

INTRODUÇÃO

Dezessete elementos são considerados essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas: carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O); nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e zinco (Zn). Alguns elementos são classificados como benéficos para algumas plantas, como o sódio (Na), silício (Si), selênio (Se) e cobalto (Co). Os nove primeiros (exceto o K) participam da formação dos tecidos vegetais e representam, aproximadamente, 99 % da sua massa.

Carbono, H e O são estudados nas suas múltiplas funções na fisiologia vegetal. Sob o ponto de vista da nutrição mineral, os elementos essenciais são classificados em macro e micronutrientes, de acordo com as quantidades exigidas pelas plantas. Os macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) são exigidos em maiores quantidades (da ordem de g kg⁻¹ de matéria seca da planta). Já os micronutrientes (B - Cl - Cu - Fe - Mn - Mo - Ni - Zn) são absorvidos pelas plantas em pequenas quantidades (da ordem de mg kg⁻¹ de matéria seca da planta).

É necessário que haja disponibilidade e absorção dos nutrientes em proporções adequadas, via solução do solo ou, como suplementação, via foliar. Cada um destes nutrientes tem uma função específica no metabolismo das plantas. Desequilíbrios em suas proporções podem causar deficiência ou excesso de nutrientes, causando limitações ao crescimento das plantas ou mesmo sua morte.

CRITÉRIOS DE ESSENCIALIDADE

A presença de elementos químicos nas cinzas de uma planta não é indicador da essencialidade quantitativa ou qualitativa dos diferentes elementos para esta planta, como demonstraram Arnon & Stout (1939), em cultivos hidropônicos. Esses autores estabeleceram três critérios que devem ser atendidos para que um elemento possa ser considerado essencial:

Critério 1: Um elemento é essencial se sua deficiência impede que a planta complete o seu ciclo vital.

Critério 2: Para ser essencial, o elemento não pode ser substituído por outro elemento com propriedades similares. Por exemplo: O Na apresenta propriedades semelhantes ao K, contudo não pode substituir completamente o K.

Critério 3: O último critério que deve ser cumprido é que o elemento deve participar diretamente no metabolismo da planta e promover seu benefício não só com o objetivo de melhorar as características do solo, por meio do crescimento da microflora, mas também de possibilitar outro efeito benéfico à planta.

FERTILIDADE DO SOLO

III - ELEMENTOS REQUERIDOS
À NUTRIÇÃO DE PLANTAS

Antonio Roque Dechen^{1/} & Gilmar Ribeiro Nachtigall^{2/}

^{1/} Professor do Departamento de Ciência do Solo - ESALQ/USP.
Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba (SP).
ardechen@esalq.usp.br

^{2/} Engenheiro-Agrônomo, Pesquisador da Embrapa Uva e Vinho.
Caixa Postal 130, CE 95700-000 Bento Gonçalves (RS).
gilmar@cnpv.embrapa.br

Conteúdo

INTRODUÇÃO .....	.....
CRITÉRIOS DE ESSENCIALIDADE .....	.....
MACRO E MICRONUTRIENTES .....	.....
Macronutrientes .....	.....
Nitrogênio .....	.....
Fósforo .....	.....
Potássio .....	.....
Cálcio .....	.....
Magnésio .....	.....
Enxofre .....	.....
Micronutrientes .....	.....
Boro .....	.....
Cloro .....	.....
Cobre .....	.....
Ferro .....	.....
Manganês .....	.....
Molibdênio .....	.....
Níquel .....	.....
Zinco .....	.....
ELEMENTOS BENÉFICOS .....	.....
Sódio .....	.....
Silício .....	.....
Selênio .....	.....
Cobalto .....	.....
LITERATURA CITADA .....	.....

SBCS, Viçosa, 2007. Fertilidade do Solo, 1019p. (eds. NOVAIS, R.F., ALVAREZ V., V.H., BARROS, N.F., FONTES, R.L.F., CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L.).

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ-V., J. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed). Fertilidade do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 91-132.

Estes três critérios podem ser assim resumidos: Um elemento é considerado essencial quando ele faz parte de uma molécula essencial ao metabolismo da planta. É o caso do Mg, como constituinte da clorofila, ou do N, como constituinte de proteínas. Assim, mesmo que um elemento possibilite melhorar o crescimento ou um processo fundamental de uma planta, não é considerado como essencial se não atender aos três critérios da essencialidade. Todos os 17 elementos apresentados (Quadro 1) cumprem estas exigências e devem ser fornecidos às plantas para que estas germinem, cresçam, floresçam e produzam sementes.

Pelo exposto, a presença de um elemento em altas concentrações em uma planta não constitui indicador seguro de sua essencialidade, já que as plantas apresentam capacidade de absorção seletiva limitada, de modo que podem absorver pelas raízes elementos minerais não-essenciais e, ou, mesmo tóxicos.

Alguns elementos são classificados como benéficos para algumas plantas, como o sódio (Na), selênio (Se), silício (Si) e cobalto (Co). Exemplificando, existem algumas espécies de plantas de mangue que acumulam Na, algumas plantas de deserto, como *Atriplex vesicaria* e *Halogeton glomeratus*, requerem Na para o seu crescimento e

Quadro 1. Relação dos elementos essenciais às plantas superiores, com as concentrações médias na matéria seca da parte aérea e os respectivos autores que demonstraram a essencialidade e o ano em que ocorreu a descoberta

Elemento	Concentração na matéria seca	Demonstração da essencialidade	
		Autor	Ano
	g kg ⁻¹		
Carbono (C)	450	Saussure	1804
Oxigênio (O)	450	Saussure	1804
Hidrogênio (H)	60	Saussure	1804
Nitrogênio (N)	15	Saussure	1804
Potássio (K)	10	Sachs & Knop	1860, 1865
Cálcio (Ca)	5	Sachs & Knop	1860, 1865
Fósforo (P)	2	Ville	1860
Magnésio (Mg)	2	Sachs & Knop	1860, 1865
Enxofre (S)	1	Sachs & Knop	1865
	mg kg ⁻¹		
Cloro (Cl)	100	Broyer et al.	1954
Manganês (Mn)	50	Mazé, McHargue	1915, 1922
Boro (B)	20	Warrington	1923
Zinco (Zn)	20	Sommer & Lipman	1926
Ferro (Fe)	10	Sachs & Knop	1860, 1865
Cobre (Cu)	6	Lipman & McKinney	1931
Níquel (Ni)	3	Brown et al.	1987
Molibdênio (Mo)	0,1	Arnon & Stout	1939

Fonte: Malavolta (1980); Glass (1983); Marschner (1995); Epstein & Bloom (2005).

desenvolvimento, enquanto, para a *Amaranthus tricolor*, (metabolismo C4) o Na é essencial quando em condições de baixas concentrações de CO₂; por outro lado, existem plantas, como *Astragalus*, *Stanleya* e *Lecythis*, que crescem em solos com altas concentrações de Se, constituindo plantas acumuladoras deste elemento. Tem sido proposto que os silicatos em folhas e inflorescências de gramíneas podem impedir ou diminuir o ataque por insetos. O Co é necessário à fixação do N₂ atmosférico por bactérias dos nódulos das raízes de leguminosas, bem como para bactérias de vida livre que fixam N₂.

Desta forma, os elementos requeridos pelas plantas podem ser classificados como essenciais ou benéficos; contudo, esta listagem atual poderá ser ampliada, uma vez que, com o avanço das técnicas analíticas, outros elementos exigidos em quantidades mínimas poderão vir a ser considerados essenciais ou benéficos às plantas.

MACRO E MICRONUTRIENTES

Neste texto, não serão feitas referências detalhadas aos elementos C, H e O. Como estes elementos são supridos à planta essencialmente via CO₂ na fotossíntese, e via H₂O absorvida do meio de crescimento, são tratados de modo particular na Fisiologia Vegetal.

Cada um destes nutrientes tem uma função específica no metabolismo das plantas. A seguir, são descritas as principais funções dos nutrientes minerais e a forma como se caracterizam a deficiência ou o excesso desse nutriente. Deve-se considerar que os sintomas de deficiência estão relacionados com a mobilidade dos nutrientes no floema, já que nutrientes classificados como móveis, por se translocarem facilmente, têm a sintomatologia de deficiência expressa nas folhas mais velhas. Por outro lado, os nutrientes que participam de estruturas celulares da planta, por apresentarem menor mobilidade de redistribuição, têm os sintomas de deficiência expressos nas folhas mais novas.

Macronutrientes

Nitrogênio

O N é considerado o elemento mais abundante da atmosfera terrestre, representando 78 % do volume. É componente de toda a matéria viva (representa aproximadamente 18 % do peso das proteínas).

O N em estado natural ocorre na forma combinada com o K (KNO₃) e com o Na como salitre de Chile (NaNO₃). Na atmosfera, chuva, solo e no guano, ocorre na forma de amônio ou sais de amônio; na água do mar, como íons de amônio, nitrito e nitrato. Nos organismos vivos, aparece formando complexos orgânicos em proteínas, ácidos nucleicos, e clorofila, além de constituir parte do protoplasma (Havlin et al., 1999). O N em compostos orgânicos ocorre quase exclusivamente no estado reduzido, onde forma três ligações covalentes e dispõe de um par de elétrons não compartilhados.

Os teores de N no solo na forma mineral são pequenos, variando desde traços até 5 g kg^{-1} nas camadas superficiais dos solos, diminuindo com a profundidade. O teor de N depende também do tipo de solo, da temperatura e da pluviosidade. Em regiões de condições de umidade uniforme e vegetação similar, os teores médios de N e de matéria orgânica do solo decrescem exponencialmente, à medida que aumenta a temperatura média (veja capítulo VII).

O N disponível no solo se encontra, principalmente, na forma de NO_3^- . A camada arável do solo pode ter um teor de N, na forma de NO_3^- (N-NO_3^-), entre 2 e 60 mg kg^{-1} . Este teor varia com a estação climática, já que o NO_3^- é muito solúvel na água, de modo que as águas de chuva e de irrigação podem arrastar o nutriente para o subsolo (Raij, 1991).

Forma de absorção: As plantas absorvem a maior parte do N em forma de íons NH_4^+ ou NO_3^- . Um pouco de uréia pode ser absorvida diretamente pelas folhas, bem como pequenas quantidades de N podem ser obtidas de materiais como aminoácidos solúveis em água. Com exceção do arroz, os cultivos agrícolas absorvem a maior parte do N como NO_3^- ; no entanto, em estudos recentes, verificou-se que a maioria das culturas pode absorver quantidades apreciáveis de NH_4^+ , quando na solução do solo. Certos híbridos de milho têm uma alta exigência de NH_4^+ e a absorção desta forma de N ajuda a incrementar o rendimento de grãos. O trigo também se beneficia da nutrição com NH_4^+ . O N pode também ser absorvido por meio de bactérias fixadoras do N_2 atmosférico que participam de interação simbiótica com as raízes de leguminosas.

O N, uma vez absorvido da solução do solo ou fixado do ar, incorpora-se na planta na forma de aminoácidos. À medida que aumenta o fornecimento de N, as proteínas sintetizadas a partir dos aminoácidos promovem o crescimento das folhas, aumentando a superfície fotossintética.

Uma das razões pelas quais se obtêm rendimentos mais altos com a absorção de uma parte do N como NH_4^+ é que este cátion é assimilado diretamente pela planta para a formação de aminoácidos. Já o ânion NO_3^- deve ser reduzido a NH_4^+ para assimilação do N pela planta. A redução de NO_3^- no interior da planta requer energia (o NO_3^- é reduzido a NH_4^+ que, depois, é convertido em aminoácidos na planta). Esta energia é proporcionada por carboidratos, os quais podem ser utilizados para o crescimento ou para a formação do grão.

Funções: O N é necessário para a síntese da clorofila e está envolvido no processo da fotossíntese, já que faz parte da molécula da clorofila. A deficiência de N proporciona menor síntese de clorofila (Figura 1). Esta situação não permite que a planta utilize a luz solar como fonte de energia no processo fotossintético; deste modo, a planta perde a habilidade de executar funções essenciais, como, por exemplo, a absorção de nutrientes. O N é um componente das vitaminas e dos sistemas energéticos na planta. É também um componente dos aminoácidos, os quais formam proteínas. Portanto, o N é diretamente responsável pelo incremento do conteúdo de proteínas.

Teores na planta: Os teores de N nas plantas variam entre 2 e 75 g kg^{-1} de matéria seca da planta, considerando-os teores entre 20 e 50 g kg^{-1} como adequados para um

crescimento normal das plantas. As plantas deficientes apresentam teores foliares menores do que 10 g kg^{-1} , enquanto, acima de 50 g kg^{-1} , podem-se observar sintomas de toxidez (Malavolta, 1980; Malavolta et al., 1989; Pais & Jones Junior, 1996; Furlani, 2004).

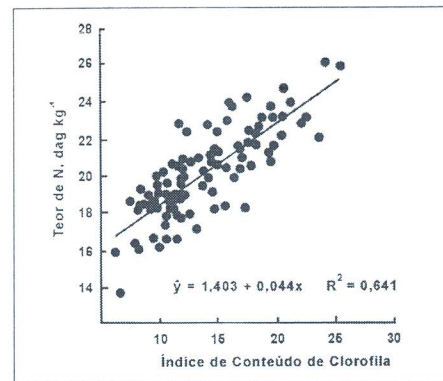


Figura 1. Relação entre o teor de nitrogênio e o índice de conteúdo de clorofila em folhas de *Acer saccharum*.

Fonte: Adaptado de van der Berg & Perkins (2004).

Sintomas de deficiência ou excesso: As plantas que crescem em concentrações baixas de N apresentam coloração verde-claro, caracterizada por clorose generalizada, que se acentua, principalmente, nas folhas velhas (Figura 2), já que o N é um elemento móvel quanto à redistribuição nas plantas, podendo ser retranslocado na forma de NO_3^- ou de aminoácidos e aminas (Furlani, 2004). As folhas novas permanecem com cor verde por períodos mais longos, por receberem o N solúvel das folhas mais velhas. Algumas plantas, como tomateiro e milho, exibem uma coloração purpúrea do caule e colmo, pecíolos e parte basal das folhas, resultante da concentração de antocianinas. A relação de matéria seca, parte aérea/raiz normalmente é baixa, já que predomina o crescimento radicular sobre o foliar. Plantas com deficiência de N apresentam menor crescimento.

O excesso de N provoca crescimento excessivo da parte aérea, o que pode provocar o acamamento de gramíneas. Para outras espécies, o excesso de N pode provocar redução na qualidade do produto.

Fósforo

O teor total médio de P na litosfera é de $2,8 \text{ g kg}^{-1}$ de P_2O_5 ; contudo, muitos solos contêm de 0,2 a $0,8 \text{ g kg}^{-1}$ de P (Fassbender, 1994). O P encontra-se em compostos que estão distribuídos em muitas rochas, minerais, plantas e animais. No solo, o P pode ser encontrado em formas orgânicas e inorgânicas (veja capítulo VIII).

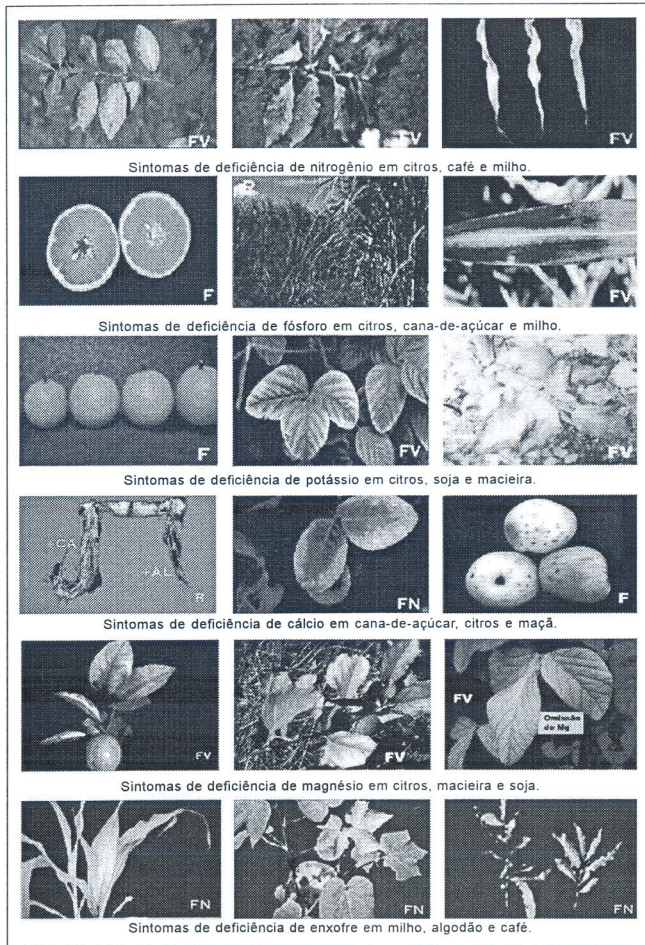


Figura 2. Sintomas de deficiência de macronutrientes.

Fonte: Departamento de Solos e Nutrição de Plantas - ESALQ/USP. (FV = folhas velhas; FN = folhas novas; F = frutos; R = raízes).

O P de compostos orgânicos (Po) é encontrado na forma de fosfolípidios, ácidos nucleicos e fosfatos de inositol. O Po, expresso como porcentagem do P total, pode variar de 15 a 80 %. Na forma de fosfolípidios, as concentrações variam em torno de 5 % do Po. O P na forma de ácidos nucleicos pode atingir valores de 2,5 %. O Po deve ser mineralizado antes de ser absorvido pelas plantas. O P de compostos inorgânicos (Pi) encontra-se sob várias formas, as quais dependem do pH (veja capítulo VIII). Uma pequena fração, normalmente menor de 1 mg L^{-1} , encontra-se na solução do solo, em equilíbrio com o P adsorvido pelos colóides do solo (Havlin et al., 1999).

O pH do solo controla a disponibilidade para as plantas das formas iônicas do fósforo. O ânion monovalente H_2PO_4^- tem sua disponibilidade aumentada em valores de pH abaixo de 7, enquanto o ânion divalente HPO_4^{2-} tem sua disponibilidade aumentada em valores de pH acima de 7. Em situações de pH muito alcalino, quase todo o P se encontra sob a forma de PO_4^{3-} , a qual não é absorvida pelas plantas. Em solos muito ácidos, as concentrações de Fe e Al em solução são bastante altas, podendo provocar a precipitação do P como fosfatos de Fe e Al, como, por exemplos, a estrengita ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e variscita ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Em solos alcalinos e calcários, o P do solo encontra-se presente como hidroxiapatita $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e carbonatoapatita $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCO}_3$.

Forma de absorção: As plantas absorvem a maior parte do P como o ânion monovalente - ortofosfato biácido - H_2PO_4^- , e, em menor proporção, como o anion bivalente - ortofosfato monoácido - HPO_4^{2-} . O pH do solo influi, em grande parte, na proporção em que estas duas formas de P estão disponíveis para absorção pela planta. As plantas podem utilizar outras formas de P, mas em menores quantidades do que o ortofosfato.

Funções: O P desempenha papel importante na fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia, divisão e crescimento celular, dentre outros processos que ocorrem na planta. O P é importante na transferência de energia como parte do trifosfato de adenosina (ATP), como componente de muitas proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos e substratos metabólicos. Em situações onde se aumenta o suprimento de P no solo de uma condição de deficiência até outra de adequada disponibilidade de P, verifica-se que as principais frações de P contidas em órgãos vegetativos das plantas também aumentam (Quadro 2). Além disto, o P promove a rápida formação e crescimento das raízes (Figura 3), melhora a qualidade dos frutos, hortaliças e grãos, sendo vital à formação da semente, bem como está envolvido na transferência de características hereditárias.

Quadro 2. Efeito do suprimento de fósforo nas frações de fósforo em folhas de fumo

P aplicado	Fração de P			
	Lípideos	Éster	Ácidos nucleicos	Pi
mg L ⁻¹	mg kg ⁻¹			
2	320	360	740	330
6	830	910	1.340	830
S	890	1.040	1.350	1.230
20	910	1.090	1.420	3.380

Fonte: Adaptado de Marschner (1995).

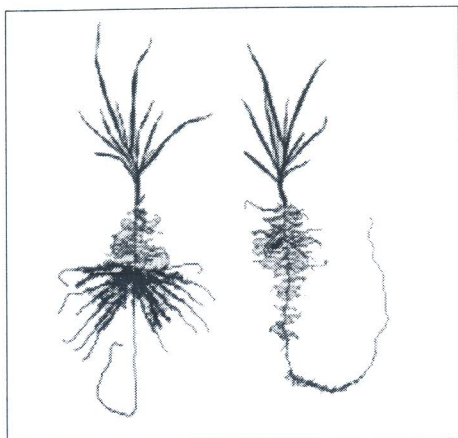


Figura 3. Raízes de plantas desenvolvidas na região do solo enriquecida com fósforo (esquerda) comparadas com as do solo sem enriquecimento de fósforo (direita).

Fonte: Adaptado de Drew & Saker (1978).

Teores na planta: Os teores de P nas plantas variam de 0,5 a 3,0 g kg⁻¹ de matéria seca da planta, considerando-se teores entre 1,0 e 1,5 g kg⁻¹ como adequados para um crescimento normal das plantas. Plantas deficientes apresentam teores foliares menores do que 1,0 g kg⁻¹, enquanto acima de 3,0 g kg⁻¹ podem-se observar sintomas de toxidez (Malavolta, 1980; Malavolta et al., 1989; Pais & Jones Junior, 1996; Furlani, 2004).

Sintomas de deficiência e excesso: Como o P se move rapidamente dos tecidos mais velhos para os mais jovens, a deficiência aparece primeiro nas partes baixas da planta (folhas velhas). À medida que as plantas se tornam mais velhas, a maior parte do P move-se para as sementes ou para os frutos. O primeiro sinal de deficiência de P manifesta-se na forma de plantas pequenas. As folhas se apresentam torcidas. Quando a deficiência é severa, ocorre o aparecimento de áreas mortas nas folhas, no fruto e no caule (Figura 2). As folhas com sintomas apresentam coloração púrpura ou avermelhada, associada ao acúmulo de antocianinas (estes sintomas ocorrem com frequência em plantas de milho e em outras espécies deficientes em P, especialmente em temperaturas baixas). A deficiência de P retarda a maturação dos cultivos.

São raros os sintomas de excesso de P; contudo, plantas sensíveis podem manifestar sintomas em condições cuja concentração nas folhas seja superior ou igual a 3 g kg⁻¹. Nestas condições, ocorrem manchas vermelho-escuras nas folhas mais velhas. Deficiência de Zn em solos ricos em P pode provocar a absorção e acúmulo de P em excesso promovendo sintomas semelhantes aos da deficiência de Zn (Malavolta, 2004).

Potássio

É o sétimo elemento mais abundante na crosta terrestre. O K constitui 2,6 % das rochas ígneas da crosta terrestre. É encontrado no solo em minerais primários e intemperizados, bem como nas formas: trocável, não trocável e solúvel em água (veja capítulo IX).

Os minerais primários que contêm K em maior abundância são os feldspatos potássicos (ortoclásio e microclinas) e as micas (biotita e muscovita) (Diest, 1979). Segundo Schroeder (1979), os feldspatos potássicos e as micas apresentam teores de K ao redor de 140 e 100 g kg⁻¹, respectivamente. Dentre os minerais secundários, destacam-se as argilas 2:1: ilita, vermiculita e montmorilonita, com teores de K₂O variando de 40 a 70, 0 a 20, e 0 a 5 g kg⁻¹, respectivamente. Cabe ressaltar que, quanto mais intemperizados forem os solos, menos abundantes são esses minerais (veja capítulo IV).

Para a nutrição das plantas, as formas disponíveis no solo são a trocável e o K em solução (rapidamente absorvível); o não-trocável atua como uma reserva do elemento no solo. Contudo, a disponibilidade de K nos solos é dependente de sua mineralogia (Figura 4), uma vez que a produção relativa máxima para os solos com predomínio de argilominerais 2:1 foi obtida com teores mais altos deste nutriente do que nos solos com predomínio de argilominerais 1:1.

Forma de absorção: O K é absorvido da solução do solo pelas plantas na forma iônica (K⁺). De forma distinta do N e do P, o K não forma compostos orgânicos em plantas. Sua função principal está relacionada fundamentalmente com muitos e variados processos metabólicos.

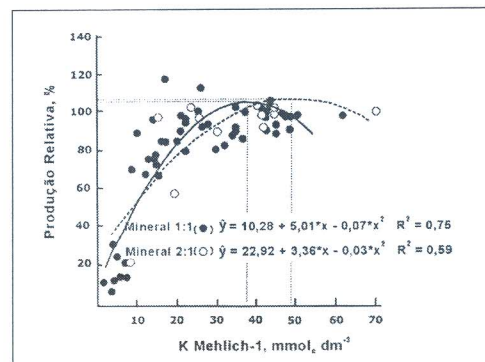


Figura 4. Relação entre a produção relativa de trigo e os teores de potássio extraiáveis pelo método Mehlich-1 em 11 solos da região sul do Rio Grande do Sul, de acordo com a mineralogia.

Fonte: Nachtigall & Raij (2005).

Funções: O K é um dos elementos essenciais na nutrição da planta e um dos três que se encontra, na forma disponível, em pequenos teores nos solos tropicais muito intemperizados, limitando o rendimento dos cultivos. É o cátion mais abundante nas células, com concentrações superiores a 100 mmol L⁻¹. Altas concentrações de K são necessárias para a ativação de muitas enzimas que participam do metabolismo da planta.

O K é vital para a fotossíntese. Em situações de deficiência de K, ocorre redução da fotossíntese e aumento da respiração da planta. Estas duas condições (redução na fotossíntese e incremento na respiração), quando existe deficiência de K, reduzem a acumulação de carboidratos, tendo, como conseqüências, as reduções do crescimento e da produção da planta.

O K tem elevada contribuição para o potencial osmótico da planta. O processo de abertura e fechamento dos estômatos é regulado pela concentração de K nas células guardas, sua deficiência não permite que os estômatos se abram totalmente e que sejam rápidos ao fechar-se, causando limitado controle sobre a perda de água das plantas.

O íon K⁺ parece estar envolvido em várias funções fisiológicas, tais como: transporte no floema, turgescência das células estomáticas e crescimento celular. O K atua como um cofator ou ativador de muitas enzimas do metabolismo de carboidratos e proteínas. Uma das mais importantes é a piruvato-quinase, enzima principal da glicólise e respiração. De modo geral, as necessidades nutricionais de K estão relacionadas com quatro papéis bioquímicos e fisiológicos: ativação enzimática, processos de transporte através de membranas, neutralização aniônica e potencial osmótico.

O K tem grande impacto na produtividade e na qualidade dos cultivos, afetando o incremento do peso e a qualidade de grãos de milho, conteúdo de óleo e proteínas na soja, quantidade do açúcar na cana-de-açúcar e em frutos, de modo geral, na resistência e comprimento da fibra do algodão e outros cultivos que produzem fibra. Para a cultura da macieira, verifica-se que o aumento da disponibilidade de K, a partir de uma condição de deficiência do nutriente no solo, proporciona aumento dos teores de sólidos solúveis dos frutos (Figura 5) e aumento na intensidade de coloração vermelha da película dos frutos. Outro efeito atribuído ao K refere-se à resistência das plantas ao ataque de doenças.

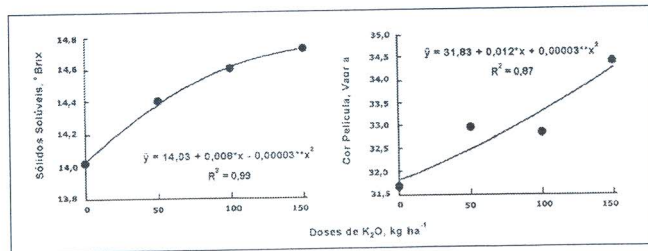


Figura 5. Teor de sólidos solúveis e cor da película do fruto (valor a) do cv. Gala de acordo com as doses de potássio.

Fonte: Carraro et al. (2004).

Teores na planta: Os teores de K nas plantas variam entre 6 e 50 g kg⁻¹ de matéria seca da planta, considerando valores entre 10 e 30 g kg⁻¹ como adequadas para um crescimento normal das plantas. Plantas deficientes apresentam teores foliares menores do que 8 g kg⁻¹, enquanto, acima de 50 g kg⁻¹, podem-se observar sintomas de toxidez (Malavolta, 1980; Malavolta et al., 1989; Pais & Jones Junior, 1996; Furlani, 2004).

Sintomas de deficiência e excesso: Como o K é elemento móvel quanto à redistribuição na planta, as deficiências aparecem primeiro nos tecidos mais velhos da planta (inferiores). Um dos sintomas mais comuns de deficiência de K é a necrose das margens das folhas (Figura 2). Na maioria dos cultivos, a necrose inicia-se pelas folhas velhas, especialmente em gramíneas. As plantas com deficiência de K crescem lentamente, apresentando sistema radicular mal desenvolvido, colmos frágeis, sendo comum o acamamento. As sementes e os frutos são pequenos e desuniformes. As plantas têm baixa resistência às doenças. Alguns sintomas de deficiência de K, específicos a alguns cultivos, são:

- **Bananeira:** folhas inferiores pequenas que se tornam amarelas das pontas para dentro da folha, a ponta da folha se dobra para dentro, as folhas mortas se rompem na base da lâmina.
- **Milho:** encurtamento dos entre nós e crescimento reduzido. Ocorre queima ou secamento das margens externas da folha, enquanto a parte média permanece verde, espigas que não se enchem completamente e grão de baixa qualidade.
- **Frutíferas:** folhas de uma cor verde amarelada, cujas margens se dobram para acima, presença de áreas secas nas margens das folhas que depois se rasgam, fruto pequeno que cai prematuramente, fruto de baixa qualidade.
- **Batata:** as folhas superiores são pequenas, enrugadas e de uma cor verde mais escura do que o normal, necrose nas pontas e nas margens, clorose intervalar nas folhas velhas.
- **Soja:** queima ou secamento que se inicia nas nervuras da folha que depois se torna quebradiça e de mau aspecto à medida que a folha senesce. As folhas são frágeis e as sementes enrugadas.

São raros os sintomas causados pelo excesso de K; contudo, quando ocorre acúmulo de K nas folhas mais velhas, este pode causar desidratação nas células vizinhas e rompimento de membranas nas células, provocando o aparecimento de manchas necróticas nas folhas.

Cálcio

Constitui 3,6 % da crosta terrestre (quinto elemento em abundância). É encontrado em calcita, gesso, conchas de ostras e corais. Os minerais primários de Ca mais importantes são a anortita, que contém entre 70 e 140 g kg⁻¹ de Ca, e os piroxênios, com 90 a 160 g kg⁻¹ de Ca. Baixos teores de Ca podem estar presentes em borossilicatos. O Ca está presente também, em apatitas, compostos isomorfos de Ca₅(PO₄)₃F e Ca₃(PO₄)₂Cl, em fosfatos, tais como: o fosfato monocálcico (Ca(H₂PO₄)₂), o dicálcico (CaHPO₄) e o ortofosfato

Forma de absorção: O Mg é absorvido pelas plantas na forma Mg^{2+} . Por suas características, a absorção do Mg pode ser fortemente afetada pela disponibilidade de K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} e Mn^{2+} .

Funções: Mais de 70 % do Mg difunde-se livremente na suspensão celular, bem como associado a componentes carregados negativamente, tais como proteínas e nucleotídeos por meio de ligações iônicas. Grande quantidade de Mg está, provavelmente, ligada a polifosfatos, como o Mg-ATP.

Dependendo da abundância relativa de K, o Mg pode contribuir para neutralizar os fosfoaçúcares, açúcares-nucleotídeos, ácidos orgânicos e aminoácidos. A propriedade mais importante do Mg é a solubilidade de seus compostos. Sua abundância sugere uma multiplicidade de funções, principalmente como ativador de reações enzimáticas. Dentre as reações das quais participa o Mg, estão as de transferência de fosfato ou nucleotídeos (fosfatases, quinases, ATPases, sintetases, nucleotídeo-transferases), de grupos carboxílicos (carboxilases, descarboxilases) e de ativadores de desidrogenase, mutase e liase. O Mg tem papel estrutural como componente da molécula de clorofila (Figura 7), é requerido para manter a integridade dos ribosomas e sem dúvida contribui para manter a estabilidade estrutural dos ácidos nucléicos e membranas. O Mg influencia o movimento de carboidratos das folhas para outras partes da planta e estimula a captação e transporte do P na planta.

Teores na planta: Os teores de Mg nas plantas variam de 1 a 10 g kg^{-1} de matéria seca da planta, considerando-se teores entre 3 e 5 g kg^{-1} como adequados para um crescimento normal das plantas. As plantas deficientes apresentam teores foliares menores de 3 g kg^{-1} (Malavolta, 1980, Malavolta et al., 1989; Pais & Jones Junior, 1996; Furlani, 2004).

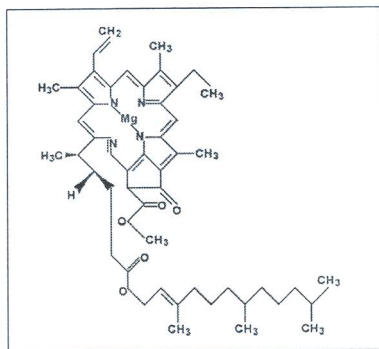


Figura 7. Fórmula estrutural da clorofila a.

Fonte: Adaptado de Castro et al. (2005).

Sintomas de deficiência e excesso: O Mg é bastante móvel no xilema e no floema, e seu transporte e redistribuição ocorrem na forma iônica (Furlani, 2004). A deficiência de Mg caracteriza-se pela ocorrência de clorose entre as nervuras, que progride em intensidade. Em estágio adiantado de deficiência, forma um "V" verde, invertido em relação ao pecíolo (Figura 2). Além disto, ocorre redução de produção e alternância de safras em plantas perenes, com a queda de folhas, ocasionando. O tamanho dos frutos é reduzido e a acidez total e vitamina C são menores nas plantas deficientes. Praticamente não existem relatos sobre a toxidez de Mg em plantas

Enxofre

Estima-se ser o nono elemento mais abundante no planeta. O S nas formas de sulfetos, sulfatos e enxofre elementar constitui aproximadamente 0,06 a 0,10 % da crosta terrestre. O S nativo ou livre encontra-se principalmente em depósitos vulcânicos sedimentares. O S está nos solos nas formas inorgânicas e orgânicas. Na solução do solo, o S está presente como íon sulfato (Havlin et al., 1999) (veja capítulo X).

Forma de absorção: O S é absorvido pelas plantas principalmente na forma inorgânica como SO_4^{2-} , depois é reduzido e incorporado a compostos orgânicos. Na reciclagem do S, este retorna ao solo na forma orgânica, onde se mineraliza por ação de microrganismos antes de ser utilizado pelas plantas superiores.

Funções: O S é um elemento importante para a produção de aminoácidos, proteínas, e clorofila, e é um componente de vitaminas e de alguns hormônios da planta. Melhora o crescimento de raízes promovendo seu vigor e robustez. O S encontra-se nas plantas nas formas orgânicas de aminoácidos, (cisteína, cistina e metionina) (Quadro 3), bem como em compostos de S (adenosina 5-fosfosulfato (APS) e 3-fosfoadenosina 5-fosfosulfato (PAPS)). Por outro lado, o S é encontrado numa variedade de ésteres de sulfato, tais como o sulfato de colina e sulfatos de polissacarídeos. O S participa como um ligante em um grande número de enzimas e metalo-proteínas.

Quadro 3. Teor de aminoácidos em proteínas de endospermas de trigo pela adubação com enxofre

Aminoácido	Teor de aminoácido	
	Controle ⁽¹⁾	Deficiência de enxofre ⁽²⁾
	μmol kg ⁻¹	
Metionina	0,688	0,313
Cisteína	1,313	0,438
Arginina	1,688	2,125
Aspartato	2,063	5,813

⁽¹⁾ 25 % do S total na matéria seca. ⁽²⁾ 10 % do S total na matéria seca.

Fonte: Adaptado de Wrigley et al. (1980).

de Ca ($\text{Ca}_4\text{H}(\text{PO}_4)_3$), que existem principalmente em solos calcários e em solos com altos valores de pH. Minerais de argila como ilita, vermiculita e montmorilonita, também, contêm pequenos teores de Ca (Fassbender, 1994).

Forma de absorção: O Ca é absorvido pelas plantas na forma do cátion Ca^{2+} . O Ca absorvido é transportado no xilema e em parte no floema. Depois de transportado para as folhas, o Ca se torna imóvel. A maior parte do Ca do tecido vegetal encontra-se sob formas não solúveis em água, como o pectato de Ca, o principal componente da lamela média da parede celular, e sais cálcicos de baixa solubilidade, como carbonatos, sulfatos, fosfatos, silicatos, citrato, malato e oxalato.

Funções: É um elemento essencial para o crescimento de meristemas e, particularmente, para o crescimento e funcionamento apropriado dos ápices radiculares. A fração principal de Ca está nas paredes celulares ou nos vacúolos e organelas, como sais de ácidos orgânicos, fosfato ou fitato. Esta fração pode ser especialmente alta em plantas que sintetizam o oxalato. O oxalato de Ca é um produto insolúvel que se deposita no vacúolo, exercendo, provavelmente, função antitóxica. O Ca é um componente da lamela média, onde exerce função cimentante como pectato de Ca.

O Ca também tem como função impedir danos à membrana celular, evitando a saída de substâncias intracelulares, exercendo papel estrutural ao manter a integridade da membrana citoplasmática. O Ca parece atuar como modulador da ação dos hormônios vegetais, regulando a germinação, o crescimento e senescência. Retarda a senescência e abscisão de folhas e frutos. O íon Ca desempenha papel importante no desenvolvimento vegetal e regulação metabólica. É reconhecido, atualmente, que o íon Ca livre atua como um regulador intracelular importante de numerosos processos bioquímicos e fisiológicos.

O Ca influi, indiretamente, no rendimento das culturas, ao melhorar as condições de crescimento das raízes, bem como por estimular a atividade microbiana, auxiliar na disponibilidade do Mo e na absorção de outros nutrientes, além de ajudar a reduzir o NO_3^- na planta. É requerido em grandes quantidades pelas bactérias fixadoras de N_2 .

Teores na planta: Os teores de Ca nas plantas variam de 5 a 80 g kg^{-1} de matéria seca, considerando-se concentrações entre 10 e 50 g kg^{-1} como adequadas para um crescimento normal das plantas. As plantas deficientes apresentam teores foliares menores de 4 g kg^{-1} (Malavolta, 1980; Malavolta et al., 1989; Pais & Jones Junior, 1996; Furlani, 2004).

Sintomas de deficiência e excesso: Um sintoma comum da deficiência de Ca é o pequeno crescimento das raízes. As raízes com deficiência de Ca tornam-se escuras e morrem. As folhas jovens e outros tecidos novos desenvolvem sintomas pelo fato de o Ca não se retranslocar na planta. Os tecidos novos precisam de Ca para a formação de suas paredes celulares; portanto, a deficiência de Ca caracteriza-se por a planta apresentar as nervuras das folhas e os pontos de crescimento de forma gelatinosa. Em casos severos, os pontos de crescimento morrem.

Em plantas frutíferas, ocorrem, normalmente, baixos teores de Ca nos frutos, fato que se deve à diluição na concentração dos nutrientes resultante do crescimento do fruto

e à precipitação do Ca no floema na forma de oxalato. Em situações onde ocorre rápido crescimento dos frutos, esta diluição pode proporcionar concentrações de Ca abaixo do nível crítico necessário, fazendo com que ocorram sintomas de deficiência deste nutriente nos frutos, normalmente denominados de "bitter pit" ou "fundo preto", comum em tomate, maçã, melão e pimentão.

Para a cultura da macieira, a disponibilidade e a absorção de Ca são de grande importância, pois baixas concentrações de Ca na planta, principalmente nos frutos, estão relacionadas com distúrbios fisiológicos como o "bitter pit" (Figura 6). Os sintomas se manifestam por meio de manchas circulares, deprimidas, escuras, de 3 a 6 mm de diâmetro, que penetram na polpa. O tecido abaixo da mancha é seco e corticote. É mais abundante entre as regiões do cálice e equatorial do fruto; aparecendo durante o primeiro mês de armazenamento. Em casos severos, pode aparecer na colheita (Figura 2).

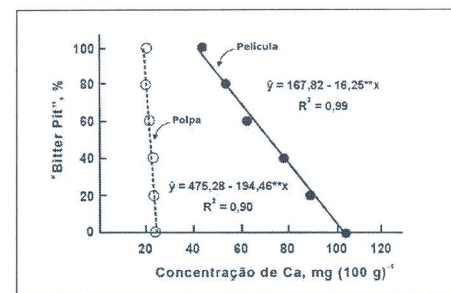


Figura 6. Relação entre a incidência de "bitter pit" e o teor de cálcio na polpa e na película de frutos de macieira.

Fonte: Nachtigall (dados não publicados).

Não existem relatos de toxidez de Ca em plantas, o que se deve, provavelmente, ao fato de ser o excesso de Ca, pela sua baixa mobilidade, armazenado no vacúolo das células.

Magnésio

O Mg é o oitavo elemento mais abundante na crosta terrestre. É essencial para o metabolismo de plantas e animais.

O teor médio de Mg na crosta terrestre é de 19,3 g kg^{-1} , variando segundo a origem geológica do solo. O Mg encontra-se no solo nas formas: não-trocável, trocável e na solução do solo. O Mg na forma não-trocável é encontrado principalmente em minerais primários e secundários, como a biotita, augita, horblenda, olivina, serpentina, clorita, montmorilonita, ilita, vermiculita, e nos carbonatos minerais, como dolomita e magnesita (Havlin et al., 1999).

O grupo sulfidrilo (-SH) pode participar diretamente em reações de óxidorredução, em que o primeiro composto a receber o grupo sulfidrilo (-SH) é a acitil-serina, que se divide em dois compostos, o acetato e a cisteína. A cisteína e a metionina são os precursores dos demais compostos que contêm grupos sulfidrilo. Os grupos sulfidrilo podem ser sítios reativos de enzimas ou coenzimas, como, por exemplo: 3-fosfoglicer aldeído desidrogenase e coenzima A. Muitas enzimas são inibidas de forma não-competitiva por elementos reativos que se unem aos grupos sulfidrilo, como, por exemplo: Pb, Hg, As e Ag.

O S na forma reduzida encontra-se nos anéis heterocíclicos de algumas coenzimas, como tiamina ou bioheterocíclicos de algumas coenzimas, como tiamina ou biotina, e em diversos metabólitos secundários, como a sinigrina de *Brassica nigra*, que contém S em forma reduzida e oxidada ou a alicina.

Teores na planta: Os teores de S nas plantas variam de 1 a 5 g kg⁻¹ de matéria seca, considerando-se teores entre 1 e 3 g kg⁻¹ como adequados para um crescimento normal das plantas. As plantas deficientes apresentam teores foliares menores que 1 g kg⁻¹ (Malavolta, 1980; Malavolta et al., 1989; Pais & Jones Junior, 1996; Furlani, 2004).

Sintomas de deficiência e de excesso: As deficiências de S em plantas em países industriais são muito raras, já que o dióxido de S (SO₂) da atmosfera, liberado ao queimar carvão, madeira, gasolina e outros combustíveis fósseis, é absorvido pelas folhas através dos estômatos. O SO₂ se converte em bissulfeto (HSO₃⁻), quando reage com água nas células e, se se acumular nesta forma, inibe a fotossíntese, destruindo os cloroplastos.

A deficiência de S caracteriza-se pelo fato de as plantas apresentarem as lâminas foliares uniformemente amareladas ou cloróticas, revelando a deficiência primeiro em folhas jovens (Figura 2), já que este elemento não se redistribui facilmente das folhas velhas para as mais novas, por ser imóvel quanto à redistribuição na planta. Por serem os solos tropicais deficientes de sulfatos, as deficiências de S nesses solos são frequentes.

Micronutrientes

Boro

O teor de B na crosta terrestre é de, aproximadamente, 0,01 g kg⁻¹, apresentando-se combinado como bórax. O conteúdo total de B nos solos é variável, os teores variam de 3 a 100 mg kg⁻¹, com valores médios entre 10 e 20 mg kg⁻¹ (Lindsay, 1979). Em geral, os solos de regiões costeiras contêm 10 a 50 vezes mais B que os demais solos, o que se deve à origem marinha.

Na fase sólida do solo, o B é encontrado nos minerais silicatados, adsorvido em argilominerais e na matéria orgânica e nos hidróxidos de Al e Fe.

Diversos fatores influenciam a disponibilidade de B do solo. Sua precipitação no solo depende do pH, sendo máxima nas condições de pH entre 8 e 9. A mineralização da matéria orgânica constitui uma fonte importante de B para as plantas. A textura do solo também tem sua influência, já que, em solos de textura arenosa, o B pode ser facilmente lixiviado, enquanto, em solos de textura argilosa, sua mobilidade é pequena. Assim, aplicações de B em solos argilosos proporcionam perdas mínimas, já em solos arenosos as perdas podem ser importantes.

Em geral, o B disponível encontra-se nas camadas superficiais dos solos bem drenados, ligado à matéria orgânica, o que, em condições de seca, pode dificultar sua absorção pelas plantas nestas camadas superficiais. Deve-se considerar, também, que, em condições de excesso de calagem, pode ocorrer redução na disponibilidade de B (veja capítulo XI).

Forma de absorção: O B é absorvido pela planta como ácido bórico (H₃BO₃) e, provavelmente, como ânion borato (B(OH)₄⁻) em valores de pH elevados, tanto por via radicular como por via foliar.

Considera-se que o B, em solução, move-se até às raízes por meio do fluxo de massa, até que ocorra um equilíbrio entre as concentrações do nutriente nas raízes e na solução. Em decorrência dessa absorção passiva, podem-se verificar situações em que quantidades tóxicas são absorvidas pelas plantas, quando o teor de B na solução é alto (Dechen et al., 1991b).

O B, em geral, é considerado imóvel nas plantas. É translocado principalmente através do xilema, tendo mobilidade muito limitada no floema (Raven, 1980). Acumula-se nas folhas velhas, nas quais a concentração é maior nas pontas e margens (Jones Jr., 1970). Em geral, a parte aérea das plantas apresenta maior teor de B do que as raízes. O movimento do B junto com o fluxo transpiratório, talvez seja a razão para o aparecimento de sintomas de deficiência nos pontos de crescimento.

Estudos com espécies de planta que transportam o sorbitol, um açúcar que complexa o boro, em seu floema, levantaram dúvidas sobre a imobilidade do B para todas as culturas (Fontes, 1997). Brown & Hu (1996) verificaram que, em espécies ricas em sorbitol (castanheira, macieira e nectarina), houve transporte de B aplicado na forma de isótopos, das folhas que receberam pulverização para tecidos adjacentes e tecidos dos frutos: em espécies pobres em sorbitol - bórico, não foi observado movimento do B aplicado nas folhas para outras partes da planta.

Funções: O B é um elemento de baixa mobilidade de redistribuição na planta. Está comprovado que as plantas em estado inicial de crescimento absorvem o B com maior intensidade do que plantas adultas, sendo pequena a mobilidade de redistribuição dos tecidos velhos para os jovens. Pode, inclusive, existir deficiência de B numa folha enquanto em outra do mesmo ramo a concentração esteja adequada. Comprovou-se que o B atua em vários processos biológicos importantes. Considerando que não é possível realizar um processo biológico sem a intervenção de enzimas, chega-se à conclusão de que o B pode atuar em alguns sistemas enzimáticos como constituinte ou como componente ativo e essencial do substrato onde tem lugar a reação biológica.

O B é importante na translocação de açúcares e metabolismo de carboidratos. Desempenha papel importante no florescimento, crescimento do tubo polínico, nos processos de frutificação, no metabolismo do N e na atividade de hormônios. Quanto à influência do B sobre o metabolismo de ácidos nucleicos, demonstrou-se que a deficiência em B interrompe o crescimento e desenvolvimento e a maturação das células, que constitui a segunda fase do desenvolvimento celular. A síntese do ácido ribonucleico, a formação de ribose e a síntese de proteínas são processos muito importantes nos tecidos

meristemáticos. Se esses processos são afetados pela deficiência de B, o processo de crescimento meristemático é prejudicado (Mengel & Kirkby, 1987) (Quadro 4). Por outro lado, quando as células atingem a maturidade, estas não são afetadas pela deficiência deste elemento, porque a deficiência se reflete numa destruição dos meristemas terminais e do tubo polínico, ou seja, nas zonas de crescimento, qualquer que seja a planta.

O B intervém na absorção e metabolismo dos cátions, principalmente do Ca; na formação da pectina das membranas celulares, na absorção de água e no metabolismo de glicídios. Tem influência no metabolismo e transporte de carboidratos, estando comprovado, experimentalmente, que a deficiência de B provoca acúmulo de açúcares nos tecidos. Com relação à formação da parede celular, está comprovado que as plantas com deficiência em B têm paredes menos resistentes do que aquelas sem carência.

Quadro 4. Efeito do boro na incorporação de fosfato em DNA e na síntese de proteínas em folhas e raízes de girassol

Boro	Folhas	Raízes
mg L ⁻¹		
		Fosfato no DNA - % do total
0	0,2	0,5
1	1,4	1,8
		Fosfato do RNA - % do total
0	1,4	3,6
1	6,4	13,0
		Proteína - mg/vaso
0	627	713
1	1.267	1.468

Fonte: Adaptado de Mengel & Kirkby (1987).

Teores na planta: Os teores de B nas plantas variam de 10 a 50 mg kg⁻¹ de matéria seca, considerando teores de 30 a 50 mg kg⁻¹ como adequados para um crescimento normal das plantas. Plantas deficientes apresentam teores foliares menores do que 15 mg kg⁻¹ (Malavolta, 1980; Malavolta et al., 1989; Pais & Jones Junior, 1996; Furlani, 2004).

Sintomas de deficiência e de excesso: Os sintomas de deficiência de B podem ser distintos, conforme a espécie vegetal (Figura 8). Os mais comuns são:

- Redução do crescimento e deformações nas zonas de crescimento (nas plantas com deficiência de B, as novas células não se diferenciam).
- Diminuição da superfície foliar, com folhas jovens deformadas, espessas, quebradiças e pequenas. Podem apresentar clorose ou até mesmo uma cor verde mais intensa.

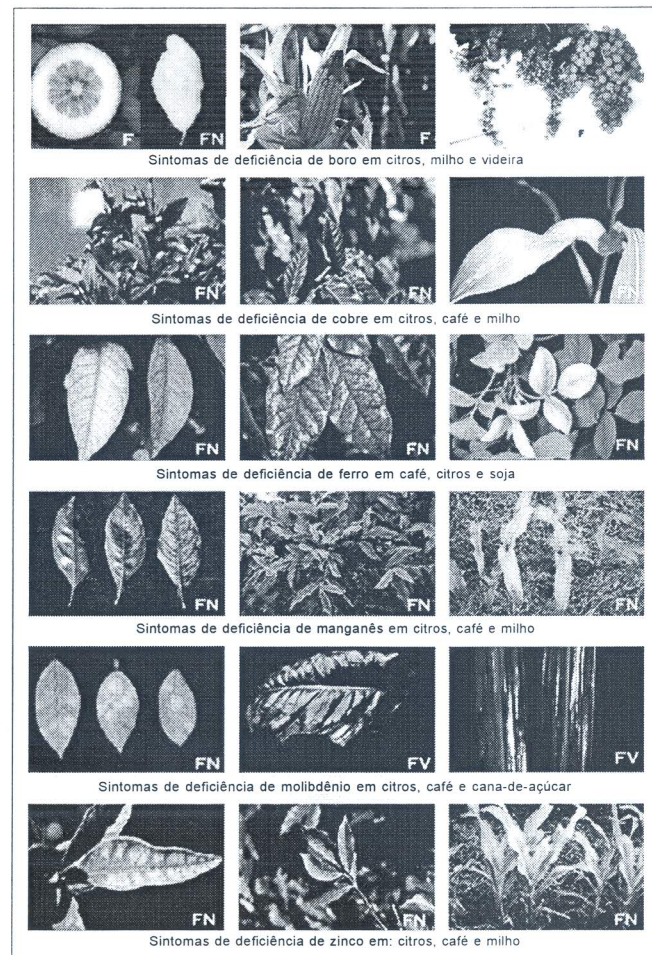


Figura 8. Sintomas de deficiência de micronutrientes. Fonte: Departamento de Solos e Nutrição de Plantas - ESALQ/USP. (FV = folhas velhas; FN = folhas novas; F = frutos).

- Plantas deficientes em B apresentam, como consequência, acúmulo de compostos nitrogenados nas partes mais velhas.
- Crescimento reduzido de raízes.
- Abortamento floral.
- Fendas em ramos, pecíolos e, às vezes nos frutos. Estes apresentam uma formação irregular (deformação).
- Diminuição da concentração de clorofila.
- Diminuição de resistência às infecções.
- Diminuição da atividade das enzimas oxidantes (catalase, peroxidase e polifenoloxidase).

Uma das plantas mais sensíveis à deficiência de B no solo é o *Helianthus annuus* (girassol), o qual foi amplamente utilizado para detectar a disponibilidade deste elemento no solo.

A toxidez de B é tão grave quanto sua deficiência, manifestando-se nas plantas por um amarelecimento das folhas que se estende pelas margens.

Cloro

O Cl é encontrado na natureza principalmente como ânion cloreto (Cl⁻). O teor médio na litosfera é de aproximadamente 500 mg kg⁻¹. O conteúdo no solo, na forma de Cl⁻, apresenta grande variabilidade (50 a 3.000 kg ha⁻¹ de Cl⁻), dependendo dos sais presentes (principalmente como cloreto de sódio e, em menor proporção, como cloreto de cálcio e cloreto de magnésio) (Lindsay, 1979). Em solos próximos ao mar ou naqueles que recebem tratamentos com águas com excesso de sais, estes teores de Cl podem ser muito superiores aos supralistados.

O Cl pode ter como origem a:

- Decomposição da rocha mãe, principalmente das rochas ígneas.
- Decomposição de restos orgânicos.
- Contribuições pelas chuvas.
- Contribuição pelas águas de irrigação; presença de fertilizantes e inseticidas.

Foi o penúltimo elemento a ser considerado como essencial para a vida das plantas, e a essencialidade foi demonstrada em tomateiro cultivado em solução nutritiva purificada (Broyer et al., 1954). Encontra-se sempre em disponibilidade suficiente para as plantas, já que, com as chuvas, pode-se ter contribuição de até 20 kg ha⁻¹ ano⁻¹, quantidade suficiente para as necessidades das plantas.

Forma de absorção: O Cl é absorvido pelas plantas, tanto pela raiz como pela parte aérea, na forma de Cl⁻.

Funções: O Cl é um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas e animais superiores, onde atua na produção do ácido clorídrico necessários à digestão, estando, para os animais, o cloreto sódico normalmente incluído em sua dieta para suprir estas necessidades.

Na planta, só há uma função na qual se reconhece a participação fundamental do Cl. É essencial no processo da liberação de O₂ por cloroplastos isolados, no fotossistema II da fotossíntese.

Existem outras funções nas quais também poderia ser essencial. Experimentos demonstram que o Cl é essencial na fotossíntese via regulação estomática. A concentração ideal de Cl para fotossíntese varia segundo a espécie. O incremento na concentração de Cl provoca abertura dos estômatos, produzindo as trocas gasosas e, portanto, para a assimilação do CO₂ na fotossíntese. O Cl é necessário para a ativação pelo menos de três enzimas (amilase, asparagina-sintetase e ATPase do tonoplasto).

Teores na planta: Os teores de Cl nas plantas variam de 70 a 1.000 mg kg⁻¹ de matéria seca (Furlani, 2004), considerando-se teores entre 20 e 100 mg kg⁻¹ como adequados para um crescimento normal das plantas. As plantas deficientes apresentam teores foliares menores do que 2 mg kg⁻¹.

Sintomas de deficiência e de excesso: O Cl apresenta grande mobilidade de redistribuição dentro da planta, podendo migrar para as partes em atividade metabólica mais intensa. Os sintomas não são fáceis de ser identificados e, raríssimas vezes, desenvolvem-se em condições de campo. Os sintomas mais comuns consistem na redução do tamanho das folhas, clorose seguida por um bronzeado, evoluindo para necrose. As raízes apresentam crescimento limitado, mais espessas ou em forma de maços próximo ao ápice.

Os sintomas de excesso são mais freqüentes e mais graves do que os de deficiência. Contudo, os sintomas de toxidez dependem do grau de tolerância das plantas (as plantas mais tolerantes são as halófitas, tais como a beterraba, o milho, a cevada, o espinafre e o tomate). Os sintomas de toxidez se caracterizam pela redução da largura das folhas, que tendem a enrolar-se, bem como por amplas necroses que provocam secamento das folhas.

Cobre

O teor médio de Cu na crosta terrestre é de, aproximadamente, 55 mg kg⁻¹, enquanto o teor total no solo varia de 10 a 80 mg kg⁻¹ (Krauskopf, 1972), onde se encontra, principalmente, na forma divalente (Cu²⁺), predominantemente como constituinte das estruturas cristalinas dos minerais primários e secundários. Considera-se que a maior parte do Cu em solução esteja formando complexos solúveis com ácidos orgânicos, tais como o cítrico e oxálico.

Forma de absorção: O Cu é absorvido como Cu²⁺ e Cu-quelato, sendo pequeno o seu teor nos tecidos da planta, geralmente entre 2 e 20 mg kg⁻¹ na matéria seca. A absorção do Cu pelas plantas ocorre via processo ativo e existem evidências de que este elemento iniba fortemente a absorção do Zn, e vice-versa (Bowen, 1969). Acredita-se que este elemento não seja prontamente móvel na planta, embora existam resultados que mostram o movimento de folhas velhas para novas. Loneragan (1975) concluiu que o movimento do Cu no interior das plantas é dependente de sua concentração, uma vez que, em plantas

de trigo bem supridas de Cu, pode ocorrer movimento dos grãos para as folhas. Contudo, em plantas deficientes, o Cu foi relativamente imóvel.

Quanto ao transporte do Cu na planta, resultados indicam que compostos nitrogenados solúveis, como os aminoácidos, atuam como carregadores deste elemento no xilema e no floema, já que o Cu apresenta forte afinidade com o átomo de N do grupo amino (Loneragan, 1981).

Funções: Na planta, uma fração considerável do Cu nos tecidos parece estar ligada a plastocianina e alguma fração protéica, ocorrendo, também, acúmulo do elemento em órgãos reprodutivos das plantas; contudo, existem variações entre espécies.

O Cu é constituinte de certas enzimas, incluindo a oxidase do ácido ascórbico (vitamina C), citocromo-oxidase e a plastocianina, que se encontram nos cloroplastos. O Cu também participa em enzimas de óxidorredução, exceto de certas amino-oxidases e galactose-oxidases, participando, assim, das reações de óxidorredução, em que grande parte das enzimas que contêm Cu reagem com O₂ e o reduzem a H₂O₂ ou H₂O. O Cu também faz parte da enzima fenol-oxidase, que catalisa a oxidação de compostos fenólicos a cetonas durante a formação da lignina e da cutícula. Além disto, o Cu influencia a fixação do N₂ atmosférico pelas leguminosas, e é essencial no balanço de nutrientes que regulam a transpiração na planta.

Em condições de deficiência de Cu existe uma relação íntima entre a concentração nas folhas e o conteúdo das enzimas plastocianina, diamina oxidase e ascorbato oxidase, bem como da atividade do fotossistema I; contudo, parece não afetar significativamente o conteúdo de clorofila (Quadro 5).

Teores na planta: Os teores de Cu nas plantas variam de 2 a 75 mg kg⁻¹ de matéria seca da planta, considerando teores entre 5 e 20 mg kg⁻¹ como adequados para o crescimento normal das plantas. As plantas deficientes apresentam teores foliares menores do que 4 mg kg⁻¹, enquanto, acima de 20 mg kg⁻¹, podem-se observar sintomas de toxidez (Malavolta, 1980; Malavolta et al., 1989; Pais & Jones Junior, 1996; Furlani, 2004).

Quadro 5. Relação entre a concentração de cobre e alguns componentes do cloroplasto e a atividade de enzimas que contêm cobre em folhas de ervilha

Cobre	Clorofila	Plastocianina	Atividade de enzimas	
			Diamina oxidase	Ascorbato oxidase
mg kg ⁻¹	mmol kg ⁻¹	µmol mmol ⁻¹ clorofila	mmol kg ⁻¹ h ⁻¹	
6,9	4,9	2,4	0,86	730
3,8	3,9	1,1	0,43	470
2,2	4,4	0,3	0,24	220

Fonte: Adaptado de Marschner (1995).

Sintomas de deficiência e excesso: As deficiências de Cu ocorrem principalmente em plantas cultivadas em solos orgânicos ácidos, em solos derivados de rochas ígneas muito ácidas e em solos lixiviados de textura grosseira. Deve-se considerar que, em alguns sistemas de cultivo, quantidades consideráveis de cobre são adicionadas ao solo por meio de aplicação de fungicidas. Um exemplo desta situação é o uso de fungicidas cúpricos no controle de doenças de videiras, por vários anos, que tem levado ao acúmulo do Cu na superfície do solo. Em uma região cultivada com videiras na França, o teor de Cu total na camada superficial de solos de vinhedo variou de 31 a 250 mg kg⁻¹, enquanto, em solos de florestas, variou de 14 a 29 mg kg⁻¹ (Brun et al., 1998). Para as condições da Austrália, Pietrzak & McPhail (2004), avaliando vinhedos cultivados por 20 e até por mais de 90 anos, observaram teores de Cu total entre 10 e 250 mg kg⁻¹. No Brasil, Nachtigall et al. (2007) verificaram teores de Cu total entre 1.300 e 1.400 mg kg⁻¹ em dois solos cultivados com vinhedos da região da Serra do Rio Grande do Sul, o que pode ser atribuído ao manejo de grande parte dos vinhedos brasileiros que fazem o uso contínuo de calda bordaleza (CuSO₄ + Ca(OH)₂) e de outros produtos a base de Cu, para controlar as doenças em vinhedos cultivados por longos períodos.

As plantas raramente apresentam deficiências de Cu, já que este elemento se encontra disponível em quantidades adequadas em quase todos os solos. De todos os micronutrientes, a deficiência de Cu é a mais difícil de diagnosticar, dada a interferência de outros elementos (P, Fe, Mo, Zn e S). No sistema produtivo de citros e de outras frutas, adubações em excesso com adubos fosfatados podem provocar deficiência de Cu.

As deficiências de Cu manifestam-se como (Figura 8):

- As folhas jovens tornam-se murchas e enroladas, ocorrendo uma inclinação de pecíolos e talos. As folhas tornam-se quebradiças e caem.
- A ocorrência de clorose e outros sintomas secundários (a clorose nem sempre aparece).
- A redução da lignificação. Os vasos não lignificados do xilema são comprimidos por tecidos vizinhos, o que reduz o transporte de água e solutos.
- Em cereais, a deficiência de Cu provoca o abortamento de grande número de flores, produzindo espigas pouco granadas.

Em casos de toxidez (teores no solo superiores a 300 mg kg⁻¹), as alterações manifestam-se nas raízes, que tendem a perder vigor, adquirem cor escura, apresentam engrossamento e paralisam o seu crescimento. Também o excesso pode provocar deficiência em Fe, já que o Cu em excesso atua em reações que afetam o estado de oxidação do Fe, limitando sua absorção e translocação na planta. Outro efeito do excesso de Cu é a redução da absorção de P.

Ferro

O Fe constitui cerca de 5 % da crosta terrestre, sendo o segundo elemento em abundância depois do Al entre os metais e o quarto em abundância depois do O e Si (Mengel & Kirkby, 1987). No solo, o Fe apresenta-se na forma di (Fe²⁺) e trivalente (Fe³⁺), dependendo do estado de oxirredução do sistema. Muitos solos cultivados apresentam baixo teor de Fe, tanto na solução do solo como adsorvido em forma trocável.

O Fe, na forma ferrosa, entra no complexo de troca iônica dos solos. A forma férrica é fortemente adsorvida pelos colóides do solo, formando complexos com os ácidos húmicos e colóides orgânicos. Os solos sob condições de redução ou de alagamento têm um alto conteúdo de Fe-ferroso. O conteúdo de Fe-férrico aumenta com o aumento da acidez, atingindo grandes concentrações somente em solos muito ácidos, com pH menores que 3, e em solos ricos em ácidos húmicos e colóides capazes de formar complexos solúveis com Fe (Figura 9). Verifica-se que, somente em condições muito ácidas, os teores de Fe estariam em torno de $1 \mu\text{mol L}^{-1}$, valor que poderia suprir as necessidades das plantas via transporte por fluxo de massa. Já a elevação de uma unidade de pH (de 3 para 4) proporcionaria um decréscimo na disponibilidade para 1 % da necessidade das plantas. O aumento do suprimento de Fe às raízes pode ocorrer, dentre outros mecanismos, pela formação de complexos solúveis ou quelatos. Esses agentes quelantes podem se originar de exsudatos de raízes, de substâncias produzidas pela decomposição da matéria orgânica do solo, pela ação de microrganismos ou pela adição de fertilizantes quelatizantes ao solo (Lindsay, 1974).

Os conteúdos de argila e matéria orgânica do solo influem também na disponibilidade do Fe, já que, em solos argilosos, existe tendência à retenção do Fe, enquanto teores adequados de matéria orgânica proporcionam melhor aproveitamento do Fe pelas plantas, por causa de suas características acidificantes e redutoras, bem como da capacidade de determinadas substâncias húmicas para formar quelatos em condições adversas de pH.

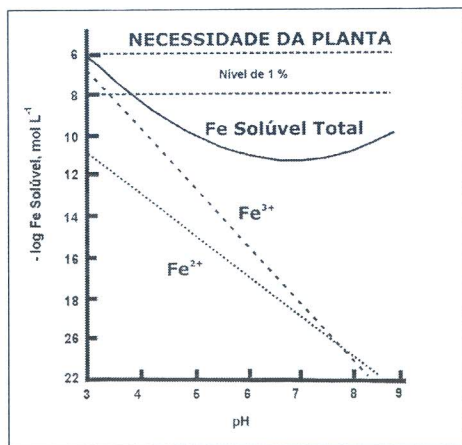


Figura 9. Influência do pH do solo sobre a solubilidade do ferro.
Fonte: Adaptado de Lindsay (1974).

Forma de absorção: O Fe pode ser absorvido como Fe²⁺, Fe³⁺ e como Fe-quelato, sendo a sua absorção pelas plantas metabolicamente controlada. Na absorção do Fe, são envolvidos pelo menos dois processos. No primeiro processo, que é uma característica das dicotiledôneas e das gramíneas não monocotiledôneas, prótons são liberados do interior das raízes, o que provoca uma acidificação da rizosfera. Nestas condições, e na presença da Fe³⁺-reductase, o Fe³⁺ é reduzido a Fe²⁺ na membrana plasmática das células das raízes. O Fe²⁺ é transportado para o interior da membrana plasmática através de um sistema específico de transporte (Figura 10a). A capacidade das raízes em reduzir Fe³⁺ para Fe²⁺ é fundamental na absorção deste cátion para muitas plantas, já que este necessita ser reduzido antes de entrar nas células (Chaney et al., 1972). O segundo processo, que ocorre em gramíneas, como cevada, milho e aveia, envolve a extrusão de sideróforos pelas raízes. Após a liberação destes sideróforos, eles formam complexos com o Fe³⁺, os quais são transportados para o interior das células das raízes, não ocorrendo redução para Fe²⁺ (Figura 10b) (Epstein & Bloom, 2005).

No espaço livre aparente, esse elemento necessita estar presente na forma iônica ou como quelato. Segundo Römheld & Marschner (1983), o Fe³⁺-quelato é reduzido de forma mais rápida do que o FeCl₃. A velocidade de redução do Fe é dependente do pH, de modo que, em pH baixo, a velocidade de redução é maior. Em exsudatos do xilema, o Fe parece ocorrer na forma não quelatizada, embora seu transporte seja controlado por citrato. Tanto a absorção quanto o transporte do Fe em plantas são afetados por fatores da planta (processos metabólicos) e ambientais (pH, concentração de Ca e P).

Funções: A principal função do Fe é a ativação de enzimas, atuando como grupo prostético. Participa em reações fundamentais de oxidorredução, tanto em hemoproteínas (citocromos, leghemoglobina, catalase, peroxidase, superóxido dismutase, etc) como em proteínas não-hêmicas com ligação Fe-S como ferredoxina e enzimas redutase, nitrogenase e sulfato-redutase.

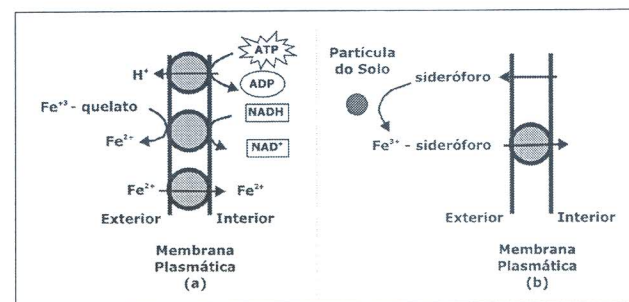


Figura 10. Processos de absorção de ferro. (a) Processo comum em dicotiledôneas, como ervilha, tomate e soja. (b) Processo comum em cevada, milho e aveia.
Fonte: Adaptado de Guerinot & Yi (1994).

O Fe catalisa a biossíntese da clorofila, já que faz parte constituinte de enzimas responsáveis pela sua formação. Na ausência de Fe, a planta só apresenta pigmentos amarelos (xantofila e caroteno). Faz parte da ferredoxina, transportador de elétrons de natureza não-porfirínica que atua na fotossíntese e na redução dos nitratos. Outras enzimas que contêm Fe, mas que não atuam como oxidoreduzidor, são a aconitase e a xantinoxidase. A fitoferritina [(FeO.OH)₈(FeO.OPO₃H₂)₂] apresenta, aproximadamente, 5.000 átomos de Fe³⁺ - é uma proteína de reserva.

Admite-se que o íon requerido no metabolismo é o ferroso, em cuja forma é absorvido pela planta, já que é a forma de maior mobilidade e disponibilidade para sua incorporação em estruturas biomoleculares. Certamente, o íon férrico se forma e parte deste é translocado às folhas como um quelato aniônico do citrato.

Em relação ao metabolismo do Fe na planta, deve-se levar em conta que este apresenta baixa mobilidade nos tecidos vegetais. Esta mobilidade é afetada negativamente por vários fatores, como o elevado conteúdo de P, deficiência de K, quantidade elevada de Mn e baixa intensidade luminosa. A presença de bicarbonato no meio radicular reduz a mobilidade do Fe nos tecidos vegetais.

Teores na planta: Os teores de Fe nas plantas variam de 10 a 1.500 mg kg⁻¹ de matéria seca, dependendo da parte da planta e da espécie, considerando teores entre 50 e 100 mg kg⁻¹ como adequados para um crescimento normal das plantas. As plantas deficientes apresentam teores foliares menores que 10 mg kg⁻¹, enquanto, acima de 80 mg kg⁻¹, podem-se observar sintomas de toxidez (Malavolta, 1980; Malavolta et al., 1989; Pais & Jones Junior, 1996; Furlani, 2004).

Sintomas de deficiência e excesso: O efeito mais característico da deficiência de Fe é a incapacidade das folhas jovens para sintetizar clorofila, tornando-se cloróticas, e, algumas vezes, de cor branca (Figura 8). O Fe é considerado imóvel na planta. A entrada de Fe no floema é diminuída, provavelmente pela formação de compostos insolúveis. Contudo, uma vez que o Fe é levado a um órgão pelo xilema, sua redistribuição é fortemente limitada. Muitos dos sintomas de deficiência de Fe ocorrem pela baixa taxa de translocação, que pode provocar acumulação de Fe nas raízes e folhas velhas, enquanto que as folhas jovens apresentam deficiências do elemento. Os sintomas visuais característicos de deficiência são:

- As folhas velhas apresentam cor verde, enquanto as folhas jovens começam a amarelar. Diversos estudos demonstram correlação entre o fornecimento de Fe e as concentrações de clorofila nas folhas.
- Conforme vai avançando a deficiência, observa-se uma clorose internerval característica, onde somente os vasos permanecem de cor verde, contrastando com a cor amarelada ou esbranquiçada do limbo.
- Em casos de deficiência forte, o amarelecimento pode ser total e aparecem zonas necróticas nos bordos do limbo, produzindo-se uma queda precoce das folhas e, em casos muito graves, a desfolha total.
- Os caules e ramos permanecem finos e curvados, levando a uma redução do crescimento.

- Em plantas anuais, ocorre uma diminuição em seu crescimento, apresentando aspecto raquitico e redução da produção. Em plantas arbóreas, ocorre queda de folhas, os frutos são pequenos e amadurecem precocemente.

Normalmente, os solos tropicais são bem providos de Fe; contudo, podem ocorrer situações de deficiência de Fe nas plantas em decorrência da imobilização do Fe. Trata-se de carências induzidas ou secundárias, manifestando-se pela falta de clorofila (clorose). Em solos ácidos, ricos em fosfatos solúveis, pode ocorrer clorose férrica por precipitação do Fe³⁺ na forma de FePO₄. Na presença de MnO₂, o Fe reduzido se oxida, passando à forma férrica não-assimilável. Assim, a disponibilidade de Fe depende mais do equilíbrio Fe/Mn do que do seu teor absoluto. Também tem sido observada deficiência de Fe mediante a ação de outros elementos metálicos, como o Cu, que pode substituir o Fe nos quelatos do solo, originando sua imobilização, bem como de Zn e Co, que apresentam efeitos similares, porém de menos importância.

Considerando a rapidez de conversão do Fe solúvel em compostos insolúveis não-disponíveis para a planta, verifica-se que são raros os casos de toxidez por Fe. Solos com teores de Fe total superiores a 50 g kg⁻¹ não provocam efeitos tóxicos na maioria dos cultivos. Para o arroz irrigado por inundação, tem-se observado toxidez de Fe, onde os teores de Fe-ferroso são muito elevados.

Manganês

O teor de Mn na crosta terrestre é de, aproximadamente, 900 mg kg⁻¹, sendo considerado o décimo primeiro elemento mais abundante na natureza. O Mn no solo é componente de óxidos, carbonatos, silicatos e sulfetos. Os óxidos e sulfetos de Mn são as formas encontradas com mais frequência nos solos, sendo comum a sua ocorrência em associação com o Fe. Nos solos, os teores de Mn encontram-se, geralmente, na faixa de 20 a 3.000 mg kg⁻¹, com média de 60 mg kg⁻¹ (Lindsay, 1979).

O Mn nos solos tem valências 2, 3 e 4. Na solução do solo e na forma trocável está principalmente como Mn²⁺, enquanto o Mn³⁺ e Mn⁴⁺ formam óxidos praticamente insolúveis. O teor do Mn total em solos minerais varia de 300 a 7.000 mg kg⁻¹, embora ocorram teores menores ou muito maiores. Em muitos solos, a fração principal do Mn encontra-se sob a forma não-trocável e dificilmente solúvel.

A presença de Mn disponível (Mn²⁺) depende tanto do pH como do potencial redox do solo. Em valor de pH superior a 5,5, a oxidação por ação biológica em solos bem arejados é favorecida, no entanto, sua disponibilidade diminui. Por outro lado, as formas oxidadas se reduzem, tornando-se mais disponíveis a pH mais ácido e em solos com baixo potencial redox.

O Mn é mais móvel no solo do que o Fe e, frequentemente, distribui-se no perfil do solo de forma diferente deste último elemento. Considerando que as substâncias húmicas reduzem o Mn facilmente e que o elemento se oxida com dificuldade em meio ácido, tem-se, nestas condições, maior migração do elemento no perfil do solo.

Os principais fatores do solo que determinam a disponibilidade de Mn são pH, condições de oxidorredução, teores de matéria orgânica e equilíbrio com outros cátions,

principalmente Fe, Ca e Mg (Bartlett, 1988; Reisenauer, 1988). Os valores de pH entre 6,0 e 6,5 parecem ser críticos. Valores baixos de pH favorecem a redução, enquanto valores altos favorecem a oxidação.

Forma de absorção: O Mn pode ser absorvido pelas plantas como Mn^{2+} . Considera-se que as plantas não absorvem o Mn^{4+} , enquanto se desconhece sua capacidade para absorver apreciáveis quantidades de Mn^{3+} , já que este é muito instável. Acredita-se existir um equilíbrio dinâmico entre as formas de Mn, sendo os microrganismos os principais responsáveis pela sua oxidação entre pH 5,0 e 7,9, enquanto a oxidação não-biológica ocorre somente acima de pH 8,0.

Tem sido encontrada evidência de que a absorção de Mn é controlada metabolicamente, possivelmente de forma similar àquela que ocorre para outros cátions, como o Mg e o Ca. Entretanto, a absorção passiva deste elemento também pode ocorrer, principalmente quando o metal encontra-se em concentrações tóxicas na solução.

O Mn ocorre na seiva das plantas na forma livre Mn^{2+} . Goor & Wiersma (1976) relataram uma concentração menor de Mn em exsudatos do floema do que em tecidos das folhas, indicando que o pequeno transporte do elemento através do floema é responsável pela sua baixa concentração em frutos, sementes e órgãos de reserva das raízes.

Heenan & Campbell (1980) relataram que, na condição de bom suprimento de Mn, as folhas acumulam altas concentrações com o aumento da idade da planta, sendo pequena proporção do elemento translocada das folhas velhas para as novas, onde o elemento é deficiente. Contudo, deve-se considerar que a concentração de Mn varia grandemente dentro da planta e durante seu crescimento.

Considera-se que o Mn é facilmente absorvido pelas plantas, quando ocorre na forma solúvel no solo, existindo uma relação direta entre o teor solúvel do elemento no solo e a concentração na planta. Por outro lado, existe correlação negativa entre o teor de Mn nas plantas e o aumento do pH, bem como uma correlação positiva com o teor de matéria orgânica do solo.

Funções: O Mn é necessário à síntese de clorofila. Sua função principal está relacionada com a ativação de enzimas. Participa no funcionamento do fotossistema II da fotossíntese, sendo responsável pela fotólise da água. O Mn pode atuar no balanço iônico como um contra-íon, reagindo com grupos aniônicos. Grande número de enzimas são ativadas pelo Mn, especialmente aquelas envolvidas em metabolismos intermediários (Dechen et al., 1991a).

Teores na planta: Os teores de Mn nas plantas variam de 5 a 1.500 mg kg^{-1} de matéria seca, dependendo da parte da planta analisada e da espécie, considerando teores entre 20 e 500 mg kg^{-1} como adequados para o crescimento normal das plantas. Em muitas plantas, as folhas com sintomas de deficiência contêm teores de Mn inferiores a 20 mg kg^{-1} , enquanto teores superiores a 700 mg kg^{-1} são considerados tóxicos (Malavolta, 1980; Malavolta et al., 1989; Pais & Jones Junior, 1996; Furlani, 2004).

Sintomas de deficiência e excesso: As deficiências de Mn não são muito comuns, apesar de que certas desordens nutricionais como a “mancha cinza” da aveia é conhecida há bastante tempo, sendo controlada com sais de Mn. Os sintomas de deficiência de Mn podem ocorrer tanto em folhas jovens como em folhas velhas e compreendem ampla variedade de manchas cloróticas e necróticas. Os sintomas iniciais são, freqüentemente, cloroses entre as nervuras, tanto em folhas jovens como velhas, dependendo das espécies, seguidas de lesões necróticas (Figura 8). A deficiência de Mn é mais comum em solos orgânicos que em inorgânicos, embora o elemento se encontre, geralmente, nas mesmas formas nos dois tipos de solos. No entanto, a proporção de Mn encontrada, formando complexos com a matéria orgânica, é muito mais alta em solos orgânicos.

A deficiência de Mn tem o efeito mais severo no conteúdo de carboidratos não estruturais (Quadro 6). Esta diminuição no conteúdo de carboidratos é particularmente evidente nas raízes e é, provavelmente, o fator responsável pela redução no crescimento de raízes de plantas deficientes neste nutriente.

Quadro 6. Efeito do manganês no crescimento (M.S.) e na composição do feijoeiro

Planta	Folha		Caule		Raiz	
	- Mn	+ Mn	- Mn	+ Mn	- Mn	+ Mn
Produção de MS (g/planta)	0,46	0,64	0,38	0,55	0,14	0,21
Carboidratos solúveis (g kg^{-1})	4,00	17,50	14,50	35,60	0,90	7,60

Fonte: Adaptado de Marschner (1995).

Considera-se que a acumulação de Mn^{2+} é tóxica para a maioria das plantas cultivadas. Nas condições de solos ricos em húmus, com pH inferior ou igual a 5,5 e com elevadas condições redutoras, pode ocorrer acúmulo deste elemento, pelo fato de ser, em valores baixos de pH, sua forma absorvida (bivalente) mais abundante, podendo levar à absorção pelas plantas em quantidades superiores às necessárias para o seu ótimo desenvolvimento. Os sintomas de toxidez são mais visíveis em plantas jovens, manifestando-se por meio de manchas marrons nas folhas.

Molibdênio

É um elemento relativamente raro. O teor de Mo na crosta terrestre varia de 1,0 a 2,3 mg kg^{-1} e, nos solos, varia de 1 a 2 mg kg^{-1} , podendo chegar até 24 mg kg^{-1} (Adriano, 1986). Os extratores ácidos diluídos ou o acetato de amônio 1 mol L^{-1} pH 7, usualmente, indicam teores menores que 0,2 mg kg^{-1} nos solos. O Mo existe no solo sob três formas: na solução do solo como íons molibdato, MoO_4^{2-} ou $HMoO_4^-$, adsorvidos em formas lábil e não-lábil, como constituinte dos minerais do solo e da matéria orgânica.

A concentração do íon molibdato na solução do solo é muito pequena, variando com o pH e com a presença do P. Esta concentração aumenta com o pH, de modo que,

aumentando o pH do solo de 5,4 a 6,4, pode aumentar a concentração foliar de Mo em 500 % (Figura 11). Quanto ao Mo lábil, a adsorção do íon molibdato assemelha-se à adsorção do sulfato e fosfato. Os íons sulfatos competem fracamente com os íons molibdatos por sítios de adsorção, enquanto os íons fosfatos competem fortemente. Já o Mo não-lábil ou estrutural está presente em rochas ígneas, como molibdenita (MoS_2) e como o molibdato primário powelita (CaMoO_4) e wulfenita (PbMoO_4); também é encontrado em olivinas. No solo, o Mo está ligado à matéria orgânica e a óxidos de Fe e Al.

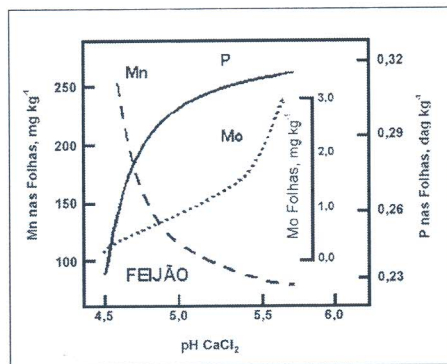


Figura 11. Relação entre o pH do solo e a disponibilidade de manganês, molibdênio e fósforo para a cultura do feijoeiro.

Fonte: Adaptado de Quaggio et al. (1985).

Forma de absorção: O Mo é absorvido na forma do ânion MoO_4^{2-} e sua absorção é proporcional à sua concentração na solução do solo, que pode ser reduzida pelo efeito competitivo do SO_4^{2-} (Reisenauer, 1963). Embora não existam evidências diretas, é aceito que o Mo seja absorvido metabolicamente. Considera-se que o Mo é moderadamente móvel nas plantas; contudo, a forma como é translocado na planta ainda não é conhecida. Resultados evidenciam que o Mo se move no xilema como MoO_4^{2-} , como Mo-S-aminoácido complexo ou como molibdato complexado com açúcares (Tiffin, 1972).

As plantas requerem pequenas quantidades de Mo: menos de 1 mg kg^{-1} de Mo na matéria seca, o que representa, em geral, 40 a 50 g ha^{-1} para suprir as necessidades da maioria das culturas.

Grandes quantidades de molibdato podem ser absorvidas pelas plantas sem efeitos tóxicos. O molibdato é um ácido fraco que pode formar complexos polianiónicos com o P, como o fosfomolibdato, de modo que, possivelmente, altas concentrações são seqüestradas sob esta forma nas plantas.

Funções: Grande parte do Mo encontra-se na enzima nitrato-redutase das raízes e colmos das plantas superiores, a qual catalisa a redução do íon NO_3^- a NO_2^- . A nitrato-redutase das plantas superiores é encontrada como uma molibdoflavoproteína solúvel, que, nas folhas pode estar associada à atividade dos cloroplastos. A enzima oxidada contém quase sempre Mo. A enzima nitrato-redutase tem o Mo ligado de forma reversível. Assim, plantas com deficiência de Mo apresentam acúmulo de NO_2^- , de modo que a falta de Mo tem efeito similar à falta de N.

Nas raízes com nódulos das plantas fixadoras de N_2 , o Mo encontra-se quase todo na enzima nitrato redutase e na nitrogenase dos bacteróides nodulares. Ainda que os microrganismos contêm outras enzimas com Mo (sulfito-oxidase, aldeído-oxidase, xantina-desidrogenase e oxidase), não existem evidências da presença destas enzimas nas plantas superiores. A enzima nitrogenase é um constituinte das bactérias simbióticas e actinomicetes, enquanto a nitrato-redutase é a única enzima com Mo nas plantas superiores. Considerando unicamente o metabolismo do N, as plantas superiores poderiam crescer na ausência de Mo, quando o N é disponibilizado na forma de NH_4^+ .

O Mo também participa das enzimas sulfito-redutase e xantin-oxidase. A deficiência de Mo repercute negativamente na formação de ácido ascórbico, no conteúdo de clorofila e na atividade respiratória.

Teores na planta: Os teores de Mo nas plantas variam de $0,01$ a 500 mg kg^{-1} de matéria seca da planta, dependendo da parte da planta e da espécie, considerando teores entre $0,6$ e 10 mg kg^{-1} como adequados para o crescimento normal das plantas. As plantas deficientes apresentam teores foliares entre $0,01$ e $0,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (Malavolta, 1980; Malavolta et al., 1989; Pais & Jones Junior, 1996; Furlani, 2004).

Sintomas de deficiência e excesso: O sintoma característico de deficiência é que as folhas, ainda mantendo a cor verde, deformam-se, em decorrência da morte de algumas células do parênquima. As folhas apresentam tamanho reduzido, clorose e mosqueados de cor marrom em toda ou parte da folha; surgem zonas necróticas na ponta da folha, que se estendem aos bordos (Figura 8). Por último, a folha morre, provocando uma queda prematura. A deficiência em Mo provoca concentração anormal de NO_3^- nas folhas e, portanto, influi no metabolismo do N. A deficiência de Mo pode influenciar a produtividade.

Os casos de toxidez por Mo não são muito frequentes, tendo-se relatos de plantas sem sintomas de toxidez, que crescem em regiões de minas com teores de até 200 mg kg^{-1} em folha. Podem surgir casos de toxidez por Mo em bovinos por ingerir forragens com alto conteúdo deste elemento, ocorrendo transtornos intestinais. O excesso de Mo na dieta animal interfere na retenção de Cu pelos ruminantes, distúrbio conhecido como molibdenose.

Níquel

Elemento químico, metal ferromagnético de transição pertencente ao grupo VIII da tabela periódica, resistente à oxidação e corrosão, de cor branca prateada, mais forte e duro do que o Fe.

O teor de Ni na crosta terrestre é de, aproximadamente, $0,16 \text{ g kg}^{-1}$, sendo um componente comum de rochas ígneas. Segundo Pais & Jones Junior (1996), os teores no solo variam de 1 a 200 mg kg^{-1} . As fontes mais importantes de Ni são as pentandlitas (pirrotita e calcopirita), bem como as enlaseritas (garnierita).

O Ni é o elemento mais recentemente identificado como essencial para as plantas superiores (Brown et al., 1987). Embora existam poucas informações sobre os fatores que afetam a disponibilidade do Ni, pode-se supor que os fatores que afetam a disponibilidade dos outros metais afetam também a disponibilidade deste elemento.

Forma de absorção: As plantas o absorvem em forma de cátion divalente (Ni^{2+}), sendo seu teor na solução do solo muito pequeno, ainda que possa ser mais abundante nos solos onde ocorrem serpentinas. Neste caso, pode ocorrer toxidez do elemento para a maior parte das espécies, ainda que existam algumas que o toleram bem, já que podem tornar o Ni inativo pela formação de complexos com ácidos orgânicos.

O Ni apresenta capacidade intermediária de redistribuição. Há, entretanto, pouca informação sobre a sua redistribuição na planta. Segundo Neumann & Chamel (1986), a capacidade de remobilização no Ni em gerânio foi de 0,01 %, comparada com 0,04 % para ^{86}Rb e 0,00 % para ^{45}Ca .

Funções: O Ni faz parte da metaloenzima urease (que contém dois átomos de Ni por molécula), a qual participa da decomposição da uréia para amônio e CO_2 . Deste modo, este elemento é importante para as plantas que recebem adubações com uréia ou com seus derivados (por exemplo, na adubação foliar), exercendo papel importante no metabolismo do N. Alguns resultados de pesquisa mostram que existem respostas das plantas, como o arroz e a soja, à adição de Ni, quando se utilizou uréia como fonte de N. Na soja, o Ni pode aumentar a atividade da urease foliar, impedindo a acumulação de quantidades tóxicas de uréia.

Teores na planta: Os teores de Ni na planta variam entre 0,3 e $3,5 \text{ mg kg}^{-1}$ de matéria seca, dependendo da parte da planta e da espécie; teores próximos a $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$ são considerados adequados para o crescimento normal das plantas (Malavolta, 2006). Para plantas de cevada, $0,1 \mu\text{g kg}^{-1}$ é considerada uma concentração crítica, onde concentrações nos grãos menores que 100 ng kg^{-1} reduzem a germinação de semente significativamente e menores que 50 ng kg^{-1} reduzem a germinação em até 70 % (Brown et al., 1987).

Sintomas de deficiência e excesso: Os sintomas de deficiência de Ni em plantas leguminosas caracterizam-se pelo acúmulo de uréia, provocando necrose dos folíolos. A uréia é produzida durante o metabolismo do N, em plantas superiores, onde o Ni evita a acumulação de concentrações tóxicas de uréia. As folhas das plantas que contêm teores tóxicos de uréia apresentam sintomas de necrose, com teores de Ni que variam de 0,01 a $0,15 \text{ mg kg}^{-1}$ de matéria seca da planta. Plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) deficientes em Ni apresentam clorose em folhas jovens, evoluindo para necrose do meristema. A deficiência de Ni afeta o crescimento, o metabolismo, o envelhecimento e a absorção de Fe pelas plantas. O Ni aumenta a resistência de plantas a doenças.

Zinco

O teor de Zn na crosta terrestre é de, aproximadamente, 70 mg kg^{-1} , atingindo, na litosfera, teor médio de 8 mg kg^{-1} . O teor de Zn nas rochas ígneas varia de 40 mg kg^{-1} (granito) a 130 mg kg^{-1} (basalto) e nas rochas sedimentares de 16 mg kg^{-1} (arenito) a 96 mg kg^{-1} (folhelho) (Souza & Ferreira, 1991). Nos solos, os teores de Zn geralmente encontram-se na faixa de 10 a 300 mg kg^{-1} de Zn total, o que não se correlaciona com sua disponibilidade (Lindsay, 1979).

O conteúdo de Zn pode ser afetado pelo pH do solo, de forma que o Zn se encontra mais disponível em solos com pH baixo (solos ácidos) que em solos com pH alto (solos alcalinos), apresentando sua mínima disponibilidade em pH acima de 7 (Figura 12). A calagem excessiva pode provocar deficiência de Zn. Nos solos com pH ácido, a deficiência de Zn pode aparecer depois da aplicação de adubos com fosfatos solúveis, que formam fosfatos de Zn de baixa solubilidade. Nos solos carbonáticos, de alto pH, geralmente ocorrem deficiências intensas de Zn.

Forma de absorção: O Zn é absorvido na forma de Zn^{2+} tanto por via radicular como foliar. A mobilidade de redistribuição do Zn na planta é muito pequena, de forma que se encontra concentrado em grande parte na raiz, enquanto, nos frutos, seu conteúdo é sempre menor.

Funções: O Zn é um micronutriente que atua como cofator enzimático. É essencial para a atividade, regulação e estabilização da estrutura protéica ou uma combinação destas:

• Constituinte (estrutural) de enzimas desidrogenases, como álcool, lactato, malato e glutamato-desidrogenase; superóxido-dismutase e anidrase carbônica. Esta última catalisa a dissolução de CO_2 como passo prévio à sua assimilação:

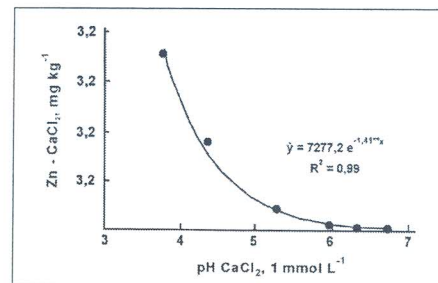


Figura 12. Relação entre os teores de zinco em um Neossolo obtidos pelo método CaCl_2 10 mmol L^{-1} e o pH do solo.

Fonte: Nogueiro et al. (2004).



Participa na ativação enzimática da trifosfato-desidrogenase, enzima essencial na glicólise, bem como nos processos de respiração e fermentação; e da aldolases, encarregadas do desdobramento do éster difosfórico da frutose.

Afeta a síntese e conservação de auxinas, hormônios vegetais envolvidos no crescimento, graças à sua participação na síntese do triptofano, aminoácido precursor do ácido indolacético.

Teores na planta: Os teores de Zn nas plantas variam de 3 a 150 mg kg⁻¹ de matéria seca da planta. Teores inferiores a 25 mg kg⁻¹ caracterizam deficiência do elemento nas folhas (Malavolta, 1980; Malavolta et al., 1989; Pais & Jones Junior, 1996; Furlani, 2004).

Sintomas de deficiência e excesso: Na deficiência de Zn, a planta sofre efeito drástico sobre sua atividade enzimática, desenvolvimento dos cloroplastos, conteúdo de proteínas e ácidos nucléicos. As deficiências de Zn costumam ocorrer nos cultivos prurianuais, sendo menos importantes em cultivos anuais, embora possam ocorrer deficiências neste tipo de cultivos, como é o caso do milho.

A deficiência se manifesta no crescimento restrito da gema terminal, o que se traduz num crescimento em forma de roseta nos cultivos herbáceos, enquanto, em outros cultivos, encurtam-se os entrenós (Figura 8). Os sintomas aparecem sempre nas folhas mais jovens, que apresentam zonas cloróticas que terminam necrosadas, afetando todo o parênquima foliar e as nervuras. O tamanho das folhas é pequeno. Deve-se levar em conta que todas as plantas com deficiências em Zn apresentam folhas com elevados conteúdos de Fe, Mn, nitratos e fosfatos, enquanto os conteúdos em amido são baixos.

A interação entre Zn e P tem sido bastante estudada, sendo verificado que altos teores de P provocam a deficiência de Zn. Marschner & Schropp (1977) verificaram que altos teores de P em videira, cultivada em vasos com solo calcário, ocasionaram sintomas de deficiência de Zn nas folhas, apresentando baixas concentrações de Zn nas folhas novas, bem como redução no crescimento. Em experimentos com solução nutritiva, realizados paralelamente, não foi verificada deficiência de Zn, embora sua concentração nas folhas de videira tenha sido inferior à das folhas com sintomas de deficiência do experimento com solo (Quadro 7).

Não é normal a ocorrência de toxidez por Zn em solos com pH elevado, já que, nesta situação, ocorre imobilização do Zn. Contudo, é possível verificar toxidez de Zn em solos ácidos ou em solos cujo material de origem são rochas ricas nesse elemento. Igualmente, pode existir contaminação por Zn por fontes industriais ou por aplicações de resíduos orgânicos. Nos casos de toxidez por Zn, as folhas apresentam pigmentações vermelhas no pecíolo e nas nervuras, sendo também verificada clorose resultante da baixa concentração de Fe (o Zn impede a redução do Fe, bem como pode impedir o seu transporte para o interior da planta).

Quadro 7. Produção de matéria seca, teor de fósforo e zinco em folhas de videira e relação P/Zn, considerando a aplicação de doses de P no solo e em solução nutritiva

Dose de P	Matéria seca	Teor em folhas novas		Relação P/Zn
		P	Zn	
		g kg ⁻¹ MS	mg kg ⁻¹ MS	
Solo				
0,3	19,9	2,63	26,6	99
3,0	19,9	2,69	19,7	137
6,0	17,2	3,06	15,5	197
Solução nutritiva				
mmol L ⁻¹				
0,1	15,7	2,72	15,7	173
1,0	15,2	8,60	13,9	678
5,0	15,5	13,47	13,8	976

Fonte: Adaptado de Marschner & Schropp (1977).

ELEMENTOS BENÉFICOS

Segundo Furlani (2004), os elementos minerais que estimulam o crescimento das plantas, embora não essenciais, ou então essenciais somente para algumas espécies de plantas, ou sob condições específicas, são comumente chamados de elementos benéficos. Podem ser classificados como elementos benéficos: Na, Si, Se e Co.

Sódio

Elemento químico pertencente ao grupo Ia da tabela periódica (grupo dos metais alcalinos). É um metal macio, prateado, abundante na natureza em compostos como o sal comum. Encontra-se na natureza como sal marinho, cloreto de sódio (NaCl), como o mineral halita e na água de mar, na qual o Na forma 31 % dos constituintes dissolvidos. O Na é o sexto elemento em abundância na terra, constituindo 2,8 % da crosta terrestre. O Na encontra-se como cátion monovalente (Na⁺), adsorvido aos colóides de argila, e, quando em elevadas concentrações, é capaz de deslocar o Ca²⁺ e o K⁺, afetando a estrutura do solo.

O Na é um ativador de enzimas ATP-ases em animais e, provavelmente, em plantas. Pode substituir o K, na ativação da ADP-glucosapirifosforilase que atua na síntese do amido. O Na⁺ é requerido para o metabolismo ácido de crasuláceas (MAC) e pela maioria das espécies que utilizam a via metabólica C4. Nessas plantas, o Na é vital para a

regeneração do ácido fosfoenolpirúvico, substrato da primeira carboxilação das plantas C4 e no MAC. Muitas espécies C3 se beneficiam também de concentrações baixas de Na. O Na estimula o crescimento por meio do alongamento celular e pode substituir o K como um soluto osmoticamente ativo. Quanto à tolerância a este elemento, as plantas se dividem em natrofilicas e natrofóbicas.

A deficiência de Na causa nas plantas natrofilicas cloroses e necroses e impede a formação de flores.

Silício

O Si representa 27,7 % da crosta terrestre. É encontrado na natureza na forma de óxidos (SiO_2), fazendo parte de rochas, areia e argila. Combina-se com o Al, Mg, Ca, Na, K ou Fe, formando silicatos. Seus compostos encontram-se, também, em águas naturais, na atmosfera, como pó de Si, e em tecidos e compostos orgânicos de algumas plantas. Na solução do solo, o Si encontra-se na forma de ácido monossilícico, H_4SiO_4 , cuja forma é absorvido.

O Si deposita-se em forma amorfa nas paredes celulares das plantas, contribuindo com a rigidez e elasticidade. O Si é requerido somente por espécies da família Equisetáceas para completar seu ciclo de vida. No entanto, muitas espécies acumulam concentrações altas de Si em seus tecidos, contribuindo para melhorar o crescimento e a produtividade destas plantas. Nas gramíneas, além de se depositar na parede celular da epiderme, encontra-se presente no interior de células, como as células buliformes, e no xilema.

Na plantas, o Si é depositado, como sílica hidratada amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), primeiramente no retículo endoplasmático, na parede celular e nos espaços intercelulares. No interior das células, o Si acumula-se também em células epidérmicas especializadas, chamadas de células silíceas. Existem trabalhos que comprovam a essencialidade do Si para a cana-de-açúcar, tomate e pepino. O Si aumenta a resistência do arroz ao ataque de fungos e aumenta o rendimento do cultivo. Observou-se que os silicatos diminuem a toxidez causada pelo Fe e Mn nos cultivos de arroz.

As plantas deficientes em Si são quebradiças e susceptíveis a infecções por fungos. O Si pode diminuir a toxidez causada por metais pesados.

Selênio

O Se apresenta propriedades químicas e físicas semelhantes às do S. É um elemento altamente reativo, formando mais de 170 combinações sólidas, três combinações líquidas (Se_2Cl_2 , SeF_4 e CSe_2) e duas combinações gasosas (H_2Se e SeF_6) (Chizhikov & Shchastlivyi, 1968). O teor de Se no solo varia entre 0,1 e 2,0 mg kg^{-1} ; quando o teor no solo for menor que 0,6 mg kg^{-1} , a concentração deste elemento nas plantas pode-se tornar deficiente em termos de saúde animal.

O Se não é um elemento essencial para plantas, embora esteja sendo aplicado ao solo, em áreas deficientes, para assegurar que os alimentos possuam quantidades

suficientes para satisfazer as necessidades dos animais e do homem. A solubilidade do Se no solo é baixa, embora, quando solúvel na solução do solo, seja prontamente absorvido, como selenato (SeO_4^{2-}), pelas plantas. A disponibilidade do Se para as plantas é afetada pelas condições climáticas, condições de oxirredução, pH e teor de sesquióxidos do solo. A absorção e a acumulação de Se pelas plantas são afetadas por outros elementos, como N, P e S, bem como pela maioria do micronutriente (Pais & Jones Júnior, 1996).

Plantas deficientes em Se (menos de 100 $\mu\text{g kg}^{-1}$) ocorrem em condições onde o solo apresenta teores menores que 0,6 mg kg^{-1} . Teores entre 0,1 e 0,3 mg kg^{-1} na matéria seca de plantas utilizadas na dieta são necessários aos animais, contudo, pode ser um elemento altamente tóxico, considerando-se o teor máximo de Se nas forragens de 1,0 a 5,0 mg kg^{-1} (Furlani, 2004).

Cobalto

O Co constitui apenas 0,001 % da crosta terrestre, onde se apresenta em pequenos teores ou associado a outros elementos, em minerais como a a cobaltita (CoAsS), eritrina ($\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) e esmaltita (CoAs_2). Um dos principais sais de Co é o sulfato (CoSO_4). O Co apresenta teores totais que variam de 1 a 40 mg kg^{-1} , e na água do mar, aproximadamente, 0,1 ng L^{-1} . Faz parte de moléculas importantes para o metabolismo animal, como a vitamina B_{12} .

O Co é essencial para algas azul-verdes e microrganismos que fixam o N_2 atmosférico, mas ainda não foi estabelecida a essencialidade do Co para plantas superiores, já que não existem evidências de qualquer função direta deste nutriente na planta, embora existam evidências de alguns efeitos benéficos (Epstein & Bloom, 2005). Plantas que dependem da fixação do N_2 , como as leguminosas, mas que têm acesso ao amônio, nitrato, ou aminoácidos, não dependem do Co. Por outro lado, quando estas plantas que dependem de fixação de N_2 atmosférico não tem acesso a esses compostos nitrogenados, o Co é essencial para o seu crescimento (Reisenauer, 1960; Ahmed & Evans, 1961). O Co faz parte do complexo enzimático cobalamina (vitamina B_{12} e metabólitos relacionados), que atua na fixação do N_2 por bacteróides, indicando a exigência de Co para os microrganismos fixadores.

O teor de Co nas plantas varia de 0,05 a 0,30 mg kg^{-1} , apresentado as plantas leguminosas maior concentração do que as gramíneas (Furlani, 2004). Os sintomas de deficiência de Co se caracterizam por sintomas típicos de deficiência de N. Quanto à toxidez por Co, os sintomas se caracterizam por cloroses, e os teores tóxicos variam amplamente entre 6 e 143 mg kg^{-1} , dependendo da espécie.

Para leguminosas, o teor de Co nas sementes tem grande importância em condições de solos que apresentam deficiência deste elemento. A aplicação de Co em plantas forrageiras, em condições de solos com deficiência deste elemento, é importante para animais ruminantes, já que o Co é essencial para a microflora do rúmen, por estar envolvido na síntese da vitamina B_{12} (Furlani, 2004).

LITERATURA CITADA

- ADRIANO, D.C. Trace elements in the terrestrial environment. New York, Springer-Verlag, 1986. 533p.
- AHMED, S. & EVANS, H.J. The essentiality of cobalt for soybean plants grown under symbiotic conditions. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 4:24-36, 1961.
- ARNON, D.I. & STOUT, P.R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. Plant Physiol., 14:371-375, 1939.
- BARTLETT, R.J. Manganese redox reactions and organic interaction in soils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MANGANESE IN SOILS AND PLANTS, Adelaide, 1988. Proceedings. Adelaide, Australia, Manganese Symposium, 1988. p.59-73.
- BOWEN, J.E. Absorption of copper, zinc and manganese by sugarcane tissue. Plant Physiol., 44:255-261, 1969.
- BROWN, P.H. & HU, H. Phloem mobility of boron is species dependent: Evidence for phloem mobility in sorbitol-rich species. Ann. Bot., 77:497-505, 1996.
- BROWN, P.H.; WELCH, R.M. & CARY, E.E. Nickel: A micronutrient essential for higher plants. Plant Physiol., 85:801-803, 1987.
- BROYER, T.C.; CARLTON, A.B.; JOHNSON, C.M. & STOUT, P.R. Chlorine: A micronutrient element for higher plants. Plant Physiol., 29:526-532, 1954.
- BRUN, L.A.; MAILLET, J.; RICHARTE, J.; HERRMANN, P. & REMY, J.C. Relationships between extractable copper, soil properties and copper uptake by wild plants in vineyard soils. Environ. Poll., 102:151-161, 1998.
- CARRARO, H.R.; NACHTIGALL, G.R.; ALLEONI, L.R.F. & JACOMINO, A.P. Qualidade de frutos de macieira em função da adubação potássica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 17., Florianópolis, 2004. Anais. Florianópolis, Sociedade Brasileira de Fruticultura, 2004. CD-ROM
- CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A. & PERES, L.E.P. Manual de fisiologia vegetal: Teoria e prática. Piracicaba, Ceres, 2005. 650p.
- CHANEY, R.L.; BROWN, J.C. & TIFFIN, L.O. Obligatory reduction of ferric chelates in iron uptake by soybeans. Plant Physiol., 50:208-213, 1972.
- CHIZHIKOV, D.M. & SHCHASTLIVYI, V.P. Selenium and selenides. London, Collet's, 1968. 403p.
- DECHEN, A.R.; HAAG, H.P. & CARMELLO, Q.A.C. Funções dos micronutrientes nas plantas. In: FERREIRA, M.E. & CRUZ, M.C.P., eds. Micronutrientes na agricultura. Piracicaba, POTAFOS/CNPq, 1991a. p.65-78.
- DECHEN, A.R.; HAAG, H.P. & CARMELLO, Q.A.C. Mecanismos de absorção e de translocação de micronutrientes. In: FERREIRA, M.E. & CRUZ, M.C.P., eds.. Micronutrientes na agricultura. Piracicaba, POTAFOS/CNPq, 1991b. p.79-97.

- DIEST, A. van Factors affecting the availability of potassium in soil. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 11., Bern, 1978. Proceedings. Bern, International Potash Institute, 1979. p.43-63.
- DREW, M.C. & SAKER, L.R. Nutrient supply and the growth of the seminal root system in barley. J. Exper. Bot., 29:435-451, 1978.
- EPSTEIN, E. & BLOOM, A.J. Mineral nutrition of plants: principles and perspectives. 2.ed. Sunderland, Sinauer Associates, 2005. 380p.
- FASSBENDER, H.W. Quimica de suelos: con énfasis en suelos de America Latina. San José, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1994. 422p.
- FONTES, R.L.F. Pesquisa com micronutrientes em solos e plantas. Difusão dos resultados no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Rio de Janeiro, 1997. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 25p. CD-ROM
- FURLANI, A.M.C. Nutrição mineral. In: KERBAUY, G.B. Fisiologia vegetal. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 2004. p.40-75.
- GLASS, A.D.M. Regulation of ion transport. Ann. Ver. Plant Physiol., 34:311-326, 1983.
- GOOR, B.J. van & WIERSMA, D. Chemical forms of manganese and zinc in phloem exudates. Physiol. Plant., 36:213-216, 1976.
- GUERINOT, M.L. & YI, Y. Iron: nutritious, noxious, and not readily available. Plant Physiol., 104:815-820, 1994.
- HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L. & NELSON, W.L. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. 6.ed. New Jersey, Prentice Hall, 1999. 499p.
- HEENAN, D.P. & CAMPBELL, L.C. Transport and distribution of manganese in two cultivars of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). Austr. J. Agric. Res., 31:943-949, 1980.
- JONES JR., J.B. Distribution of 15 elements in corn leaves. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 1:27-34, 1970.
- KRAUSKOPF, K.B. Geochemistry of micronutrients. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M. & LINDSAY, W.L., eds. Micronutrients in agriculture. Madison, Soil Science Society of America, 1972. p.7-40.
- LINDSAY, W.L. Chemical equilibria in soils. New York, John Wiley, 1979. 449p.
- LINDSAY, W.L. Role of chelation in micronutrient availability. In: CARSON, E.W., ed. The plant root and its environment. Charlottesville, University Press of Virginia, 1974. p.507-524.
- LONERAGAN, J.R. Distribution and movement of copper in plants. In: LONERAGAN, J.R.; ROBSON, A.D. & GRAHAN, R.D., eds. Copper in soils and plants. London, Academic Press, 1981. p.165-188.

- LONERAGAN, J.R. The availability and absorption of trace elements in soil-plant systems and their relation to movement and concentrations of trace elements in plant. In: NICHOLAS, D.J.D. & EGAN, A.R., eds. Trace elements in soil-plant-animal systems. London, Academic Press, 1975. p.109-134.
- MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo, Ceres, 1980. 254p.
- MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo, Agronômica Ceres, 2006. 638p.
- MALAVOLTA, E. O fósforo na planta e interações com outros elementos. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S., eds. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba, Instituto da Potassa & Fosfato: Instituto Internacional da Potassa, 2004. p.35-105.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba, POTAFOS, 1989. 201p.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2.ed. London, Academic Press, 1995. 889p.
- MARSCHNER, H. & SCHROPP, A. Comparative studies on the sensitivity of six rootstock varieties of grapevine to phosphate-induced Zn deficiency. *Vitis*, 16:79-88, 1977.
- MENGEL, K. & KIRKBY, E.A. Principles of plant nutrition. 4.ed. Dordrecht, Kluwer Academic, 1987. 687p.
- NACHTIGALL, G.R. & RAIJ, B. van. Análise e interpretação de potássio no solo. In: YAMADA, T. & ROBERTS, T.L., eds. Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba, Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 2005. p.93-118.
- NACHTIGALL, G.R.; NOGUEIROL, R.C.; ALLEONI, L.R.F. & CAMBRI, M.A. Copper concentration of vineyard as a function of pH variation and addition of poultry litter. *Braz. Arch. Biol. Tech.*, 2007. (No Prelo)
- NEUMANN, P.M. & CHAMEL, A. Comparative phloem mobility of nickel in nonsenescent plants. *Plant Physiol.*, 81:689-691, 1986.
- NOGUEIROL, R.C.; NACHTIGALL, G.R.; CAMBRI, M.A. & ALLEONI, L.R.F. Copper and zinc in the organic fraction of vineyard soils, as a function of pH variation. In: INTERNATIONAL MEETING OF INTERNATIONAL HUMIC SUBSTANCES SOCIETY, 12., São Pedro, 2004. Anais. São Carlos, Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2004. p.707-709.
- PAIS, I. & JONES JUNIOR, J.B. The handbook of trace elements. Boca Raton, St. Lucie Press, 1996. 223p.
- PIETRZAK, U. & McPHAIL, D.C. Copper accumulation, distribution and fractionation in vineyard soils of Victoria, Australia. *Geoderma*, 122:151-166, 2004.
- QUAGGIO, J.A.; SAKAI, M.; ISHIMURA, I.; SAES, L.A. & BATAGLIA, O.C. Calagem para a rotação feijão-milho verde em solo orgânico do Vale do Rio Ribeira de Iguape (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, 9:255-251, 1985.

- RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. São Paulo, Ceres, 1991. 343p.
- RAVEN, J.A. Short and long distance transport of boric acid in plants. *New Phytol.*, 84:231-249, 1980.
- REISENAUER, H.M. Cobalt in nitrogen fixation by a legume. *Nature*, 186:375-376, 1960.
- REISENAUER, H.M. Determination of plant-available soil manganese. In: GRAHAM, R.D.; HANNAM, R.J. & UREN, N.C., eds. Manganese in soils and plants. Dordrecht, Kluwer Academic Publisher, 1988. p.87-98.
- REISENAUER, J.A. The effect of sulfur on the absorption and utilization of molybdenum by peas. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 27:553-555, 1963.
- RÖMHELD, V. & MARSCHNER, H. Mechanism of iron uptake by peanut plants. I. Fe³⁺ reduction, chelate splitting, and release of phenolics. *Plant Physiol.*, 71:949-954, 1983.
- SCHROEDER, D. Relationship between soil potassium and the potassium nutrition of the plant. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 11., Bern, 1978. Proceedings. Bern, International Potash Institute, 1979. p.43-63.
- SOUZA, E.C.A. & FERREIRA, M.E. Zinco. In: FERREIRA, M.E. & CRUZ, M.C.P., eds. Micronutrientes na agricultura. Piracicaba, POTAFOS/CNPq, 1991. p.219-242.
- TIFFIN, L.O. Translocation of micronutrients in plants. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M. & LINDSAY, W.L., eds. Micronutrients in agriculture. Madison, Soil Science Society of America, 1972. p.199-229.
- van der BERG, A.K. & PERKINS, T.D. Evaluation of a portable chlorophyll meter to estimate chlorophyll and nitrogen contents in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) leaves. *For. Ecol. Manag.*, 200:113-117, 2004.
- WRIGLEY, C.W.; DU CROS, D.L.; ARCHER, M.J.; DOWNIE, P.G. & ROXBURGH, C.M. The sulfur content of wheat endosperm and its relevance to grain quality. *Austr. J. Plant Physiol.*, 7:755-766, 1980.