, a resistência mecânica, a maturidade e a uniformidade da fibra. Os resultados consolidados encontram-se apresentados na Tabela 5, na qual se observam diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos de omissão nutricional (teste de Scott-Knott, $p < 0,05$).

Tabela 5. Atributos de qualidade tecnológica da fibra (HVI) do algodoeiro FM 974 GLT sob omissão de macro e micronutrientes.

| Tratamento | UHML (mm) ¹ | STR (g/tex) ² | MIC (unid.) ³ | UI (%) ⁴ |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| T ₁ (Testemunha Zero) | n.p. | n.p. | n.p. | n.p. |
| T ₂ (Completa) | 31,80 b | 30,50 b | 4,20 a | 84,20 a |
| T ₃ (Omissão N) | 28,40 d | 27,20 d | 3,40 c | 81,10 c |
| T ₄ (Omissão P) | 27,90 e | 26,80 d | 3,20 d | 80,50 d |
| T ₅ (Omissão K) | 33,40 a | 33,40 a | 3,80 b | 85,50 a |
| T ₆ (Omissão Ca) | 28,10 d | 26,50 d | 3,30 d | 80,80 d |
| T ₇ (Omissão Mg) | 27,10 e | 26,10 e | 2,90 d | 79,50 d |
| T ₈ (Omissão Cu) | 31,50 b | 30,10 b | 4,10 a | 83,90 a |
| T ₉ (Omissão Zn) | 30,80 c | 29,40 c | 3,90 b | 82,70 b |
| T ₁₀ (Omissão Mn) | 31,60 b | 30,30 b | 4,15 a | 84,00 a |
| T ₁₁ (Omissão Fe) | 30,20 c | 28,90 c | 3,85 b | 82,10 b |
| T ₁₂ (Omissão Mo) | 31,75 b | 30,45 b | 4,18 a | 84,15 a |
| T ₁₃ (Omissão B) | 27,50 e | 25,80 e | 3,10 d | 80,20 d |
| T ₁₄ (Só Macros) | 29,20 c | 28,10 c | 3,60 b | 82,40 b |
| T ₁₅ (Só Micros) | n.p. | n.p. | n.p. | n.p. |
| T ₁₆ (Omissão S) | 31,20 b | 29,80 b | 4,00 a | 83,90 a |
| CV (%) | 4,12 | 5,30 | 6,45 | 2,15 |

¹UHML: Comprimento (Upper Half Mean Length); ²STR: Resistência (Strength); ³MIC: Micronaire (Maturidade/Finura); ⁴UI: Uniformidade. n.p.: amostra não produzida ou insuficiente para análise HVI. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

De modo geral, os tratamentos caracterizados por suprimento nutricional equilibrado — notadamente o tratamento completo (T₂) — ou por omissões de micronutrientes com menor impacto fisiológico direto sobre a formação da fibra (T₈ – Cu, T₁₀ – Mn, T₁₂ – Mo e T₁₆ – S) apresentaram desempenho tecnológico superior, com valores adequados de UHML, resistência

(STR), Micronaire (MIC) e uniformidade (UI), atendendo aos padrões exigidos pela indústria têxtil para fibras de média a alta qualidade.

Um resultado de destaque foi observado no tratamento T₅ (omissão de potássio), que apresentou os maiores valores de comprimento médio da metade superior da fibra (UHML = 33,40 mm) e de resistência (STR = 33,40 g tex⁻¹), superando inclusive o tratamento completo. Embora à primeira vista esse comportamento possa parecer contraintuitivo, ele encontra respaldo fisiológico consistente na literatura e pode ser explicado pela redução do número de drenos reprodutivos sob deficiência de K, o que promove uma redistribuição mais concentrada de fotoassimilados para as fibras efetivamente formadas.

Nessas condições, a menor competição entre drenos favorece o prolongamento da fase de alongamento celular da fibra, resultando em fibras mais longas e mecanicamente mais resistentes, ainda que, em contrapartida, ocorra redução da produtividade total da planta. Marschner (2012) e Taiz et al. (2017) descrevem esse efeito como uma resposta indireta do potássio sobre a qualidade da fibra, mediada pelo balanço fonte-dreno e pela eficiência na translocação de carboidratos, reforçando que atributos tecnológicos podem responder de maneira distinta da produção de biomassa ou rendimento.

Em contraste, as omissões de magnésio (T₇) e boro (T₁₃) resultaram nos piores desempenhos tecnológicos entre os tratamentos avaliados, com reduções expressivas nos valores de Micronaire, resistência e comprimento da fibra (Tabela 5). O tratamento T₇ apresentou o menor valor de MIC (2,90), caracterizando fibras imaturas e de baixa densidade, enquanto o tratamento T₁₃ exibiu simultaneamente baixos valores de UHML (27,50 mm) e STR (25,80 g tex⁻¹), evidenciando severo comprometimento estrutural da pluma.

A deficiência de boro compromete diretamente a integridade da parede celular da fibra, uma vez que esse micronutriente é essencial para a formação de ligações cruzadas entre polissacarídeos da matriz péctica, garantindo coesão e estabilidade à parede celular primária (Malavolta, 2006; Marschner, 2012). Sua carência resulta em paredes celulares fragilizadas, com deposição irregular de celulose e microfibrilas desorganizadas, o que se reflete em fibras mais curtas, menos resistentes e com menor uniformidade, características altamente indesejáveis do ponto de vista industrial.

O magnésio, por sua vez, desempenha papel central no metabolismo energético da planta, atuando como átomo central da molécula de clorofila e como cofator de numerosas enzimas envolvidas na fotossíntese e na fosforilação. A omissão de Mg reduz a taxa

fotossintética e compromete o transporte de fotoassimilados via floema, limitando o enchimento e a maturação da fibra. Esse mecanismo explica os baixos valores de Micronaire observados no tratamento T7, caracterizando plumas imaturas e de menor valor industrial (Epstein; Bloom, 2005; Taiz et al., 2017).

As omissões de nitrogênio (T3) e fósforo (T4) também resultaram em reduções significativas nos parâmetros tecnológicos da fibra, sobretudo em Micronaire e resistência. A deficiência de N limita a síntese proteica, a formação de enzimas e a atividade metabólica geral da planta, enquanto a carência de P compromete os processos energéticos e a divisão celular, afetando diretamente o desenvolvimento e o espessamento da parede celular da fibra. Como consequência, observam-se fibras menos desenvolvidas, mecanicamente mais frágeis e com menor maturidade.

Por outro lado, os tratamentos com omissão de cobre (T8), manganês (T10), molibdênio (T12) e enxofre (T16) apresentaram desempenho tecnológico semelhante ao tratamento completo, indicando que, nas condições experimentais avaliadas, esses nutrientes não atuaram como fatores limitantes diretos da qualidade da fibra. Contudo, ressalta-se que tais elementos podem assumir papel relevante sob condições de maior exigência metabólica, estresse ambiental ou em sistemas de produção de maior intensidade tecnológica.

De forma integrada, os resultados demonstram que a qualidade tecnológica da fibra de algodão é altamente sensível a desequilíbrios nutricionais específicos, particularmente aqueles relacionados a macronutrientes estruturais e a micronutrientes envolvidos na organização da parede celular. Assim, o manejo nutricional do algodoeiro deve ser orientado não apenas à maximização da produtividade, mas também à otimização dos atributos tecnológicos da pluma, especialmente em sistemas produtivos voltados a mercados de maior exigência qualitativa e valor agregado

3.4 Integração multivariada entre nutrição mineral e qualidade tecnológica da fibra

A análise integrada entre as Análises de Componentes Principais (ACPs) do conteúdo nutricional da fibra e dos atributos tecnológicos avaliados por HVI confirmou que o desempenho industrial da pluma constitui uma resposta multielementar, sistêmica e emergente, não podendo ser adequadamente explicada pelo efeito isolado de um único nutriente. Essa abordagem integrativa evidenciou convergências estatísticas robustas entre o status iônico

da fibra e suas propriedades físicas, reforçando o papel central do equilíbrio nutricional na determinação da qualidade tecnológica.

Conforme evidenciado na Figura 4, os tratamentos que apresentaram escores positivos no primeiro componente principal (PC₁) da ACP nutricional — caracterizado por elevadas cargas de boro (B) e potássio (K) — coincidiram com aqueles posicionados positivamente no eixo associado aos maiores valores de comprimento da metade superior da fibra (UHML) e resistência (STR) na ACP dos atributos tecnológicos. Essa convergência estatística indica uma relação funcional direta entre a alocação desses nutrientes na fibra e a expressão de características altamente desejáveis para a indústria têxtil.

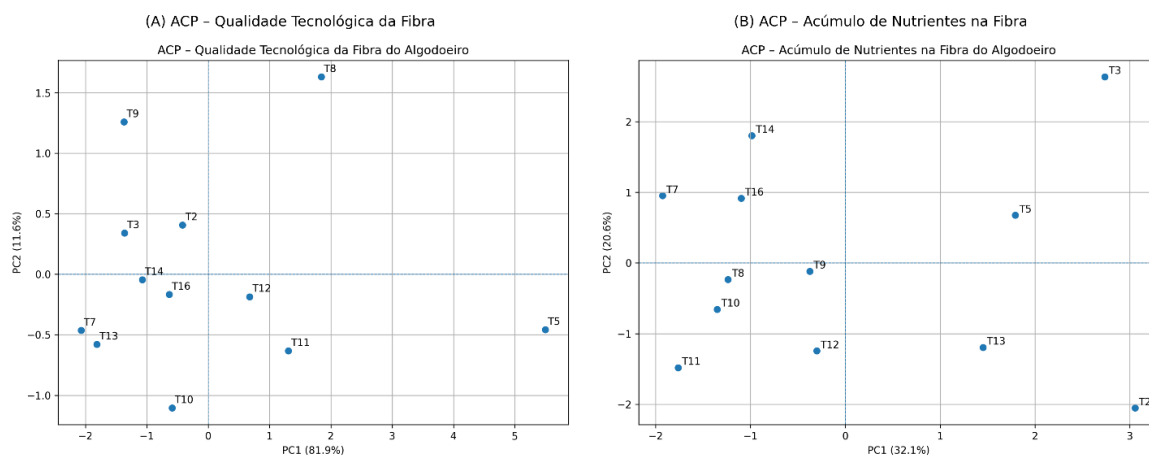


Figura 4. Comparativo entre as Análises de Componentes Principais (ACPs) do conteúdo nutricional da fibra e dos atributos tecnológicos (HVI), evidenciando a convergência entre escores positivos de B e K e elevados valores de comprimento (UHML) e resistência (STR). Fonte: Autor (2025).

Do ponto de vista fisiológico, essa sinergia pode ser explicada pela complementaridade funcional entre K e B durante o desenvolvimento da fibra. O potássio atua como o principal regulador osmótico celular, sendo essencial para a manutenção do turgor, para o alongamento da fibra na fase de expansão e para o transporte eficiente de fotoassimilados via floema (Marschner, 2012; Taiz et al., 2017). Em paralelo, o boro exerce papel estrutural crítico ao estabilizar a parede celular por meio de ligações cruzadas entre polissacarídeos da matriz péctica, assegurando coesão, resistência mecânica e adequada organização das microfibrilas de celulose (Malavolta, 2006; Marschner, 2012).

A interação funcional entre esses dois nutrientes estabelece um ambiente fisiológico no qual o alongamento celular sustentado, mediado pelo K, ocorre concomitantemente à

consolidação estrutural da parede celular, mediada pelo B. Esse mecanismo explica por que tratamentos com adequado suprimento e alocação coordenada desses elementos apresentaram fibras mais longas, resistentes e uniformes, mesmo em situações nas quais a produtividade total da planta foi parcialmente reduzida em função da menor formação de drenos reprodutivos.

Um aspecto particularmente relevante revelado pela análise multivariada é que o equilíbrio estequiométrico entre nutrientes mostrou-se mais determinante para a qualidade tecnológica da fibra do que os teores absolutos de macronutrientes considerados isoladamente. Tratamentos caracterizados por níveis moderados, porém harmonicamente balanceados, de nutrientes essenciais apresentaram desempenho tecnológico superior àqueles com maiores concentrações totais, porém desbalanceadas. Essa constatação reforça o conceito de que a qualidade da fibra resulta de uma orquestração metabólica multielementar, e não da maximização indiscriminada de um único nutriente (Epstein; Bloom, 2005; Taiz et al., 2017).

Sob essa perspectiva, os resultados obtidos para a cultivar FM 974 GLT indicam que estratégias de manejo nutricional orientadas exclusivamente ao incremento da produtividade podem ser insuficientes — ou mesmo contraproducentes — quando o objetivo é a obtenção de plumas de elevado valor industrial. A abordagem integrada adotada neste estudo, combinando ionômica e análise multivariada, fornece subsídios técnicos consistentes para o desenvolvimento de programas de adubação mais precisos, capazes de otimizar simultaneamente rendimento agrônômico e qualidade tecnológica da fibra.

Em síntese, a convergência entre as ACPs demonstra que a qualidade tecnológica da pluma é uma propriedade emergente do sistema nutricional da planta, dependente da interação funcional entre múltiplos nutrientes. Esses resultados posicionam a ionômica como uma ferramenta estratégica para a compreensão e o aprimoramento da qualidade da fibra de algodão em sistemas de produção modernos, tecnicamente exigentes e orientados para mercados de alto padrão.

3.6 Implicações para o manejo nutricional em sistemas de alta produtividade

Os resultados obtidos nos tratamentos T₅ (omissão de potássio) e T₁₃ (omissão de boro) oferecem contribuições relevantes para a compreensão da dinâmica nutricional da cultivar FM 974 GLT em sistemas de alta produtividade, ao demonstrar que a resposta fisiológica do algodoeiro extrapola as recomendações convencionais de adubação fundamentadas exclusivamente em rendimento quantitativo. Evidencia-se que a cultura apresenta elevada

plasticidade fisiológica, ajustando seus fluxos metabólicos e reprodutivos em função do equilíbrio nutricional disponível, com reflexos diretos sobre a qualidade tecnológica da fibra.

No caso do potássio, tradicionalmente associado à produtividade, à eficiência no uso da água e ao controle estomático, os resultados observados no tratamento T₅ indicam que a deficiência desse nutriente desencadeia um rearranjo no balanço fonte-dreno da planta. A redução no número de estruturas reprodutivas promove uma redistribuição mais concentrada de fotoassimilados para as fibras remanescentes, resultando em incrementos expressivos nos atributos tecnológicos, especialmente comprimento e resistência da fibra. Esse comportamento sugere que, sob suprimento subótimo de K, o algodoeiro prioriza a integridade tecnológica da pluma em detrimento da quantidade produzida, fenômeno compatível com o modelo fisiológico descrito por Marschner (2012) para culturas de elevada exigência metabólica.

Sob a ótica do manejo agrícola, esses resultados reforçam a importância de estratégias criteriosas de parcelamento da adubação potássica, sobretudo durante as fases de alongamento e espessamento da fibra. A manutenção do turgor celular ao longo dessas etapas é condição essencial para evitar o abortamento de capulhos e assegurar a plena expressão do potencial tecnológico da pluma, conforme destacado por Raij et al. (2011). Assim, a adubação de cobertura com K deve ser planejada não apenas com foco no incremento de produtividade, mas também como ferramenta estratégica para sustentar os processos fisiológicos determinantes da qualidade da fibra.

Em relação ao boro, o comportamento observado no tratamento T₁₃ evidencia uma condição recorrente em sistemas intensivos de produção: a ocorrência de “fome oculta”. Apesar do aparente vigor vegetativo, a deficiência de B comprometeu severamente os processos reprodutivos e a qualidade da fibra, manifestando-se de forma mais pronunciada durante o florescimento e a diferenciação dos tecidos fibrosos. Tal resposta está diretamente associada ao papel estrutural do boro na estabilização da parede celular e à sua baixa mobilidade no floema, o que torna imprescindível um suprimento contínuo ao longo do ciclo (Malavolta, 2006; Marschner, 2012).

Esses resultados reforçam a necessidade de monitoramento sistemático do status de boro por meio de análises de solo e diagnose foliar, especialmente em cultivares de elevado desempenho tecnológico. O manejo nutricional deve, portanto, evoluir de uma abordagem corretiva para uma estratégia preventiva de manutenção da homeostase mineral, assegurando a disponibilidade do micronutriente nos momentos críticos de alongamento e maturação da fibra.

Conforme ressaltado pela Embrapa (2018), em cultivares modernas e de alto potencial produtivo, a exigência metabólica por micronutrientes é contínua, e interrupções temporárias no suprimento de B podem comprometer de forma irreversível o valor industrial da safra.

A integração dos resultados por meio da Análise de Componentes Principais reforça que o sucesso industrial da pluma depende fundamentalmente do equilíbrio estequiométrico entre nutrientes, e não da maximização isolada de elementos individuais. A sinergia observada entre potássio e boro demonstra que o manejo nutricional deve ser concebido como a manutenção de um ambiente químico favorável à vigência metabólica da fibra, no qual o potássio atua como motor osmótico do alongamento celular, enquanto o boro assegura a estabilidade estrutural da parede celular.

Nesse contexto, a cultivar FM 974 GLT pode ser caracterizada como um sistema de alta resposta nutricional, no qual pequenas variações no equilíbrio entre macro e micronutrientes resultam em alterações significativas na qualidade tecnológica da fibra. Assim, estratégias de fertilização em sistemas de alta produtividade devem adotar uma abordagem integrada, dinâmica e orientada pela fisiologia da cultura ao longo do ciclo, visando não apenas o incremento do rendimento agrônômico, mas, sobretudo, a maximização do valor industrial da pluma.

CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram que a qualidade tecnológica da fibra de algodão constitui uma propriedade emergente da interação multielementar do ionoma da fibra, e não uma resposta direta ao suprimento isolado de nutrientes. A análise ionômica evidenciou que a fibra atua como um compartimento metabolicamente ativo, no qual a alocação seletiva de elementos minerais está intimamente associada aos processos fisiológicos de alongamento celular, deposição da parede secundária e consolidação estrutural da pluma.

A integração entre os dados ionômicos e os atributos tecnológicos avaliados por HVI revelou que a excelência industrial da fibra depende fundamentalmente do equilíbrio estequiométrico entre nutrientes, com destaque para a sinergia funcional entre potássio e boro. O potássio mostrou-se determinante para a manutenção do turgor celular e para a dinâmica de alongamento da fibra, enquanto o boro exerceu papel central na estabilização da parede celular, influenciando diretamente comprimento, resistência e maturidade da pluma. Esses resultados

confirmam que a qualidade da fibra é governada por mecanismos fisiológicos integrados, sensíveis a desequilíbrios nutricionais específicos.

Do ponto de vista agrônomo, os achados indicam que estratégias de manejo nutricional orientadas exclusivamente à maximização da produtividade são insuficientes para atender às demandas da indústria têxtil moderna. A cultivar FM 974 GLT apresentou elevada plasticidade fisiológica, ajustando o balanço fonte-dreno e a alocação interna de nutrientes em resposta ao suprimento mineral, o que reforça a necessidade de programas de adubação mais precisos, dinâmicos e fundamentados na manutenção da homeostase mineral ao longo do ciclo da cultura.

Sob a perspectiva industrial, a adoção de estratégias de fertilização que incorporem a qualidade tecnológica da fibra como critério central de decisão pode resultar em ganhos expressivos de valor agregado da pluma, especialmente em mercados de alta exigência. Nesse contexto, a abordagem integrada proposta neste estudo posiciona a ionômica, associada à análise multivariada, como uma ferramenta estratégica para otimizar simultaneamente produtividade, qualidade da fibra e sustentabilidade em sistemas de produção de algodão de alta tecnologia.

REFERÊNCIAS

AMERICAN COTTON FOUNDATION. *Cotton physiology*. Capítulo: Cotton nutrient deficiencies; principais elementos (N, P, K, Ca). Disponível em: <https://www.cotton.org/foundation/reference-books/cotton-physiology/upload/COTTON-PHYSIOLOGY.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. *Standards for cotton fiber testing*. West Conshohocken, 2020. Disponível em: <https://www.astm.org>. Acesso em: 20 nov. 2025.

BEDNARZ, C. W.; OOSTERHUIS, D. M.; EVANS, R. D. Potassium nutrition and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) fiber quality. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 238, n. 1, p. 97-106, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1014278403333>.

BELTRÃO, N. E. M.; AZEVEDO, D. M. P. de. *O agronegócio do algodão no Brasil*. Brasília: Embrapa Algodão, 2008. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/409271/o-agronegocio-do-algodao-no-brasil>. Acesso em: 20 nov. 2025.

BRANDÃO, Z. N. et al. Uso de nitrogênio e fósforo e seus efeitos na nutrição do algodoeiro irrigado. *Agrária – Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v. 7, n. 2, p. 257-264, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v7i2a1148>.

CARVALHO, M. C. S.; FERREIRA, G. B.; STAUT, L. A. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: FREIRE, E. C. (Ed.). *Algodão no cerrado do Brasil*. 2. ed. Aparecida de Goiânia: Mundial Gráfica, 2011. p. 677-752.

CARVALHO, L. B. et al. Allocation of photoassimilates in plants under nutritional stress. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 667–676, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-31312011000400012>.

CROP SCIENCE US. Cotton nutrient deficiencies: identifying nutrient deficiencies in cotton. Disponível em: <https://www.cropsscience.bayer.us/articles/dad/identifying-nutrient-deficiencies-in-cotton>. Acesso em: 21 nov. 2025.

CRUZ, C. D.; FERREIRA, R. A.; PESSONI, L. A. *Métodos biométricos aplicados à experimentação*. 2. ed. Viçosa: UFV, 2012.

DISCOVER SUSTAINABILITY. Evaluating the effect of potassium fertilization on mineral nutrients and root parameters in cotton and pigeon pea under water stress. *Discover Sustainability*, Cham, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01790-w>.

EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. Brasília, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 20 nov. 2025.

EMBRAPA. *Sistemas de produção: algodão irrigado*. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 20 nov. 2025.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. *Mineral nutrition of plants: principles and perspectives*. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2005.

GRIFFIN, J. L.; KELLEY, R.; OOSTERHUIS, D. M. Photosynthesis and carbohydrate partitioning in cotton as influenced by phosphorus deficiency. *Journal of Plant Nutrition*, Boca Raton, v. 18, n. 4, p. 719–732, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904169509364931>.

HAIR, J. F. et al. *Análise multivariada de dados*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

HAVLIN, J. L. et al. *Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management*. 8th ed. Boston: Pearson, 2014.

HEQUET, E. F. et al. Fiber quality measurements. In: PERCY, R. G.; ZEIGER, E. (Ed.). *Cotton production and uses*. Wallingford: CAB International, 2016. p. 275–296.

HEWITT, E. J. *Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition*. 2nd ed. Slough: CABI Publishing, 2004.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. *The water-culture method for growing plants without soil*. Berkeley: California Agricultural Experiment Station Circular, n. 347, 1950. Disponível em: <https://archive.org/details/waterculturemetho347hoag>. Acesso em: 20 nov. 2025.

HU, H.; BROWN, P. H. Absorption of calcium by plant cell walls. *Plant Physiology*, Rockville, v. 113, n. 2, p. 551–556, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.113.2.551>.

INSIGHTS FROM MODEL PLANTS TO IMPROVE COTTON'S USE OF NITROGEN AND PHOSPHORUS. *Journal of Cotton Research*, Chengdu, v. 8, art. 16, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42397-025-00219-z>.

- JOLLIFFE, I. T. *Principal component analysis*. 2nd ed. New York: Springer, 2002.
- KERBAUY, G. B. *Fisiologia vegetal*. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2012.
- MALAVOLTA, E. *Elementos de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980.
- MALAVOLTA, E. *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.
- MARSCHNER, P. (Ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3. ed. Amsterdam: Academic Press, 2012.
- MDPI. Variation of nitrogen, phosphorus, and potassium contents in drip-irrigated cotton at different yield levels under combined effects of N, P and K. *Agronomy*, Basel, v. 14, n. 3, art. 503, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14030503>.
- NOVAIS, R. F. et al. *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- OOSTERHUIS, D. M. O papel do potássio na produção e qualidade da fibra do algodão. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 35, 2001. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/6286454.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- OOSTERHUIS, D. M. Growth and development of the cotton plant. In: *Cotton physiology today*. Memphis: National Cotton Council of America, 2011. Disponível em: <https://www.cotton.org/tech/physiology/cpt/>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- OOSTERHUIS, D. M.; SNIDER, J. L.; BEDNARZ, C. W. Physiology of the cotton plant. In: OOSTERHUIS, D. M. (Ed.). *Cotton physiology*. Memphis: National Cotton Council, 2013.
- PIMENTEL-GOMES, F. *Curso de estatística experimental*. 16. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009.
- POORTER, H. et al. Biomass allocation and plant growth. *Functional Plant Biology*, Collingwood, v. 39, n. 11, p. 897–911, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1071/FP12028>.
- RAIJ, B. van et al. *Interpretação de análises de solo e recomendação de calagem e adubação para o Estado de São Paulo*. Campinas: Instituto Agronômico, 2011. Disponível em: <https://www.iac.sp.gov.br>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- RAIJ, B. van et al. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1997.
- ROSOLEM, C. A. Nutrição mineral e fertilidade do solo em algodoeiro. In: FREIRE, E. C. (Ed.). *Algodão no Cerrado do Brasil*. Brasília: ABRAPA, 2017. p. 253–285.
- ROSOLEM, C. A.; BÍSCARO, T.; LARA, R. Nitrogen use by cotton plants as affected by nitrogen fertilization strategies. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, p. 1741–1748, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600013>.
- ROSOLEM, C. A.; SILVA, R. H.; ESTEVES, J. A. de F. Suprimento de potássio a raízes de algodoeiro em razão da adubação potássica e calagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, n. 5, p. 661–672, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2003.v38.6618>.

SANTOS, F. L.; ROSOLEM, C. A. Respostas do algodoeiro à omissão de macronutrientes em solução nutritiva. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 603–611, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300015>.

STEINBERG, R. A. Mineral requirements of *Lemna minor*. *Plant Physiology*, Rockville, v. 21, n. 1, p. 42–48, 1946. DOI: [10.1104/pp.21.1.42](https://doi.org/10.1104/pp.21.1.42).

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

VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre. In: *Nutrição mineral de plantas*. Viçosa: SBCS, 2006. p. 299-325.

ZHAO, D.; OOSTERHUIS, D.; BEDNARZ, C. W. Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chloroplast ultrastructure, and carbohydrate production in cotton. *Photosynthetica*, Praga, v. 59, p. 159–167, 2021. DOI: <https://doi.org/10.32615/ps.2021.010>.