

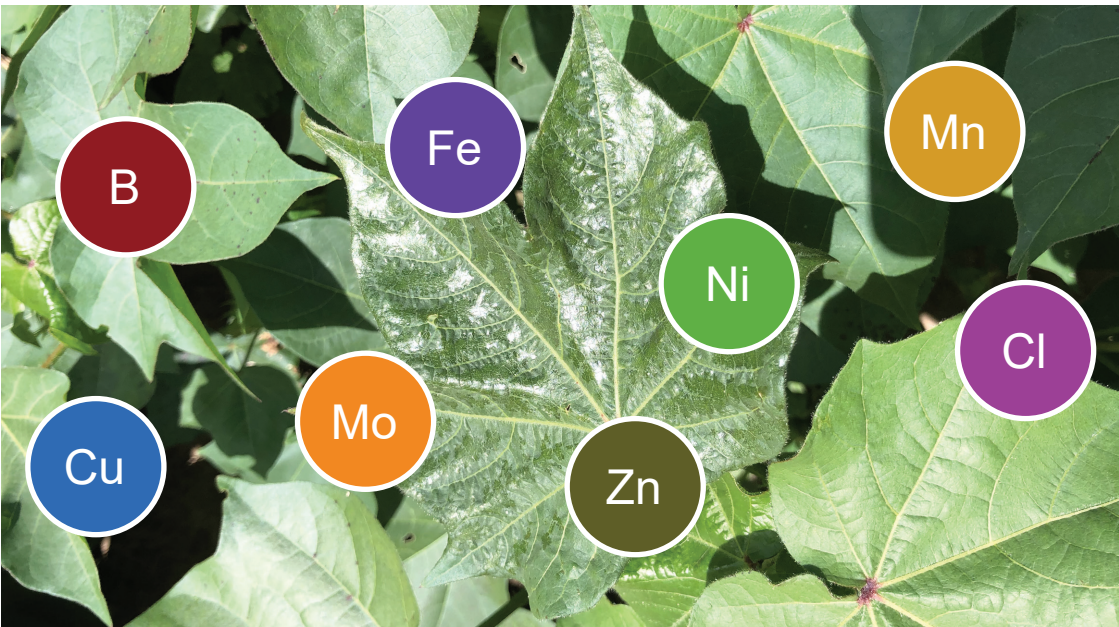
Campina Grande, PB / Março, 2024

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

12 CONSUMO E PRODUÇÃO RESPONSÁVEIS



Micronutrientes na agricultura



Embrapa

Algodão

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Algodão
Ministério da Agricultura e Pecuária**

e-ISSN 2966-0343

Documentos 297

Março, 2024

Micronutrientes na agricultura

Magna Maria Macedo Nunes Costa

Embrapa Algodão
Campina Grande, PB
2024

Embrapa Algodão

Rua Osvaldo Cruz, 1.143, Centenário
58428-095, Campina Grande, PB
www.embrapa.br/algodao
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Daniel da Silva Ferreira

Secretária-executiva

Magna Maria Macedo Nunes Costa

Membros

Francisco José Correia Farias

Luiz Paulo de Carvalho

Nair Helena Castro Arriel

Rita de Cássia Cunha Saboya

Geraldo Fernandes de Sousa Filho

Edição executiva

Geraldo Fernandes de Sousa Filho

Revisão de texto

Marcela Bravo Esteves

Normalização bibliográfica

Enyomara Lourenço Silva

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Geraldo Fernandes de Sousa Filho

Foto da capa

Tarcisio Marcos de Souza Gondim

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Algodão

Costa, Magna Maria Macedo Nunes.

Micronutrientes na Agricultura / Magna Maria Macedo Nunes Costa. - Campina Grande : Embrapa Algodão, 2024.

PDF (44 p.) : il. color. – (Documentos / Embrapa Algodão, e-ISSN 2966-0343 ; 297)

1. Nutrição de vegetal. 2. Adubação. 3. Insumo. 4. Solo - Minerais. 5. Composto orgânico. 6. Manejo. I. Embrapa Algodão. II. Título. III. Série.

CDD (21. ed.) 631.81

Enyomara Lourenço Silva (CRB-4/1569)

© 2024 Embrapa

Autora

Magna Maria Macedo Nunes Costa

Engenheira-agrônoma, doutora em Nutrição Mineral de Plantas,
pesquisadora da Embrapa Algodão, PB

Apresentação

A pesquisa agropecuária brasileira visando à sustentabilidade tem o objetivo de desenvolver sistemas de plantio que sejam economicamente rentáveis, ambientalmente saudáveis e socialmente justos. Nessa perspectiva, a fertilidade do solo se constitui em um importante fator de produção que, se bem planejado e executado, contribui para o sucesso das nossas lavouras. Em se tratando de nutrição mineral, as plantas necessitam retirar do solo 16 elementos considerados essenciais ao crescimento e à produção. Seis deles – nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre –, por serem exigidos em maiores proporções, na magnitude de g kg^{-1} de matéria seca vegetal, têm sido amplamente pesquisados na Embrapa, culminando na produção de vastas publicações a respeito do tema. Os 8 restantes – boro, cloro, ferro, manganês, cobre, zinco, molibdênio e níquel –, talvez por serem exigidos em menores proporções, na magnitude de mg kg^{-1} , não têm tido a participação necessária no portfólio de pesquisas da empresa.

Nesse Documento, serão encontradas informações a respeito das funções de cada um dos oito micronutrientes, dos sintomas de deficiência e excesso desses elementos nas plantas cultivadas, das suas fontes e das melhores formas de aplicação. Entretanto, mais do que isso, essa publicação é um incentivo para que a temática "micronutrientes na agricultura" se torne cada vez mais inclusa nos projetos de pesquisa em solos e nutrição de plantas. Temas como desenvolvimento de novos métodos de aplicação, veículos apropriados para o seu fornecimento, nutrição com micronutrientes e resistência de plantas a fitopatógenos, utilização do melhoramento convencional e da biotecnologia para o desenvolvimento de materiais que tenham maior eficiência nutricional para esses elementos e manejo de micronutrientes em sistemas de produção de base ecológica e/ou familiar se prestam muito bem como base para que o agronegócio brasileiro se torne cada vez mais competitivo. A publicação está alinhada com a agenda 2030 através do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nº 12 – Produção e Consumo Sustentáveis.

Nair Helena Castro Arriel
Chefe-Geral da Embrapa Algodão

Sumário

Introdução	9
Funções dos micronutrientes	12
Boro	12
Cloro	13
Ferro	14
Manganês	15
Cobre	16
Zinco	17
Molibdênio	18
Níquel	18
Sintomas de deficiência e excesso de micronutrientes	19
Boro	19
Cloro	20
Ferro	21
Manganês	23
Cobre	24
Zinco	25
Molibdênio	27
Níquel	29
Fonte de micronutrientes	29
Óxidos	29

Sulfatos	30
Oxi-sulfatos	30
Fritas	31
Quelatos orgânicos	31
Complexos orgânicos	32
Fertilizantes boratados	33
Fertilizantes fontes de molibdênio	33
Formas de aplicação dos micronutrientes	33
Via sementes	33
Via solo	34
Via foliar	34
Considerações finais	35
Referências	35

Introdução

Plantas superiores são constituídas de água numa faixa que vai de 80 a 95%, e de matéria seca (MS), entre 5 a 20%, dependendo da espécie, do estágio de desenvolvimento e das condições de clima e solo. Nessa MS, encontram-se vários elementos químicos que são absorvidos do solo pelas raízes, mas apenas 17 são essenciais às plantas. São eles: carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cloro (Cl), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), molibdênio (Mo) e níquel (Ni). Os elementos C, H e O vêm do ar (C e O) e da água (H e O). Juntos, representam 96% da MS das plantas. Os demais elementos – 4% restantes – advêm do solo (Rouached; Tran, 2015).

Para ser considerado essencial ao crescimento e desenvolvimento, o elemento químico precisa obedecer aos critérios de essencialidade propostos por Arnon e Stout (1939), que são: 1) na sua ausência, a planta é incapaz de completar o seu ciclo de vida, não produzindo sementes viáveis; 2) a essencialidade deve ser específica, ou seja, o elemento não pode ser substituído por outro com propriedades similares; e 3) o elemento deve ter uma função específica dentro da célula.

Os 14 elementos químicos absorvidos do solo que obedecem aos critérios supracitados são chamados de nutrientes minerais essenciais e subdivididos em duas categorias: macronutrientes – N, P, K, Ca, Mg e S – e micronutrientes – B, Cl, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo e Ni. Essa classificação os separa apenas pela quantidade exigida pelas plantas. Os macronutrientes são encontrados na MS do tecido vegetal na magnitude de g kg^{-1} , enquanto os micronutrientes, em mg kg^{-1} (David et al., 2014).

Essa classificação em macronutrientes e micronutrientes, baseando-se apenas na quantidade exigida pela planta, não dá detalhes dos papéis que eles exercem. Por esse motivo Epstein e Bloom (2006) sugeriram uma classificação mais detalhada desses nutrientes, baseada nas suas funções fisiológicas:

- Nutrientes que são elementos integrais de compostos orgânicos: N, P e S.
- Nutriente que faz aquisição e utilização de energia: P.
- Nutrientes que estão estruturalmente relacionados com a parede celular: Ca e B.
- Nutrientes que são compostos integrais de enzimas e outras entidades essenciais do metabolismo: Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo e Ni.
- Nutrientes que servem para ativar e/ou controlar a atividade de enzimas: K, Ca, Mg, Cl, Fe, Mn, Cu e Zn.
- Nutrientes que estão envolvidos em reações redox: Fe, Mn, Cu e Mo.
- Nutrientes que servem como contra-íons para cargas positivas ou negativas: N, K, Ca, Mg, S e Cl.
- Nutrientes que servem como agente osmótico celular: N, K e Cl.
- Nutriente que atua como mensageiro secundário na regulação metabólica: Ca.

Dessa forma, conforme proposto por Epstein e Bloom (2006), os micronutrientes exercem nos vegetais as funções de: estrutura da parede celular, compostos integrais de enzimas e outras entidades essenciais do metabolismo, ativação e/ou controle de enzimas, agentes redox, contra-íons para cargas positivas e negativas e agente osmótico celular.

Além dos elementos essenciais, tem-se aqueles considerados benéficos às plantas. Esses elementos são: alumínio (Al), sódio (Na), selênio (Se), silício (Si) e cobalto (Co) (Epstein; Bloom, 2006; Brunner; Sperisen, 2013; Maathuis, 2014; Lange et al., 2017; Schiavon, 2017; Wang et al., 2017).

Embora não obedeçam aos critérios de essencialidade, segundo esses autores, nos vegetais, esses elementos essenciais possuem as seguintes funções:

- Acumulam-se nos vegetais sem proporcionar danos. Por exemplo, até $500 \mu\text{g g}^{-1}$, o Al não prejudica os tecidos vegetais; e muitas espécies dos gêneros *Astragalus*, *Stanleya*, *Lecythis* e *Xylorhiza*, quando crescidas em solos com alta concentração de Se, acumulam esse elemento sem se prejudicar.
- Estimulam o crescimento em determinadas situações. Por exemplo, a adição de baixas doses de Al em solução nutritiva estimula o crescimento inicial das raízes.
- Compensam ou eliminam os efeitos tóxicos de outros elementos. Por exemplo, o Al, em concentrações menores do que $0,2 \mu\text{g g}^{-1}$, diminui ou elimina os efeitos tóxicos de Cu, Mn e P.
- Substituem o elemento essencial em algumas de suas funções menos específicas. Por exemplo, o Na pode satisfazer parte da função osmótica do K.
- São essenciais apenas para algumas espécies. Por exemplo, o Na é essencial para algumas plantas de deserto, como *Atriplex vesicaria* e *Halogeton glomeratus*, e para as plantas C_4 .
- São essenciais apenas para algumas espécies e sob determinadas situações. Por exemplo, o Co é essencial para a fixação biológica do N_2 (FBN) por bactérias diazotróficas em simbiose com raízes, entretanto, a FBN só ocorre sob baixos níveis de N no solo.
- Auxiliam na sanidade das plantas. Por exemplo, o Si presente em folhas e inflorescências de gramíneas pode impedir ou diminuir o ataque de fitopatógenos.

Nos últimos anos, a agricultura brasileira tem apresentado recordes de produção. Esse desempenho deve-se, essencialmente, ao desenvolvimento tecnológico envolvendo a obtenção de variedades com alto potencial produtivo, à mecanização e ao aperfeiçoamento das práticas de manejo do solo e dos métodos de controle fitossanitário. Sob essa perspectiva, a adequada disponibilidade de micronutrientes está entre as condições necessárias à boa produtividade das culturas, pois, embora trate-se de elementos exigidos em quantidades menores, é comum a sua deficiência em áreas agrícolas. Dessa forma, para otimizar o uso dos insumos, reduzir os custos e manter patamares satisfatórios de produtividade, faz-se necessário que a pesquisa dê importância ao tema micronutrientes, para que seu fornecimento seja baseado em critérios técnico-científicos (Resende, 2004).

O micronutriente é absorvido pelas raízes das plantas de quatro formas: neutra, catiônica, aniônica e quelatada. Quelato é uma substância orgânica através da qual os micronutrientes metálicos se ligam por meio de ligações coordenadas. O único micronutriente que é absorvido na forma neutra é o H_3BO_3 ; na forma catiônica são: Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Mn^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} e Ni^{2+} ; na forma aniônica são: Cl^- e MoO_4^{2-} ; e, na forma quelatada, Fe-quelato, Mn-quelato, Cu-quelato e Zn-quelato (Carvalho, 2007). Uma vez dentro das raízes, os micronutrientes seguirão o fluxo transpiratório em direção à parte aérea, posição na qual cumprirão suas funções.

Funções dos micronutrientes

Boro

- Biossíntese da parede celular

Atua na biossíntese e deposição dos pectatos de Ca, responsáveis pela rigidez da parede celular, e forma complexos de ésteres

cis-borato com hemicelulose, pectina e precursores da lignina. Dessa forma, plantas deficientes em B sofrerão colapso facilmente (Wang et al., 2022).

- Integridade da membrana plasmática

O B forma complexos cis-diol-borato com os constituintes lipoproteicos da membrana plasmática. Dessa forma, a deficiência de B provoca danos na formação e estabilidade da plasmalema ao diminuir o teor de lipídeos e o funcionamento das proteínas de transporte (Ferreira et al., 2021).

- Transporte de carboidratos

O complexo ionizável açúcar-borato é mais solúvel nas membranas do que o açúcar sozinho, sendo por isso facilitado o seu transporte. Sob deficiência de B, ocorre redução no transporte da sacarose das folhas para outras partes da planta (Bogiani et al., 2013).

- Crescimento reprodutivo

Os processos de germinação do pólen e do crescimento do tubo polínico dependem de B para formação e deposição da parede celular, conforme visto anteriormente. Além do mais, na ausência do elemento, ocorre a síntese de fitoalexinas, que são fenóis que inibem o crescimento do tubo polínico (Wang et al., 2003).

Cloro

- Função osmótica

O Cl exerce efeito osmótico nas células-guarda durante a abertura e o fechamento dos estômatos. Na abertura, há a entrada de CO₂ para a fotossíntese (Flowers; Colmer, 2008).

- Balanço de cargas elétricas

O Cl tem a função de fazer a neutralização das cargas elétricas positivas geradas durante o metabolismo vegetal, em virtude do fluxo de K, ou seja, o Cl⁻ é o contra-ânion do K⁺ (Catani et al., 1969).

- Absorção de nutrientes

O Cl é cofator da ATPase do tonoplasto. Utilizando esse elemento e a energia proveniente da hidrólise do ATP, essa ATPase promove a absorção dos nutrientes catiônicos para o vacúolo (Geifus, 2018).

- Fase fotoquímica da fotossíntese

A principal função do Cl nas plantas é a sua participação na reação de Hill durante a fase fotoquímica da fotossíntese. Esse micronutriente age como cofator do complexo enzimático Mn-Enzima no fotossistema II (PSII) (Rollefson, 1930).

Ferro

- Constituinte dos citocromos

Os citocromos são proteínas que transportam elétrons. Estão presentes na cadeia de transporte de elétrons (CTE) da mitocôndria, sendo por isso importantes na respiração (Murgia et al., 2022).

- Constituinte de proteínas com grupos Fe-S

As proteínas vegetais com grupos Fe-S são a ferredoxina e o citocromo b6f. Ambas fazem parte da CTE da fotossíntese. São importantes na formação de ATP e poder redutor para a fotossíntese, na FBN, na redução de NO_3^- e SO_4^{2-} e na assimilação do NH_4^+ (Murgia et al., 2022).

- Constituinte das enzimas catalase e peroxidase

O Fe faz parte das enzimas catalase e peroxidase, que transformam H_2O_2 , subproduto do metabolismo e tóxico às plantas, em H_2O e O_2 (Murgia et al., 2022).

- FBN

O Fe participa da leg-hemoglobina, que protege a enzima nitrogenase da inativação irreversível do O_2 , garantindo a FBN (Murgia et al., 2022).

- Resistência de plantas às doenças

O Fe está envolvido na síntese da hemoenzima lipoxigenase, que catalisa a oxidação dos ácidos oleico, linoleico e linolênico aos precursores da traumatina e do ácido jasmônico, que combatem fitopatógenos (Kausch; Handa, 1995).

Manganês

- Fase fotoquímica da fotossíntese

O Mn é constituinte da enzima S, responsável pela reação de Hill ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2$) durante a fotossíntese. Com o fluxo de elétrons prejudicado, diminui-se a fotofosforilação, a fixação do CO_2 , a redução do nitrato e do sulfato (Yachandra et al., 1996).

- Desintoxicação celular

Ativa as enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase e peroxidase, responsáveis pela inativação de radicais livres (O_2^-) formados pela inibição da reação de Hill (Yachandra et al., 1996).

- Redução do N

Ativa a enzima redutase do nitrito (RNO_2^-) que transforma NO_2^- em NH_4^+ quando o solo é adubado com nitrato (NO_3^-). O íon amônio é incorporado em esqueletos de C (Shu et al., 2019).

- Nodulação em leguminosas

Na nodulação das leguminosas, exige-se alta atividade das auxinas, que por sua vez são afetadas pelo Mn. Esse micronutriente funciona como cofator – constituinte – do sistema de formação e ativação das auxinas (Ma et al., 2022).

- Resistência de plantas às doenças

O Mn ativa uma série de enzimas responsáveis pela formação de compostos fenólicos, cumarinas, ligninas, flavonoides e auxinas, que inibem ou dificultam a proliferação de fitopatógenos. Além disso,

é responsável pela inibição de aminopeptidases, que aumentam a concentração de aminoácidos livres, alimento para fungos, e da pectina metil-esterase, uma enzima fúngica que destrói a integridade das membranas vegetais. Também possui efeito tóxico direto sobre o fungo (Peris-Peris et al., 2017).

Cobre

- Fase fotoquímica da fotossíntese

Faz parte da plastocianina, uma proteína azul, e ativa a citocromo oxidase. Ambas são doadoras de elétrons para o Fotossistema I (PSI) (Baracho et al., 2019).

- Fase bioquímica da fotossíntese

Nessa fase da fotossíntese, o Cu é responsável pela entrada do CO₂ nos compostos orgânicos ao ativar a enzima ribulose 1,5-difosfato carboxilase/oxigenase, conhecida como Rubisco (Baracho et al., 2019).

- Respiração

É constituinte da enzima citocromo oxidase, que transporta elétrons durante a fosforilação oxidativa, e da ascorbato oxidase, que oxida o ácido ascórbico à desidroascórbico (Laporte et al., 2020).

- Desintoxicação celular

O Cu participa do grupo prostético da enzima SOD, que protege as plantas dos radicais superóxidos (O₂⁻) (Zhang et al., 2017).

- Resistência de plantas às doenças

Ativa as enzimas polifenol oxidase e diamina oxidase, que catalisam a oxidação de compostos fenólicos, transformando-os em cetonas, que são precursoras da lignina. Dessa forma, a deficiência de Cu pode facilitar a entrada de fitopatógenos nas plantas (Kowata et al, 2012).

Zinco

- Crescimento apical

A deficiência de Zn pode causar degradação das auxinas produzidas pelas plantas e reduzir a sua síntese. Como esse fitormônio é responsável pelo crescimento apical, diminui-se a altura das plantas e estimula-se os brotos laterais (Ibrahim; Ramadan, 2015).

- Síntese de proteínas

O Zn inibe a enzima RNAase e faz parte da RNA polimerase. Portanto, plantas deficientes nesse micronutriente apresentarão uma queda na síntese de proteínas. Ademais, o Zn faz parte de proteínas ativas envolvidas na transcrição do DNA e está presente na estrutura dos ribossomos (Castillo-González et al., 2018).

- Redução do N

O Zn ativa a enzima redutase do nitrato (RNO_3^-), que reduz o NO_3^- a NO_2^- (Demetin et al., 2007). Sem zinco, há um acúmulo de NO_3^- nas plantas e queda na formação de aminoácidos.

- Desintoxicação celular

O Zn faz parte da estrutura da enzima SOD, que decompõe radicais oxidantes (O_2^-), tóxicos às células vegetais (Moghadam et al., 2013). Nessa desintoxicação, forma-se peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que é inativado pela ação da enzima catalase, ativada pelo Zn (Asadollahi et al., 2016).

- Fase bioquímica da fotossíntese

O ciclo C_4 trabalha com HCO_3^- e não CO_2 . Nesse contexto, o Zn faz parte da enzima anidrase carbônica, que catalisa a seguinte reação: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$. Também, ao acoplar enzima e substrato e ter efeito na conformação de moléculas ativas, é importante para a ação da Rubisco, proteína importante no ciclo C_3 (Zhang et al., 2018).

- Respiração

É responsável por ativar uma das enzimas-chave da respiração, a aldolase, que atua nos níveis de glicólise e CTE. Dessa forma, há queda na produção de ATP pela célula (Price; Miller, 1962).

- Resistência de plantas às doenças

Como a deficiência de Zn promove uma elevação dos O_2^- , devido à baixa atividade da SOD, há reflexos diretos na integridade das membranas, uma vez que essa espécie química reage com os lipídeos. Também a falta desse micronutriente interfere na interação entre proteínas e os grupos sulfidrilos ($-SH$), a qual o Zn tem papel direto. Isso contribui para aumentar a susceptibilidade das plantas às doenças (Gupta et al., 2012).

Molibdênio

- FBN

O Mo é constituinte da nitrogenase, enzima que faz a FBN nos nódulos radiculares das leguminosas. Dessa forma, a falta desse micronutriente acarretará sintomas de deficiência de N na planta (Silva et al., 2017).

- Redução do N e do S

Por sua ação redox, o Mo está envolvido nas reduções do nitrogênio e do enxofre, uma vez que esse micronutriente faz parte das enzimas nitrato redutase (Kovács et al., 2015) e sulfito redutase.

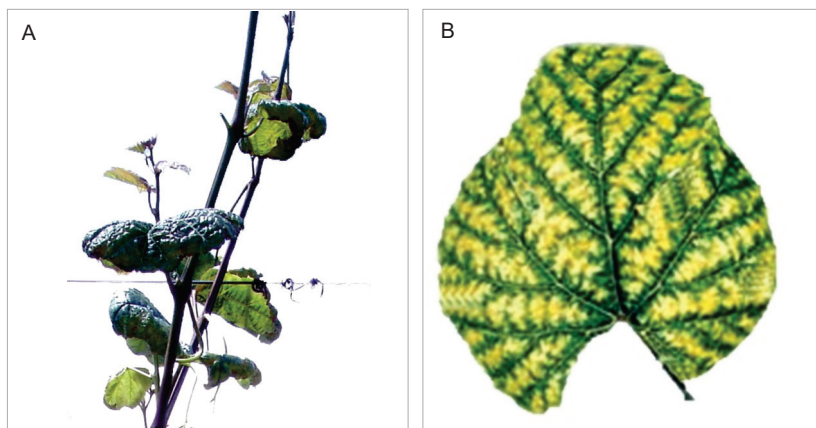
Níquel

A única função conhecida do Ni nas plantas é ser constituinte da urease, enzima que tem importância fundamental quando o solo é adubado com ureia para fornecer N. A reação $(CH_4N_2O) + 3H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + OH^- + HCO_3^-$ catalisada por essa enzima evita a toxidez dos tecidos (Barcelos et al., 2018).

Sintomas de deficiência e excesso de micronutrientes

Boro

Como o B é imóvel no floema, os sintomas de deficiência aparecem primeiro nos órgãos jovens. Esses sintomas são: inibição do crescimento da parte aérea pela morte das gemas apicais; encurtamento dos internódios; folhas pequenas e deformadas; folhas engrossadas, duras e às vezes quebradiças; folhas necrosadas; presença de nervuras salientes; baixa produção de sementes; caules e frutos enrugados, rachados, quebradiços e às vezes com manchas ou estrias de cortiça e acúmulo de bolsas de gomas no mesocarpo dos frutos (Duran et al., 2018; Prado, 2020). A Figura 1 mostra sintomas de deficiência de B em videira.



Fotos: George Wellington Bastos de Melo

Figura 1. Sintomas de deficiência de boro em videira. Folhas arqueadas para baixo (A). Clorose internerval, em que as nervuras permanecem verdes e a parte entre as nervuras adquirem coloração amarelada (B).

Fonte: Melo (2020a).

Quanto aos micronutrientes, é pequeno o limite entre teor adequado e tóxico no solo. Os sintomas de excesso de B nas plantas são: clorose malhada seguida por manchas necróticas nos bordos das folhas mais velhas e queima das bordas das folhas (Shapira et al., 2013; Prado, 2020). A Figura 2 mostra folhas de videira com sintomas de excesso de boro.

Fotos: George Wellington Bastos de Melo

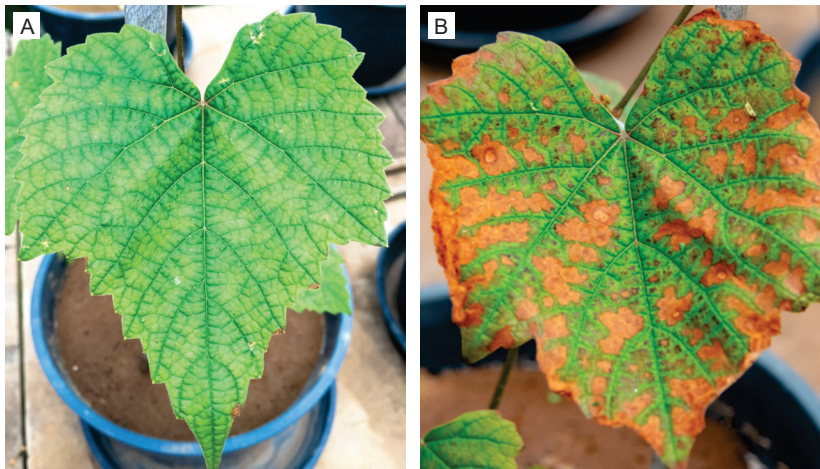


Figura 2. Sintomas de excesso de boro em videira. Folha jovem mosqueada entre o verde e o amarelo, com pontos necróticos (A). Manchas necróticas entre as nervuras, começando pelas bordas (B).

Fonte: Melo (2020b).

Cloro

Não é comum a deficiência de Cl nas plantas por estar presente no adubo cloreto de potássio (KCl) e na água das chuvas. Entretanto, quando ocorre, os sintomas são: murchamento, clorose, bronzeamento e deformação da folha formando uma espécie de “taça”. O bronzeamento pode evoluir para necrose (Prado, 2020).

Os sintomas de excesso de Cl são comuns em plantas crescidas sob solos salinos. Podem ocorrer queima e amarelecimento nas margens das folhas, que podem cair prematuramente (Copes et al., 2003). A Figura 3 mostra uma folha de mamoneira com sintoma de excesso de cloro.



Fotos: Gilvan Barbosa Ferreira

Figura 3. Sintomas de excesso de cloro na mamoneira. Manchas necróticas com halo molhado e escurecido.

Fonte: Ferreira et al. (2008).

Ferro

Os sintomas de deficiência de Fe aparecem inicialmente nas partes jovens das plantas, como uma clorose. As folhas ficam amareladas, permanecendo apenas as nervuras verdes durante algum tempo, destacando-se como um reticulado fino – rede verde fina das nervuras sobre um fundo amarelado –, podendo evoluir para um branqueamento. Entretanto, com a evolução da sintomatologia, até as nervuras ficam cloróticas (Rustioni et al., 2017; Prado, 2020). A Figura 4 mostra sintomas de deficiência de Fe em folhas de macieira e pessegueiro.

Fotos: Gilmar Ribeiro Nachtigall (A); Gilberto Nava (B)

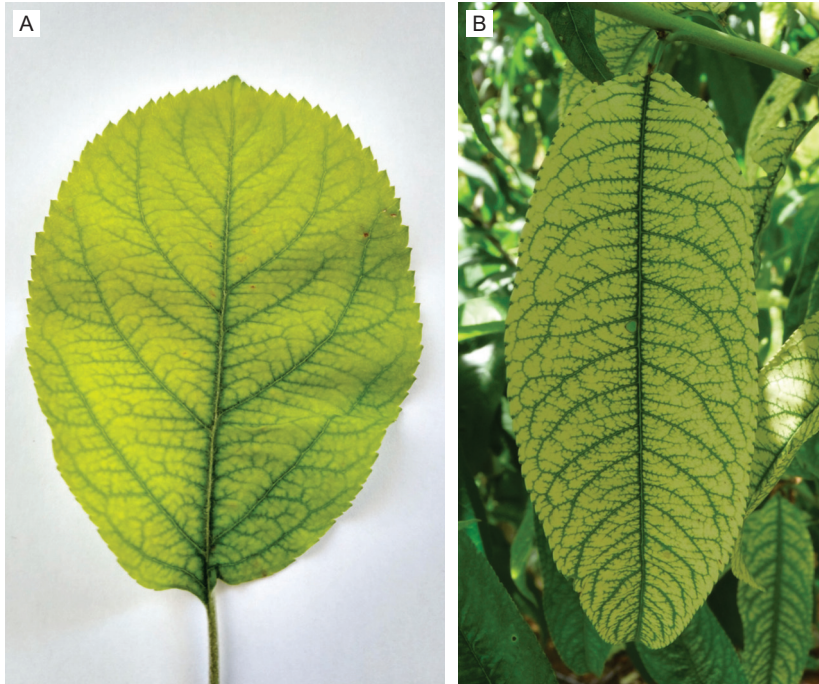


Figura 4. Sintomas de deficiência de ferro em folhas de macieira (A) e pessegueiro (B). Clorose interveinal.

Fontes: Nachtigall (2020a) e Nava (2020a).

A toxicidade por Fe pode ocorrer em solos alagados, pois há a redução da forma Fe^{3+} para a Fe^{2+} não absorvível pelas raízes. Os principais sintomas de excesso de Fe ocorrem primeiramente nas folhas mais maduras e são: bronzeamento e deposição de pigmentos marrons. Há queda na produtividade das culturas e, em casos mais severos, morte das plantas (Stein et al., 2014; Prado, 2020). A Figura 5 mostra sintoma de excesso de Fe em folhas de sorgo-sacarino.



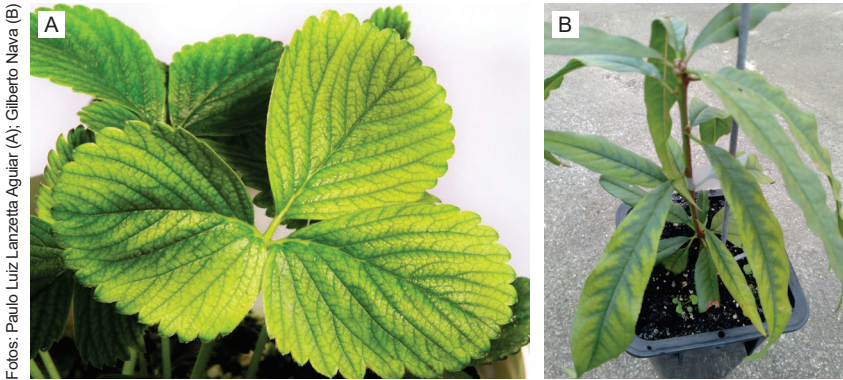
Fotos: Oscar Fontão de Lima Filho

Figura 5. Sintomas de excesso de ferro em folhas de sorgo-sacarino. Clorose lateral e retilínea nas bordas das folhas mais velhas, com aparecimento posterior de manchas necróticas irregulares, iniciando-se no ápice e progredindo para a base.

Fonte: Lima Filho (2016).

Manganês

A deficiência de Mn é caracterizada por clorose interveinal – reticulada grossa em que as nervuras formam uma rede verde espessa sobre um fundo amarelado – das folhas jovens (Lavres Júnior et al., 2012; Prado, 2020). A Figura 6 mostra sintomas de deficiência de Mn em folhas de morangueiro e pessegueiro.



Fotos: Paulo Luiz Lanzetta Aguiar (A); Gilberto Nava (B)

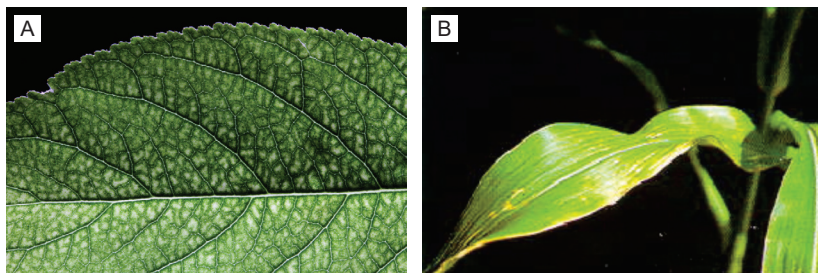
Figura 6. Sintomas de deficiência de manganês em folhas de morangueiro (A) e pessegueiro (B). Clorose interneval.

Fontes: Nava et al. (2020) e Nava (2020b).

Inicialmente, a toxicidade por Mn aparece nas folhas jovens, na forma de clorose marginal, encarquilhamento e pontuações marrons que evoluem para necrose do limbo. As plantas podem apresentar crescimento reduzido, com aspecto de enfezamento (Dučić; Polle, 2005; Prado, 2020).

Cobre

Como o Cu possui baixa redistribuição nas plantas, os sintomas aparecem nos órgãos mais novos. De forma geral, as folhas ficam amareladas ou verde-azuladas, murchas, com as margens enroladas para cima ou até mesmo maiores que as normais. Caules ou colmos ficam fracos e murchos ainda que haja umidade no solo. Pode ocorrer morte das gemas apicais (Yruela, 2005; Prado, 2020). A Figura 7 mostra sintomas de deficiência de Cu em folhas de pessegueiro e milho.



Fotos: Gilberto Nava (A); Antônio Marcos Coelho (B)

Figura 7. Sintomas de deficiência de cobre em folhas de pessegueiro (A) e milho (B). Manchas irregulares esbranquiçadas na parte superior do limbo foliar (A) e clorose interveinal (B).

Fonte: Nava (2020c).

Fonte: Coelho et al. (2021).

Os sintomas de toxicidade por Cu são redução do crescimento e manchas aquosas grandes, as quais evoluem para enegrecimento, como se estivessem queimadas, nas folhas mais velhas (Freitas et al., 2015; Prado, 2020).

Zinco

A deficiência de Zn se caracteriza por folhas pequenas com faixas amareladas ou brancas entre as nervuras. Há também o encurtamento dos internódios e, em razão disso, tem-se a formação de nós sucessivos e as folhas se aproximam, formando uma roseta (Sudhalakshmi et al., 2015; Prado, 2020). A Figura 8 mostra sintomas de deficiência de Zn em macieira e milho.

A toxicidade de Zn manifesta-se pela diminuição da área foliar e deformação, ficando as folhas pontiagudas, seguida de clorose, podendo aparecer um pigmento amarelado, pardo-avermelhado ou amarronzado. Em seguida, o limbo necrosa (Prado, 2020; Paradisone et al., 2021). A Figura 9 mostra sintoma de excesso de Zn em folhas de sorgo-sacarino.

Fotos: Gilmar Ribeiro Nachtigall (A);
Antônio Marcos Coelho (B)

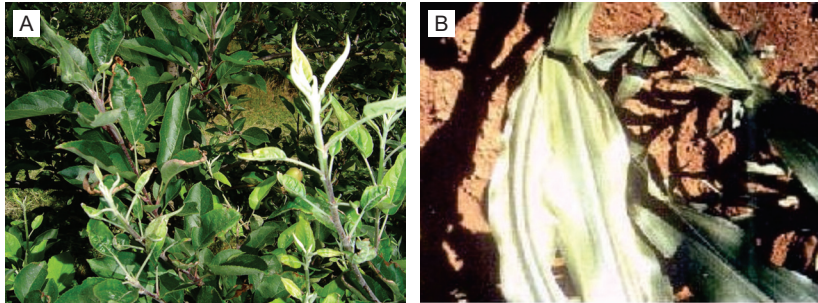


Figura 8. Sintomas de deficiência de zinco em plantas de macieira (A) e folha de milho (B). Brotações pequenas e em forma de roseta (A). Faixas brancas entre as nervuras da folha (B).

Fonte: Nachtigall (2020b).

Fonte: Coelho et al. (2021).

Fotos: Oscar Fontão de Lima Filho

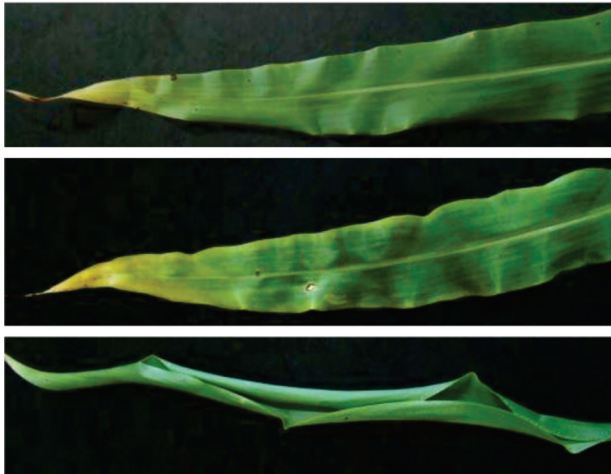


Figura 9. Sintomas de excesso de zinco em folhas de sorgo-sacarino. Clorose inicial na ponta do limbo de folhas mais jovens, que coalesce, expandindo-se paralelamente às nervuras e pelas bordas, para a base. Também podem ocorrer pontuações necróticas espalhadas ao longo do limbo, bem como o enrolamento foliar.

Fonte: Lima Filho (2016).

Molibdênio

Em razão da restrita mobilidade nas plantas, os sintomas de deficiência de Mo ocorrem primeiramente nas folhas novas. Em geral, tem-se uma clorose interneval, semelhante à deficiência de Mn (Figura 6). Também as margens do limbo tendem a curvar-se para cima ou para baixo (Quaggio et al., 2004; Prado, 2020). A Figura 10 mostra sintomas de deficiência de Mo em folhas de milho.



Foto: Magna Maria Macedo Nunes Costa

Figura 10. Sintomas de deficiência de molibdênio em plantas de milho. Clorose interneval nas folhas novas.

A toxicidade de Mo em culturas não é comum. Quando ocorre, as folhas apresentam clorose interneval, semelhante à deficiência de Fe (Figura 4), e as novas podem ficar distorcidas (Shi et al., 2018; Prado, 2020). A Figura 11 mostra sintoma de excesso de Mo em folhas de sorgo-sacarino.



Figura 11. Sintomas de excesso de molibdênio em folhas de sorgo-sacarino. Clorose e descoloração progressiva das folhas mais jovens a partir da ponta, com aparecimento de manchas amarelo-ouro. Limbo foliar voltado para cima.

Fonte: Lima Filho (2016).

Níquel

Os sintomas de deficiência de Ni nas plantas são: folhas pequenas, em formas de cálice (orelha-de-rato) e pontos necróticos pelo acúmulo de ureia (Bai et al., 2006). Já o sintoma de toxicidade por ureia é necrose nas folhas (Hassan et al., 2019).

Para solucionar o problema da deficiência e do excesso de micronutrientes, é recomendável que se faça a análise do solo para esses elementos antes da implantação da cultura. Na coleta do solo, tomam-se amostras simples na profundidade de 0–20 cm, abrangendo toda a área a ser plantada, em forma de zigue-zague. Essas amostras simples devem ser misturadas e bem homogeneizadas para formar a amostra composta que será levada ao laboratório de rotina, lembrando que nem todos eles fazem análise de micronutrientes.

De posse dos resultados e de acordo com a cultura, faz-se a adubação utilizando-se as fontes específicas necessárias para suprir a demanda das plantas bem como a forma de aplicação mais adequada ao sistema. Em caso de aparecer deficiências pontuais durante o desenvolvimento vegetal, toma-se amostra de folhas – primeira expandida a partir do ápice – e essa amostra é levada ao laboratório para a análise foliar. De posse dos resultados, uma adubação de manutenção ou correção é feita.

Fonte de micronutrientes

Óxidos

Os óxidos são as fontes mais insolúveis de micronutrientes metálicos que existem no mercado. Por essa razão, apresentam um custo inferior. Nessa perspectiva, o único que apresenta alguma viabilidade no uso é o óxido de cobre (Cu_2O), na forma como foi extraído durante

o processo de mineração. O óxido de manganês (Mn_2O) tem uma solubilidade tão baixa que não é recomendado como adubo (Gonçalves et al., 2017).

Sulfatos

Sulfatos, por serem de maior solubilidade, são as fontes mais usadas de micronutrientes catiônicos (Cu, Fe, Mn e Zn) que existem no mercado. Se prestam muito bem tanto para adubação via solo como foliar, com exceção do sulfato ferroso ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), que não é muito bem recomendado para solo. A sua solubilidade faz com que sejam adequados para misturar com outros fertilizantes fluidos, desde que seja feito antes um teste de compatibilidade (Camargo, 2006). Os principais são sulfato de cobre penta-hidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$, 10% de Cu), sulfato de ferro III nona-hidratado [$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$, 20% de Fe], sulfato de ferro II hepta-hidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$, 20% de Fe), sulfato de manganês tetra-hidratado ($MnSO_4 \cdot 4H_2O$, 24% de Mn), sulfato de zinco hidratado ($ZnSO_4 \cdot H_2O$, 36% de Zn) e sulfato de zinco hepta-hidratado ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, 36% de Zn).

Oxi-sulfatos

Oxi-sulfatos são fontes de micronutrientes cuja solubilidade em água vai depender da quantidade de H_2SO_4 utilizada na solubilização do óxido que lhe deu origem, sendo um fator determinante da eficiência agrônômica do produto a curto prazo, em aplicações localizadas em sulcos e para produtos na forma granulada. A acidulação parcial com H_2SO_4 dará origem a um produto que contém micronutrientes, especialmente Zn e Mn, nas formas de óxido e sulfato, apresentando solubilidade intermediária entre os dois. Para que possam proporcionar uma alta eficiência na forma granulada, devem apresentar entre 35 a 50% dos elementos solúveis em água (Mortvedt, 2001).

Fritas

As fritas são também chamadas de "elementos traços fritados", tradução literal do inglês "fritted trace elements", termo que deu origem à sigla FTE. São produtos vítreos obtidos pela fusão de silicatos ou fosfatos com uma ou mais fontes de micronutrientes a aproximadamente 1.300 °C, seguido de resfriamento rápido em água, secagem e moagem. A solubilidade é determinada pelo tamanho das partículas e pela composição da matriz (Vale; Alcarde, 2003). Por liberar gradualmente os micronutrientes no solo, evita que as plantas sejam intoxicadas (Cunha et al., 2019). As fritas são mais apropriadas para adubação de manutenção do que para a correção de deficiências severas de micronutrientes, apresentando maior eficiência em solos arenosos com altas taxas de lixiviação, localizados em regiões com altos índices pluviométricos (Mortvedt, 2001).

Quelatos orgânicos

Quelatos orgânicos podem ser naturais ou sintéticos e são formados a partir da combinação de um agente quelatizante com um metal através de ligações coordenadas. Sob essa perspectiva, a estabilidade da ligação quelato-metal geralmente determina a disponibilidade do micronutriente às plantas. Os quelatos são bastante solúveis em água, mas, diferentemente dos sais simples, liberam o micronutriente muito lentamente. Esse fato é a principal vantagem dos quelatos, pois permite que Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} e Co^{2+} permaneçam em solução em condições que normalmente se insolubilizariam, como em soluções concentradas com reação neutra ou alcalina (pH 7,0 ou maior) e em solos calcários. Isso se constitui em um aspecto de grande importância quando se pretende alta eficiência agrônômica via solo em áreas que, por algum motivo, estejam na faixa de pH acima de 6,0 e/ou com percentagem de saturação por bases acima de 70%, por exemplo. Dessa forma, um quelato eficiente é aquele no qual a taxa de substituição do elemento é baixa, mantendo, conseqüentemente,

o micronutriente quelatizado por tempo suficiente para ser absorvido e translocado para a parte aérea (Lopes, 1999). Quando aplicados às folhas, agente quelatizante e metal entram juntos pelos estômatos e são transportados para os demais órgãos, ficando o segundo protegido de reações de fixação e/ou precipitação no floema (Martins et al., 2010).

É importante salientar que um bom quelato é aquele que é solúvel em água, não fitotóxico, compatível com outros produtos como adubos foliares e defensivos agrícolas, forma ligação quelato-cátion estável nas soluções e tem bom potencial de acidificação (Melarato et al., 2002). Para as plantas, a eficiência relativa dos quelatos aplicados ao solo pode ser de duas a cinco vezes maior por unidade de micronutriente do que a das fontes inorgânicas, enquanto o seu custo, por unidade de elemento, é de cinco a cem vezes mais alto. Esse aspecto constitui-se em uma limitação ao uso desses produtos em culturas de baixo valor agregado.

Os agentes quelatizantes mais utilizados são: ácido etilenodiaminotetracético (EDTA), ácido hidroxietil etilenodiaminotetracético (HEDTA), ácido dietilenotriaminopentacético (DTPA), EDDHA (ácido diamino o-hidrofenil acetato), ácido nitriooacético (NTA), ácido glucoheptônico, lignossulfonados, ácido cítrico, ácido tartárico, ácido ascórbico, aminoácidos, polihexoses, polifosfatos e poliflavonóides. O mais comum é o EDTA.

Complexos orgânicos

Os complexos orgânicos são produzidos a partir da combinação de micronutrientes metálicos com subprodutos orgânicos industriais, como, por exemplo, resíduos da indústria madeireira e alimentícia. São mais baratos, porém têm menor estabilidade e se degradam mais rapidamente no solo, além de serem menos compatíveis com outros fertilizantes fluidos do que os quelatos (Lopes, 1999).

Fertilizantes boratados

As fontes de B existentes no mercado diferenciam-se umas das outras pela sua solubilidade. As fontes solúveis são: ácido bórico (H_3BO_3), Solubor ($Na_2B_8O_{13} \cdot 4H_2O$) e Bórax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$). Por ser a fonte mais solúvel de todas, em água, o ácido bórico foi bastante utilizado no passado, entretanto, pela grande susceptibilidade às perdas por lixiviação, aos poucos foi sendo substituído por Solubor; Bórax; Colemanita ($CaB_6O_{11} \cdot 5H_2O$), que é medianamente solúvel; e ulexita ($NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$), que é considerado insolúvel.

Fertilizantes fontes de molibdênio

Os fertilizantes fontes de molibdênio para a agricultura podem ser solúveis ou insolúveis. Os solúveis são: molibdato de sódio ($Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$) e molibdato de amônio [$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$]. A fonte insolúvel é o óxido de molibdênio (MoO_3).

Formas de aplicação dos micronutrientes

Via sementes

A aplicação de micronutrientes via sementes deve ser realizada de forma a preservar, aperfeiçoar e impulsionar a performance da germinação e a expressar alta resposta gênica da cultura. Antes de

iniciar a "adubação" das sementes, é preciso estar atento à qualidade do produto que será semeado, pois se constitui um fator importante na produtividade, devendo possuir bons atributos fisiológicos, genéticos, físicos e fitossanitários. Ademais, fazer um tratamento nutricional nas sementes é facilitar a expressão genética da cultivar, garantindo a germinação e o crescimento da plântula, uma redução no ciclo e maiores produtividades (Ribeiro; Loiola, 2021).

Via solo

A adubação com micronutrientes visa incrementar a produtividade das culturas em solos deficientes deles. Para isso, a quantidade do fertilizante a aplicar deve ser estabelecida com base no teor do elemento no solo, determinado a partir da análise química, e na necessidade da cultura. Segundo Zuazo (2009), o efeito residual de uma adubação com micronutrientes dura um período de aproximadamente cinco anos, mas é importante que análises químicas continuem sendo feitas periodicamente a fim de decidir se se faz ou não adubação de manutenção. Dessa forma, altos teores desses elementos nas análises das últimas três safras permitem a sua não utilização em momentos de dificuldade financeira, sem comprometimento do potencial produtivo. Pode ser feita em sulcos, em covas ou a lanço.

Via foliar

Na adubação foliar, os micronutrientes são aplicados diretamente sobre as folhas. A entrada dos elementos se dá através dos estômatos e de rupturas e microcanais formados na cutícula. O veículo para a entrada é a água. Para isso, o fertilizante foliar é dissolvido nela e a aplicação é realizada com o uso de pulverizador, que dispensa a mistura sobre toda a folhagem da cultura. É mais eficaz do que a adubação convencional, uma vez que o(s) elemento(s) é(são) colocado(s) diretamente no órgão metabólico da planta, não necessitando passar pelas etapas de transporte e redistribuição (Matioli, 2019).

Considerações finais

Por serem exigidos em proporções menores e menos pesquisados em relação aos macronutrientes, existe uma falsa impressão de que os micronutrientes tenham importância menor para as culturas. Entretanto, esses elementos exercem funções tão importantes nas plantas quanto os primeiros: dão estabilidade à parede celular, fazem parte de enzimas ou as ativam, estão envolvidos em reações redox, fazem balanço de cargas e atuam como agentes osmóticos. Dessa forma, é importante que universidades e instituições de pesquisas deem mais ênfase a esses insumos, incorporando-os em seus portfólios de investigação científica, pois existe um amplo espectro de temas a serem pesquisados com o objetivo de tornar os sistemas de produção agrícola mais eficientes.

Nesse contexto, temas como desenvolvimento de novos métodos de aplicação, veículos apropriados para o seu fornecimento, nutrição com micronutrientes e resistência de plantas a fitopatógenos, utilização do melhoramento convencional e da biotecnologia para o desenvolvimento de materiais que tenham maior eficiência nutricional para esses elementos e manejo de micronutrientes em sistemas de produção de base ecológica e/ou familiar são pertinentes na atualidade para as sustentabilidades ambiental, social e econômica.

Referências

ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity or plants with special reference to cooper. **Plant Physiology**, v. 14, n. 2, p. 371-375, 1939.

ASADOLLAHI, K.; JASEMI, M. S. K.; RIASI, G. H.; KATULI, F. H.; YAZDANI, F.; SARTIPNIA, N.; MOOSAVI, M. A.; RAHIMI, A.; FALAHATI, M. A bio-mimetic zinc/tau protein as an artificial catalase. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 92, p. 1307-1312, 2016.

BAI, C.; REILLY, C. C.; WOOD, B. W. Nickel deficiency disrupts metabolism of ureides, amino acids, and organic acids of young pecan foliage. **Plant Physiology**, v. 140, n. 2, p. 433-443, 2006.

BARACHO, D. H.; SILVA, J. C.; LOMBARDI, A. T. The effects of copper on photosynthesis and biomolecules yield in *Chlorolobion braunii*. **Journal of Phycology**, v. 55, n. 6, p. 1335-1347, 2019.

BARCELOS, J. P. Q.; REIS, H. P. G.; GODOY, C. V.; GRATÃO, P. L.; FURLANI JUNIOR, E.; PUTTI, F. F.; CAMPOS, M.; REIS, A. R. Impact of foliar nickel application on urease activity, antioxidant metabolism and control of powdery mildew (*Microsphaera diffusa*) in soybean plants. **Plant Pathology**, v. 67, n. 7, p. 1502-1513, 2018.

BOGIANI, J. C.; AMARO, A. C. E.; ROSOLEM, C. A. Carbohydrate production and transport in cotton cultivars grown under boron deficiency. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 6, p. 442-448, 2013.

BRUNNER, I.; SPERISEN, C. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 172, 2013.

BRUNNER, O. A. de. **Reações e interações de micronutrientes no solo**. Campinas: Infobibos, 2006. 21 p. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2006_3/micronutrientes/Index.htm. Acesso em: 14 jul. 2022.

CARVALHO, M. da C. S. **Nutrição e adubação do algodoeiro com micronutrientes**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2007. 17 p. (Embrapa Algodão. Circular técnica, 110).

CASTILLO-GONZÁLEZ, J.; OJEDA-BARRIOS, D.; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, A.; GONZÁLLES-FRANCO, A. C.; ROBLES-HERNÁNDEZ, L.; LÓPEZ-OCHOA, G. R. Zinc metalloenzymes in plants. **Interciência**, v. 43, n. 4, p. 242-248, 2018.

CATANI, R. A.; MORAES, F. R. P. de; BERGAMIN, F. H. A concentração de cloro em folhas de café. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 26, p. 93-98, 1969.

COELHO, A. M.; PITTA, G. V. E.; ALVES, V. M. C.; FRANÇA, G. E. de. **Agência de Informação Tecnológica:** milho - diagnose foliar. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/manejo-do-solo-e-adubacao/adubacao-e-fertilidade-do-solo/diagnose-foliar>. Acesso em: 8 fev. 2023.

COPEL, W. E.; CHASTAGNER, G. A.; HUMMEL, R. L. Toxicity responses of herbaceous and woody ornamental plants to chlorine and hydrogen dioxides. **Plant Health Progress**, v. 4, n. 1, 2003.

CUNHA, M. K.; VIANA, S. S.; SOUSA, M. K. de. Efeito do uso de FTE BR12 na produtividade inicial do capim Massai. **Revista Integração Universitária**, v. 13, n. 20, p. 8-16, 2019.

DAVID, E. F. S.; MISCHAN, M. M.; MARQUES, M. O. M.; BOARO, C. F. S. Physiological indexes macro - and micronutrients in plant tissue and essential oil of *Mentha piperita* L. grown in nutrient solution with variation in N, P, K and Mg levels. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 16, n. 1, p. 97-106, 2014.

DEMETIN, S.; ARNOUX, P.; FRANGIONI, B.; GROSSE, S.; LÉGER, C.; BURLAT, B.; GUIGLIARELLI, B.; SABATY, M.; PIGNOL, D. Access to the active site of Periplasmic Nitrate Reductase: insights from site-directed mutagenesis and Zinc inhibition studies. **Biochemistry**, v. 46, n. 34, p. 9713-9721, 2007.

DUČIĆ, T.; POLLE, A. Transport and detoxification of manganese and copper in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 1, p. 103-112, 2005.

DURAN, C.; ARCE-JOHNSON, P.; AQUEA, F. Methylboronic acid fertilization alleviates boron deficiency symptoms in *Arabidopsis thaliana*. **Planta**, v. 248, p. 221-229, 2018.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição mineral de plantas:** princípios e perspectivas. Londrina: Editora Planta, 2006. 403 p.

FERREIRA, G. A.; HIPPLER, F. W. R.; PRADO, L. A. dos S.; RIMA, J. A. H.; BOARETTO, R. M.; QUAGGIO, J. A.; FAÇANHA, A. R.; MATTOS JUNIOR, D. Boron modulates the plasma membrane H⁺-ATPase activity affecting nutrient uptake of Citrus trees. **Annals of Applied Biology**, v. 178, n. 2, p. 293-303, 2021.

FERREIRA, G. B.; SANTOS, A. C. dos; XAVIER, R. M.; SEVERINO, L. S.; BELTRÃO, N. E. de M.; DANTAS, J. P.; FERREIRA, M. M. M.; MORAES, C. R. de A.; SMIDERLE, O. J.; MILANI, M.; SOFIATTI, V. **Diagnose de deficiências minerais na cultura da mamona (*Ricinus communis* L.) e seu controle**. Boa Vista, RR: Embrapa Roraima, 2008. 51 p. (Embrapa Roraima. Documentos, 10).

FLOWERS, T. J.; COLMER, T. D. Salinity tolerance in halophytes. **New Phytologist**, v. 179, n. 4, p. 945-963, 2008.

FREITAS, T. A. de; FRANÇA, M. C. G.; ALMEIDA, A-A. F. de; OLIVEIRA, S. J. R. de; JESUS, R. M. de; SOUZA, V. L.; SILVA, J. V. dos S.; MANGABEIRA, P. A. Morphology, ultrastructure and mineral uptake is affected by copper toxicity in young plants of *Inga subnuda* subs. *luschnathiana* (Benth.) T. D. Penn. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 22, n. 20, p. 15479-15494, 2015.

GEIFUS, C-M. Review on the significance of chlorine for crop yield and quality. **Plant Science**, v. 270, p. 114-122, 2018.

GONÇALVES, F. A. R.; XAVIER, F. O.; OLIVEIRA, T. F.; GODINHO JÚNIOR, J. de D.; AQUINO, L. A. de. Aplicação foliar de doses e fontes de cobre e manganês nos teores foliares destes micronutrientes e na produtividade da soja. **Cultura Agrônômica**, v. 26, n. 3, p. 384-392, 2017.

GUPTA, S. K.; RAI, A. K.; KANWAR, S. S.; SHARMA, T. R. Comparative analysis of Zinc finger proteins involved in plant disease resistance. **PLoS ONE**, v. 7, n. 8, e42578, 2012.

HASSAN, M. U.; CHATTHA, M. U.; KHAN, I.; CHATTHA, M. B.; AAMER, M.; NAWAS, M.; ALI, A.; KHAN, M. A. U.; KHAN, T. A. Nickel toxicity in plants: reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities—a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 13, p. 12673-12688, 2019.

IBRAHIM, E. A.; RAMADAN, W. A. Effect of zinc foliar spray alone and combined with humic acid or/and chitosan on growth, nutrient elements content and yield of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants sown at different dates. **Scientia Horticulturae**, v. 184, p. 101-105, 2015.

KAUSCH, K. D.; HANDA, A. K. Molecular cloning and nucleotide sequence of a lipoxygenase cDNA from ripening tomato fruit. **Plant Physiology**, v. 107, n. 2, p. 669-670, 1995.

KOVÁCS, B.; PUSKÁS-PRESZNER, A.; HUSZVAI, L.; BÓDI, E. Effect of molybdenum treatment on molybdenum concentration and nitrate reduction in maize seedlings. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 96, p. 38-44, 2015.

KOWATA, L. S.; ALVES, G.; MOREIRA, L. M.; MAY-De MIO, L. L. Potassium, calcium and copper phosphite to control peach rust and brown rot. **Idesia**, v. 30, n. 3, p. 93-96, 2012.

LANGE, B.; ENT, A.; BAKER, A. J. M.; ECHEVARRIA, G.; MAHY, G.; MALAISSE, F.; MEERTS, P.; POURRET, O.; VERBRUGGEN, N.; FAUCON, P-P. Copper and cobalt accumulation in plants: a critical assessment of the current state of knowledge. **The New Phytologist**, v. 213, n. 2, p. 537-551, 2017.

LAPORTE, D.; RODRIGUEZ, F.; GONZÁLES, A.; ZÚÑIGA, A.; CASTRO-NALLAR, E.; SÁEZ, C. A.; MOENNE, A. Copper-induced concomitant increases in photosynthesis, respiration, and C, N and S assimilation revealed by transcriptomic analyses in *Ulva compressa* (Chlorophyta). **BMS Plant Biology**, v. 20, n. 1, p. 25, 2020.

LAVRES JÚNIOR, J.; CABRAL, C. P.; ROSSI, M. L.; NOGUEIRA, T. A. R.; NOGUEIRA, N. de L.; MALAVOLTA, E. Deficiency symptoms and uptake of micronutrients by castor bean grown in nutrient solution. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 233-242, 2012.

LIMA FILHO, O. F. de. **Toxicidade de micronutrientes em sorgo - sacarino**: diagnose visual. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2016. 10 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Circular técnica, 38).

LOPES, A. S. **Micronutrientes**: filosofias de aplicação e eficiência agrônômica. São Paulo: ANDA, 1999. 58 p. (ANDA. Boletim técnico, 8).

MA, J.; ZHOU, Y.; LI, J.; SONG, Z.; HAN, H. Novel approach to enhance *Bradyrhizobium diazoefficiens* nodulation through continuous induction of ROS by manganese ferrite nanomaterials in soybean. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 20, n. 1, p. 168, 2022.

MAATHUIS, F. J. M. Sodium in plants: perception, signalling, and regulation of sodium fluxes. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 3, p. 849-858, 2014.

MARTINS, R. A. C.; PEREIRA, H. S.; REIS, E. F. dos; Lecitina, silicone e amido na adubação foliar de couve (*Brassica oleracea* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 6, p. 1470-1476, 2010.

MATIOLI, T. F. Adubação foliar: entenda os princípios e saiba o que funciona. **Aegro**, 2019. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/adubacao-foliar/>. Acesso em: 26 jul. 2022.

MELARATO, M.; PANOBIANCO, M.; VITTI, G. C.; VIEIRA, R. D. Manganês e potencial fisiológico de sementes de soja. **Ciência Rural**, v. 32, n. 6, p. 1069-1071, 2002.

MELO, G. W. B. de. **Deficiência de Boro (B)**. Brasília, DF: Embrapa, 2020a. (UZUM Uva - Sistema especialista para diagnóstico de doenças, pragas e distúrbios fisiológicos em videiras). Disponível em: https://www.embrapa.br/uzum/def_b.html. Acesso em: 9 jan. 2023.

MELO, G. W. B. de. **Excesso de Boro (B)**. Brasília, DF: Embrapa, 2020b. (UZUM Uva - Sistema especialista para diagnóstico de doenças, pragas e distúrbios fisiológicos em videiras). Disponível em: https://www.cnpuv.embrapa.br/uzum/uva/excesso_b.html. Acesso em: 9 jan. 2023.

MOGHADAM, H. R. T.; ZAHEDI, H.; ASHKIANI, A. Effect of zinc foliar application on auxin and gibberellin hormones and catalase and superoxide dismutase enzyme activity of corn (*Zea mays* L) under water stress. **Maydica**, v. 58, n. 3/4, p. 218-223, 2013.

MORTVEDT, J. J. Tecnologia e Produção de Fertilizantes com Micronutrientes: Presença de Elementos Tóxicos. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. van. **Micronutrientes e elementos tóxicos na Agricultura**. Jaboticabal: CNPq; FAPESP; POTAFOS, 2001. p. 237-251.

MURGIA, I.; MARZORATI, F.; VIGANI, G.; MORANDINI, P. Plant iron nutrition: the long road from soil to seeds. **Journal of Experimental Botany**, v. 73, n. 6, p. 1809-1824, 2022.

NACHTGALL, G. R. **Deficiência de Ferro (Fe)**. Brasília, DF: Embrapa, 2020a. (UZUM maçã - Sistema especialista para diagnóstico de doenças, pragas e distúrbios fisiológicos em macieiras). Disponível em: https://www.cnpuv.embrapa.br/uzum/maca/defic_fe.html. Acesso em: 12 jan. 2023.

NACHTGALL, G. R. **Deficiência de Zinco (Zn)**. Brasília, DF: Embrapa, 2020b. (UZUM maçã - Sistema especialista para diagnóstico de doenças, pragas e distúrbios fisiológicos em macieiras). Disponível em: https://www.cnpuv.embrapa.br/uzum/maca/defic_zn.html. Acesso em: 9 jan. 2023.

NAVA, G. **Deficiência de Ferro (Fe)**. Brasília, DF: Embrapa, 2020a. (UZUM Pêssego - Sistema especialista para diagnóstico de doenças, pragas e distúrbios fisiológicos em pessegueiros). Disponível em: https://www.cnpuv.embrapa.br/uzum/pessego/defic_fe.html. Acesso em: 12 jan. 2023.

NAVA, G. **Deficiência de Manganês (Mn)**. Brasília, DF: Embrapa, 2020b. (UZUM Morango - Sistema especialista para diagnóstico de doenças, pragas e distúrbios fisiológicos em pessegueiros). Disponível em: https://www.cnpuv.embrapa.br/uzum/pessego/defic_mn.html. Acesso em: 6 fev. 2023.

NAVA, G.; NAVROSKI, R.; BENATI, A. T.; BARRETO, C. F. **Deficiência de Manganês (Mn)**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. (UZUM Morango - Sistema especialista para diagnóstico de doenças, pragas e distúrbios fisiológicos em morangueiros). Disponível em: https://www.cnpuv.embrapa.br/uzum/morango/defic_mn.html. Acesso em: 6 fev. 2023.

NAVA, G. **Deficiência de Cobre (Cu)**. Brasília, DF: Embrapa, 2020c. (UZUM Pêssego - Sistema especialista para diagnóstico de doenças, pragas e distúrbios fisiológicos em pessegueiros). Disponível em: https://www.cnpuv.embrapa.br/uzum/pessego/defic_cu.html. Acesso em: 20 mar. 2024.

PARADISONE, V.; NAVARRO-LEÓN, E.; RUIZ, J. M.; ESPOSITO, S.; BLASCO, B. Calcium silicate ameliorates zinc deficiency and toxicity symptoms in barley plants through improvements in nitrogen metabolism and photosynthesis. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 43, n. 12, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11738-021-03325-y>. Acesso em: 9 fev. 2023.

PERIS-PERIS, C.; SERRA-CARDONA, A.; SÁNCHEZ-SANUY, F.; CAMPO, S.; ARIÑO, J.; SAN-SEGUNDO, B. Two NRAMP6 Isoforms Function as Iron and Manganese Transporters and Contribute to Disease Resistance in Rice. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 30, n. 5, p. 385-398, 2017.

PRADO, R. de M. **Nutrição de Plantas**. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2020. 416 p.

PRICE, C. A.; MILLAR, E. Zinc, growth, and respiration in euglena. **Plant Physiology**, v. 37, n. 3, p. 423-427, 1962.

QUAGGIO, J. A.; GALLO, P. B.; OWINO-GERROH, C.; ABREU, M. F.; CANTARELLA, H. Peanut response to lime and molybdenum application in low pH soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 659-664, 2004.

RESENDE, A. V. de. **Adubação da soja em áreas de Cerrado: micronutrientes**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 29 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 115).

RIBEIRO, J. C.; LOIOLA, J. A. D. Tratamento de sementes com micronutrientes e enraizadores. **Campo & Negócios**, 2021. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/tratamento-de-sementes-com-micronutrientes-e-enraizadores-2/>. Acesso em: 20 jul. 2022.

ROLLEFSON, G. K. The sensitized photosynthesis of carbon dioxide at low chlorine pressures. **Journal of the American Chemical Society**, v. 52, n. 9, p. 3562-3567, 1930.

ROUACHED, H.; TRAN, L-S. P. Regulation of plant mineral nutrition: transport, sensing and signaling. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 16, n. 12, p. 29717-29719, 2015.

RUSTIONI, L.; GROSSI, D.; BRANCADORO, L.; FAILLA, O. Characterization of iron deficiency symptoms in grapevine (*Vitis* spp.) leaves by reflectance spectroscopy. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 118, p. 342-347, 2017.

SCHIAVON, M. The fascinating facets of plant selenium accumulation – biochemistry, physiology, evolution and ecology. **The New Phytologist**, v. 213, n. 4, p. 1582-1596, 2017.

SHAPIRA, O.; ISRAELI, Y.; SHANI, U.; SCHWARTZ, A. Salt stress aggravates boron toxicity symptoms in banana leaves by impairing guttation. **Plant, Cell and Environment**, v. 36, n. 2, p. 275-287, 2013.

SHI, Z.; ZHANG, J.; WANG, F.; LI, K.; YUAN, W.; LIU, J. Arbuscular mycorrhizal inoculation increases molybdenum accumulation but decreases molybdenum toxicity in maize plants grown in polluted soil. **RSC Advances**, v. 8, n. 65, p. 37069-37076, 2018.

SHU, Y.; ZHANG, F.; WANG, H. Manganese–cerium mixed oxides supported on rice husk based activated carbon with high sulfur tolerance for low-temperature selective catalytic reduction of nitrogen oxides with ammonia. **RSC Advances**, v. 9, n. 41, p. 23964-23972, 2019.

SILVA, A. da; FRANZINI, V. I.; PICCOLLA, C. D.; MURAOKA, T.; Molybdenum supply and biological fixation of nitrogen by two Brazilian common bean cultivars. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 100-105, 2017.

STEIN, R. J.; LOPES, S. I. G.; FETT, J. P. Iron toxicity in field-cultivated rice: contrasting tolerance mechanisms in distinct cultivars. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 135-146, 2014.

SUDHALAKSHMI, C.; KRISHNASAMY, R.; RAJARAJAN, A.; MEENA, S. Genotypic divergence in expression of zinc-deficiency symptoms of rice (*Oryza sativa* L.) in sand culture. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 45, n. 22, p. 2932-2948, 2015.

VALE, F.; ALCARDE, J. C. Avaliação química de fertilizantes com micronutrientes tipo fritas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 1, p. 165-170, 2003.

WANG, H.; TANG, S.; ZHI, H.; XING, L.; ZHANG, H.; TANG, C.; WANG, E.; ZHAO, M.; JIA, G.; FENG, B.; DIAO, X. The boron transporter SiBOR1 functions in cell wall integrity, cellular homeostasis, and panicle development in foxtail millet. **The Crop Journal**, v. 10, n. 2, p. 342-353, 2022.

WANG, M.; GAO, L.; DONG, S.; SUN, Y.; SHEN, Q.; GUO, S. Role of silicon on plant-pathogen interactions. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 701, 2017.

WANG, Q.; LU, L.; WU, X.; LI, Y.; LIN, J. Boron influences pollen germination and pollen tube growth in *Picea meyeri*. **Tree Physiology**, v. 23, n. 5, p. 345-351, 2003.

YACHANDRA, V. K.; SAUER, K.; KLEIN, M. P. Manganese cluster in photosynthesis: where plants oxidize water to dioxygen. **Chemical Reviews**, v. 96, n. 7, p. 2927-2950, 1996.

YRUELA, I. Cooper in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 1, p. 145-151, 2005.

ZHANG, L.; JEEN, M.; OKAMOTO, K.; WATANABE, S. Photochemistry and the role of light during the submerged photosynthesis of zinc oxide nanorods. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 177-2013, 2018.

ZHANG, Y.; FAN, J.; YANG, B.; HUANG, W.; MA, L. Copper-catalyzed activation of molecular oxygen for oxidative destruction of acetaminophen: The mechanism and superoxide-mediated cycling of copper species. **Chemosphere**, v. 166, p. 89-95, 2017.

ZUAZO, P. Adubação com micronutrientes: zinco, manganês, cobre e boro. **Jornal Dia de Campo**, 2009. Disponível em: <http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?secao=Pacotes%20Tecnol%F3gicos&id=19308>. Acesso em: 22 jul. 2022.

