

OLERICULTURA



NUTRIÇÃO DE OLERÍCOLAS

SISTEMA FAEP



**SIMONE DA COSTA MELLO
JÉSSICA ANGELOTTI MENDONÇA**

NUTRIÇÃO DE OLERÍCOLAS

**CURITIBA
SENAR AR/PR
2017**

Depósito legal na CENAGRI, conforme Portaria Interministerial n. 164, datada de 22 de julho de 1994, e junto a Fundação Biblioteca Nacional e Senar-PR.

Autores: Simone da Costa Mello e Jéssika Angelotti Mendonça

Coordenação técnica: Vanessa Reinhart – CREA PR-122367 e Luis Guilherme P. B. Lemes

Revisão técnica: Vanessa Reinhart – CREA PR-122367

Coordenação metodológica: Patrícia Lupion Torres

Normalização: Rita de Cássia Teixeira Gusso – CRB 9. /647

Coordenação gráfica: Adilson Kussem

Fotografias: Simone da Costa Mello e Yara Fertilizantes

Ilustrações: Sincronia Design

Diagramação: Sincronia Design

Capa: Adilson Kussem

Catálogo no Centro de Editoração, Documentação
e Informação Técnica do SENAR-PR.

Mello, Simone da Costa; Mendonça, Jéssika Angelotti.

Nutrição de olerícolas / Simone da Costa Mello [e] Jéssika Angelotti Mendonça –
Curitiba : SENAR-PR., 2017. – 80 p.

ISBN 978-85-7565-155-1

1. Nutrientes. 2. Fertilizantes. 3. Macronutrientes. 4. Minerais. 4. Deficiência-
Nutrientes. I. Mendonça, Jéssika Angelotti. II. Título.

CDD630
CDU65.012.2

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, por qualquer meio, sem a autorização
do editor.

IMPRESSO NO BRASIL – DISTRIBUIÇÃO GRATUITA



APRESENTAÇÃO

O SENAR – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural – é uma instituição prevista na Constituição Federal e criada pela Lei n. 8.315, de 23/12/1991. Tem como objetivo a formação profissional e a promoção social do homem do campo para que ele melhore o resultado do seu trabalho e, com isso, aumente sua renda e a sua condição social.

No Paraná, o SENAR é administrado pela Federação da Agricultura do Estado do Paraná – FAEP – e vem respondendo por amplo e diversificado programa de treinamento.

Todos os cursos ministrados por intermédio do SENAR são coordenados pelos Sindicatos Rurais e contam com a colaboração de outras instituições governamentais e particulares, prefeituras municipais, cooperativas e empresas privadas.

O material didático de cada curso levado pelo SENAR é preparado de forma criteriosa e exclusiva para seu público-alvo, a exemplo deste manual. O objetivo é garantir que os benefícios dos treinamentos se consolidem e se estendam. Afinal, quanto maior o número de trabalhadores e produtores rurais qualificados, melhor será o resultado para a economia e para a sociedade em geral.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	ELEMENTOS MINERAIS	9
2.1	CRITÉRIOS DE ESSENCIALIDADE	9
3	ABSORÇÃO DOS NUTRIENTES	11
4	MACRONUTRIENTES	15
4.1	NITROGÊNIO (N)	15
4.2	FÓSFORO (P)	22
4.3	POTÁSSIO (K)	26
4.4	CÁLCIO (CA)	30
4.5	MAGNÉSIO (Mg)	35
4.6	ENXOFRE (S)	36
5	MICRONUTRIENTES	39
5.1	FERRO (Fe)	39
5.2	COBRE (Cu)	42
5.3	BORO (B)	43
5.4	MANGANÊS (Mn)	47
5.5	MOLIBDÊNIO (Mo)	48
5.6	ZINCO (Zn)	50
5.7	CORO (Cl)	52
5.8	NÍQUEL (Ni)	52
6	ELEMENTOS BENÉFICOS	55
6.1	COBALTO (Co)	55
6.2	SILÍCIO (Si)	55
7	DIAGNOSE DA DEFICIÊNCIA DE MACRO E MICRONUTRIENTES	57
7.1	DIAGNOSE VISUAL	57
7.2	ANÁLISE DE SOLO	59
7.3	ANÁLISE FOLIAR	62
8	FERTILIZANTES	65
8.1	CLASSIFICAÇÃO DOS FERTILIZANTES	65
8.2	FERTILIZANTES SOLÚVEIS	65
8.3	FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO CONTROLADA	68
8.4	BIOESTIMULANTES	69
9	CONCLUSÃO	73
	REFERÊNCIAS	75
	BIBLIOGRAFIA	77

1 INTRODUÇÃO

O equilíbrio nutricional das plantas é um dos fatores de grande importância para a agricultura. A produção e qualidade estão diretamente ligadas ao estresse sofrido ou não pelas plantas durante o cultivo. Dessa forma, a capacidade de identificação de desbalanço nutricional, assim como saber as características e função de cada nutriente é essencial para o sucesso. O diagnóstico do estado nutricional das plantas é de suma importância para a determinação do momento da fertilização, escolha da fonte de nutrientes e sua quantidade. De um modo geral, as culturas que apresentam ciclos de produção curtos e intensos são mais sensíveis ao desbalanço nutricional, tornando a manutenção da nutrição adequada determinante, uma vez que não haverá tempo hábil para recuperação em caso de deficiência nutricional.

Dessa forma, esta cartilha abordará a importância dos elementos minerais na nutrição das plantas, as principais funções que desempenham no metabolismo vegetal e a identificação de suas deficiências e toxidez, para que o produtor possa manejá-los de forma eficiente e alcançar altas produtividades com produtos de qualidade.

2 ELEMENTOS MINERAIS

2.1 CRITÉRIOS DE ESSENCIALIDADE

Os solos contêm inúmeros elementos químicos, no entanto nem todos são considerados nutrientes para o desenvolvimento das plantas. Os critérios de essencialidade dos elementos minerais ao desenvolvimento das plantas foram descritos em 1939 por Arnon e Stout. Para um elemento ser considerado essencial este deve atender a três critérios de essencialidade:

Critério 1: um elemento é essencial se sua deficiência impede que a planta complete seu ciclo de vida, passando pelos estágios vegetativo e reprodutivo.

Critério 2: a função metabólica de um elemento mineral não pode ser substituída por outro elemento com propriedades similares.

Critério 3: o elemento tem que estar diretamente envolvido com o metabolismo da planta ou ser requerido em uma determinada etapa metabólica.

Partindo-se dos critérios de essencialidade, é possível dividir os elementos minerais essenciais em duas categorias, os macronutrientes e os micronutrientes. Os macronutrientes são aqueles exigidos em grande quantidade pelas plantas, sendo carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), enxofre (S), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Enquanto os micronutrientes são aqueles necessários em baixa quantidade, como o ferro (Fe), cobre (Cu), boro (B), manganês (Mn), molibdênio (Mo), zinco (Zn), cloro (Cl) e níquel (Ni).

A concentração dos elementos minerais nos tecidos vegetais varia amplamente em função do genótipo, condições de solo etc. A concentração por si só não é suficiente para determinar se um elemento mineral é um nutriente essencial ou não, para isso devem ser observados os critérios de essencialidade. A Tabela 1 mostra as variações das concentrações dos elementos minerais comumente encontradas.

Tabela 1 – Variação da concentração de elementos nutrientes em plantas cultivadas.

	Elemento	Símbolo	Variação das concentrações*
MACRONUTRIENTES (%)	Nitrogênio	N	0,5-6
	Potássio	K	0,8-8
	Cálcio	Ca	0,1-6
	Magnésio	Mg	0,05-1
	Fósforo	P	0,15-0,5
	Enxofre	S	0,1-1,5
MICRONUTRIENTES (ppm)	Cloro	Cl	10-80000
	Ferro	Fe	20-600
	Manganês	Mn	10-600
	Boro	B	0,2-800
	Zinco	Zn	10-250
	Cobre	Cu	2-50
	Molibdênio	Mo	0,1-10
	Níquel	Ni	0,05-5

*Variações de concentrações dos nutrientes em plantas cultivadas, com base no peso seco.

Fonte: Adaptado de Epstein; Bloom, 2006.

Além desses, existem elementos que não são considerados essenciais, ou seja, elementos sem os quais a planta consegue sobreviver, mas que sua presença é capaz de contribuir para o crescimento, produção ou resistência a condições desfavoráveis do meio, como condições climáticas, ataque de pragas e doenças etc. Esses são denominados de elementos benéficos, e tem-se como exemplo o silício (Si) e o cobalto (Co).

3 ABSORÇÃO DOS NUTRIENTES

À medida que ocorre o crescimento radicular, as raízes absorvem nutrientes que, a princípio, estão em seu trajeto de crescimento. Com o tempo, há redução na concentração desses elementos na região próxima às raízes, gerando um gradiente de concentração de nutrientes. Para que um novo suprimento chegue à superfície radicular é necessário o transporte dos elementos minerais até esse ponto, sendo o principal veículo a água. O transporte dos nutrientes até às raízes das plantas, pode ocorrer de três formas:

- Fluxo de massa:

O fluxo de massa é consequência da existência de um potencial de água no solo maior do que junto à raiz. Essa diferença de potencial promove o movimento de água em direção à raiz, arrastando os íons que se encontram dissolvidos na mesma. A diferença de potencial hídrico, que promove o transporte de nutrientes, é gerada pelo fluxo transpiratório, uma vez que o potencial hídrico é decrescente na sequência, solução do solo > raízes > folhas > atmosfera. Os elementos, preferencialmente transportados por fluxo de massa, são aqueles que se encontram em maiores concentrações na solução do solo, como Ca, N e S, uma vez que são adsorvidos com menor energia do que outros elementos, como P e Zn.

- Difusão:

O fluxo difusivo ou difusão tem como força motriz o gradiente de concentração dos elementos minerais, ou seja, é necessário que o solo seja mais rico no nutriente em questão do que a região próxima ao sistema radicular, este então se moverá. A difusão depende também da não existência de obstáculos entre o elemento mineral e a raiz. Para os elementos que estão fortemente aderidos à superfície do solo, como o P e o Zn, o fluxo difusivo é o principal mecanismo de transporte do solo ao sistema radicular.

- Interceptação radicular:

Compreende a interceptação direta dos nutrientes por meio do crescimento radicular. Apesar de apresentar contribuição para o desenvolvimento das plantas e interferir no transporte por difusão e fluxo de massa, a interceptação radicular, por si só, apresenta baixa contribuição na absorção total de nutrientes.

Após o transporte dos nutrientes, ocorre a absorção dos mesmos juntamente com a água. A entrada de água e nutrientes pelas raízes ocorre, principalmente, nos ápices radiculares, regiões permeáveis. Após a entrada na epiderme, o transporte até os vasos do xilema, pode ocorrer por duas rotas (Figura 1):

Apoplástica:

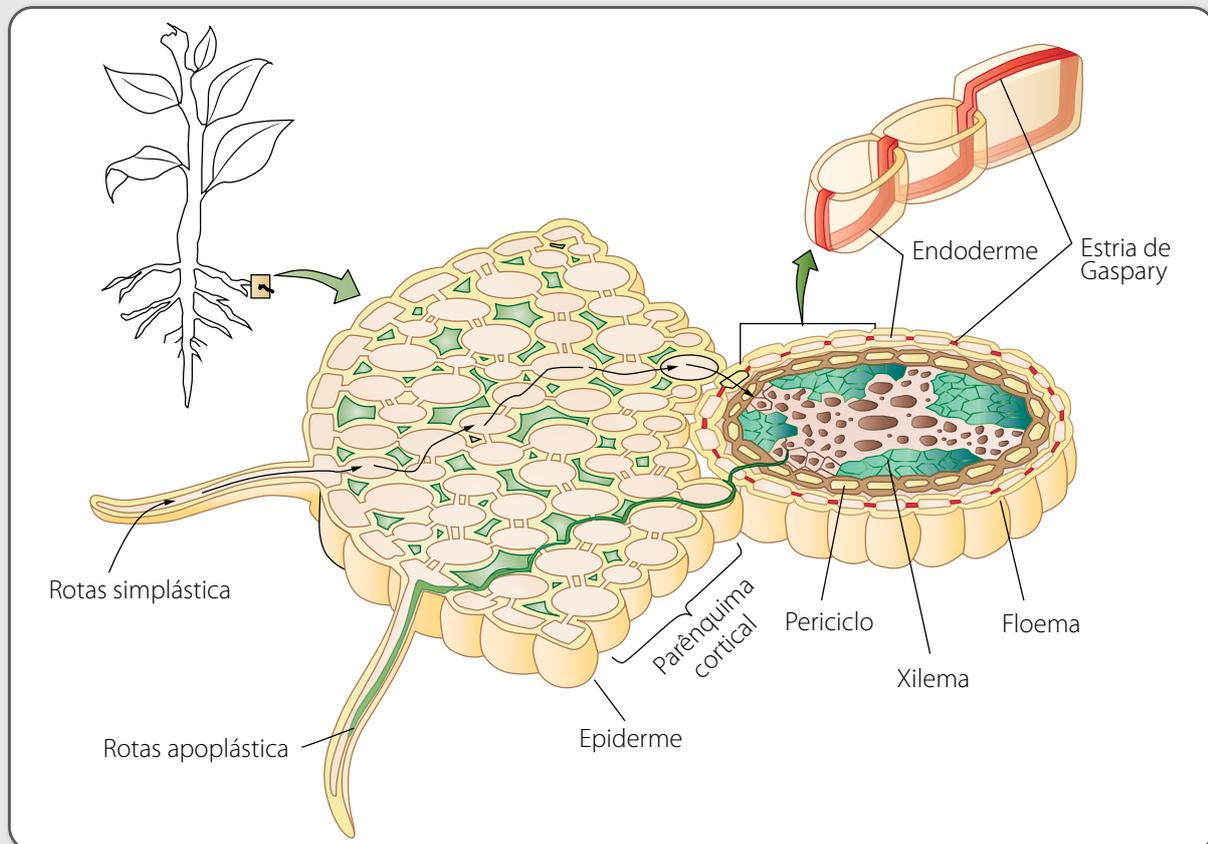
O apoplasto é o sistema contínuo de paredes celulares, espaços intercelulares de aeração e os lumes das células não vivas, como xilema e fibras. Nessa rota, a água e nutrientes movem-se pelas paredes celulares e por espaços extracelulares, sem atravessar qualquer membrana, à medida que se deslocam ao longo do parênquima cortical.

Simplástica:

O simplasto consiste da rede de citoplasmas celulares interconectados por plasmodesmos. Nessa rota, a água e nutrientes deslocam-se através do parênquima cortical via plasmodesmos.

Na endoderme o movimento de água e sais minerais é obstruído pela estria de Caspary – banda dentro das paredes celulares radiais da endoderme impregnada com suberina. Nesse ponto há a necessidade da água e nutrientes moverem-se pela membrana, quebrando o fluxo apoplástico. A presença da estria de Caspary impede que os íons retornem, via apoplasto para fora da raiz, permitindo que a planta mantenha uma concentração mais alta de íons no xilema do que a existente na água que circunda a rizosfera.

Figura 1 – Rotas de absorção pela raiz. Através do parênquima cortical, a água e nutrientes podem se movimentar pelas rotas apoplásticas, simplásticas e transmembrana. Na endoderme a rota apoplástica é bloqueada pela estria de Caspary.

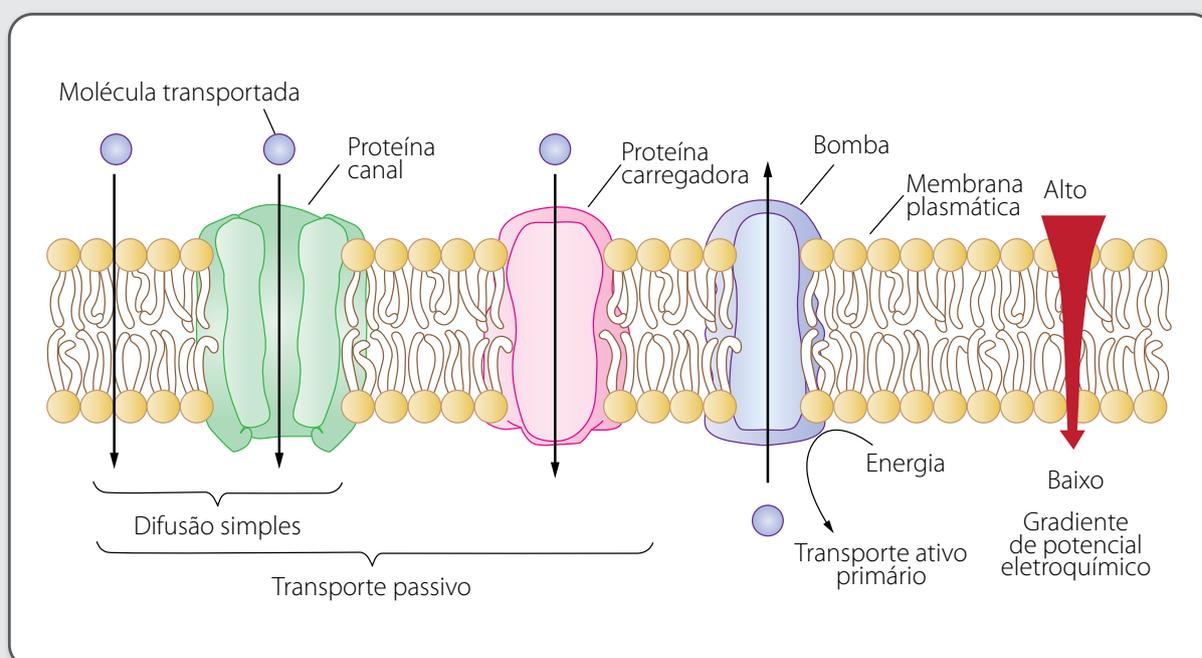


Fonte: Adaptado de Taiz; Zeiger, 2013.

Uma vez absorvidos, os íons precisam ser carregados nos elementos de vaso ou traqueídes para serem translocados para a parte aérea. O processo pelo qual os íons saem do simplasto e entram nas células condutoras do xilema é denominado carregamento do xilema. Este processo é altamente regulado por um potencial transmembrana, mantido pela atividade de proteínas denominadas H^+ ATPases ou bombas de prótons. As membranas plasmáticas das células do

parênquima e do xilema contêm bombas de prótons, aquaporinas e uma diversidade de canais iônicos e carregadores especializados no influxo ou efluxo de íons (Figura 2). Os canais e os carregadores podem mediar o transporte passivo de solutos através da membrana, a favor do gradiente de potencial eletroquímico do soluto, por meio de difusão simples ou difusão facilitada. As proteínas canais atuam como poros seletivos na membrana, pelos quais moléculas e íons podem se difundir. Esse tipo de transporte é sempre passivo e a seletividade do canal depende do tamanho do poro, da densidade e da natureza das cargas de sua superfície. As proteínas carregadoras se ligam a molécula transportada em um lado da membrana e a liberam do outro lado, esse tipo de transporte de moléculas pode ser denominado de difusão facilitada. O transporte ativo primário envolve gasto de energia na forma de ATP. As proteínas de membrana que realizam este tipo de transporte são denominadas bombas. Estas transportam íons, como Ca^{2+} e H^+ .

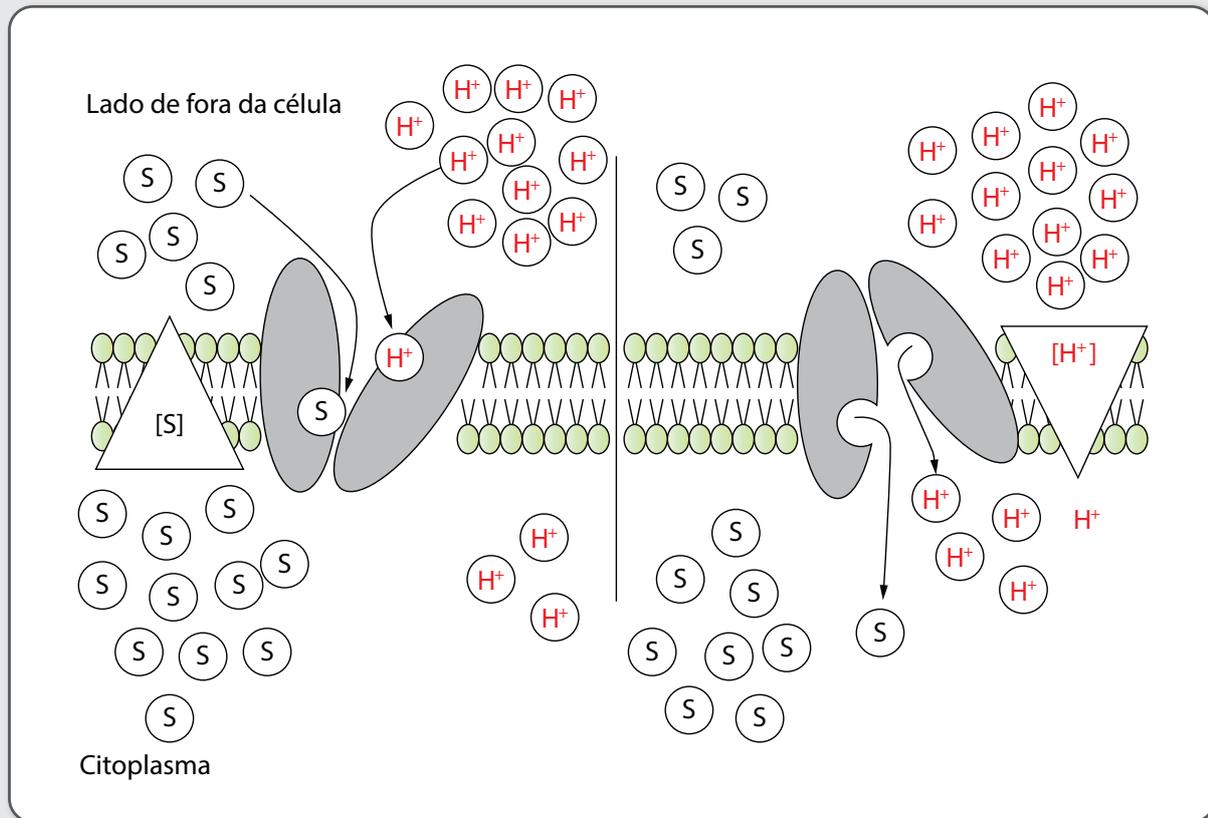
Figura 2 – Diversidade de proteínas canais, carregadoras e bombas de prótons presentes na membrana plasmática, responsáveis pelo transporte de solutos para dentro da célula.



Fonte: Adaptado de Taiz; Zeiger, 2013.

Além disso, existe outro mecanismo necessário para dirigir a absorção ativa da maioria dos nutrientes minerais, como NO^{-3} , SO_4^{2-} e PO_4^{3-} e o efluxo de Na^+ , que em altas concentrações é tóxico para as plantas. Nesse caso, as moléculas são transportadas contra seu gradiente eletroquímico, acopladas ao transporte de outro soluto a favor de seu gradiente eletroquímico. Esse tipo de cotransporte é denominado de transporte ativo secundário. Existem dois tipos de transporte ativo secundário: o simporte, no qual a molécula e seu cotransportador se movem na mesma direção e o antiporte, no qual o movimento a favor do gradiente de prótons impulsiona o transporte ativo de um soluto na direção oposta (Figura 3).

Figura 3 – Representação hipotética do mecanismo de transporte ativo secundário. A entrada conjunta do soluto e do próton (A) provoca uma modificação na conformação da proteína que coloca o soluto e o próton para dentro da célula (B).



Fonte: Adaptado de Taiz; Zeiger, 2013.

A absorção de micronutrientes, como Fe, Zn, Mn e Cu, ocorre por meio de mecanismos mais específicos. Em solos com pH elevado, esses nutrientes ficam imobilizados na forma de hidróxidos. Por exemplo, para absorção de Fe, muitas dicotiledôneas liberam compostos fenólicos na rizosfera, que atuam como quelantes e solubilizantes, atuando na redução do Fe^{3+} para Fe^{2+} , permitindo assim a absorção do mesmo. Dentro da planta, o Fe pode ser quelado novamente pelo citrato, para ser transportado a longas distâncias no xilema. Em gramíneas, é comum a presença de outros transportadores de solutos, como os sideróforos. Estes constituem uma segunda estratégia para absorver Fe, Zn, Mn e Cu. Também funcionam como quelatos e parecem entrar na célula vegetal junto com o metal, sem que este seja reduzido. A exsudação de substâncias orgânicas também pode ser um mecanismo para impedir a entrada de íons tóxicos. Algumas plantas resistentes ao alumínio, por exemplo, exsudam ácidos orgânicos, para complexá-lo e impedir sua absorção.

4 MACRONUTRIENTES

Dentre os macronutrientes, o carbono, o hidrogênio e o oxigênio necessários para o desenvolvimento das plantas são fornecidos essencialmente pela fotossíntese, como CO_2 e pela água (H_2O) absorvida do meio de crescimento, enquanto os demais nutrientes são fornecidos pelos meios de cultivo.

4.1 NITROGÊNIO (N)

a) Função do N nas plantas

O nitrogênio é um dos elementos encontrado em maior quantidade nas plantas, estando atrás apenas do carbono, hidrogênio e oxigênio. O N está presente na constituição de muitos compostos orgânicos, incluindo todos os aminoácidos, os quais formam as proteínas e os ácidos nucleicos (DNA e RNA), além de atuar, também como ativador de enzimas. O N também é necessário para a síntese de clorofila e está diretamente envolvido na fotossíntese.

b) Fixação do N atmosférico (N_2)

O nitrogênio é um dos elementos mais abundantes na atmosfera, sendo que aproximadamente 78% do volume atmosférico é composto de nitrogênio molecular (N_2). Apesar de sua elevada concentração, nem todo este nitrogênio está prontamente disponível para as plantas. O processo de conversão do nitrogênio molecular em amônia (NH_3) e nitrato (NO_3^-) é denominado de fixação do nitrogênio, e pode ocorrer tanto por meio industrial quanto naturalmente.

c) Fixação industrial de N

O processo industrial de fixação de nitrogênio é o ponto de partida para a produção de fertilizantes nitrogenados. A molécula de N_2 é composta por dois átomos de nitrogênio ligados por ligação covalente tripla ($\text{N}\equiv\text{N}$) e para que se supere esta interação grande quantidade de energia é necessária. Para a conversão de N_2 em NH_3 é necessário submeter o N_2 a altas temperaturas (aproximadamente 200°C) e à alta pressão (em torno de 200 atm.), juntamente com um metal catalisador (geralmente ferro), para que a tripla ligação covalente seja quebrada e o N possa se ligar a três átomos de hidrogênio, formando amônia.

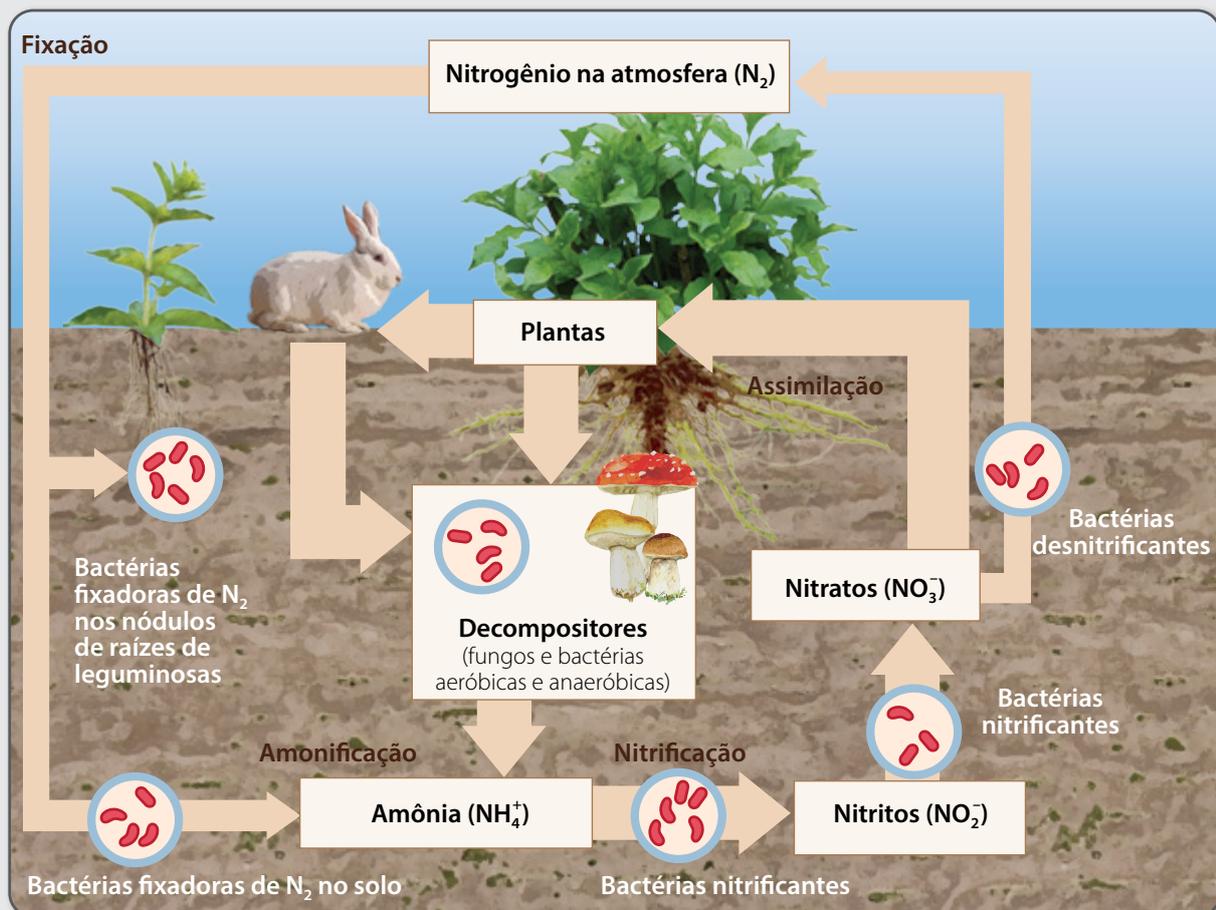
d) Fixação natural de N

Por outro lado, existem três processos naturais de fixação de N_2 , os relâmpagos, as reações fotoquímicas e a fixação biológica. Os relâmpagos são responsáveis por cerca de 8% do N fixado. Nesse processo o N_2 é convertido em ácido nítrico (HNO_3), que é precipitado no solo através das chuvas. Enquanto nas reações fotoquímicas, o nitrogênio é fixado pelas reações do óxido nítrico gasoso (NO) com o ozônio (O_3), formando ácido nítrico, que corresponde a 2% do N fixado. E para a fixação biológica, que corresponde a 90% de todo o nitrogênio fixado naturalmente, bactérias ou algas azuis convertem N_2 em amônia (NH_3), que, quando dissolvida na água, forma amônio (NH_4^+), deixando o nitrogênio disponível para as plantas.

e) Ciclo do N

Após o processo de conversão do nitrogênio em amônio ou nitrato inicia-se o chamado ciclo do N, passando por várias formas orgânicas e inorgânicas até finalmente retornar a nitrogênio molecular. Após a fixação do N_2 de forma industrial ou natural, os íons NH_4^+ (amonificação) e NO_3^- (nitrificação) podem ser absorvidos pelas raízes das plantas ou imobilizados pelos micro-organismos do solo. Os animais herbívoros comem as plantas para obter nitrogênio, enquanto os animais carnívoros comem os animais para obtê-lo. Todos os resíduos originários da morte de organismos vivos ou fezes de animais contribuem para a composição da matéria orgânica do solo, por meio de sua decomposição. A matéria orgânica pode ser decomposta por micro-organismos para produzir NH_4^+ , via amonificação, ou em condições anaeróbicas, micro-organismos específicos convertem o NO_3^- em N_2 , via desnitrificação. O NO_3^- pode ser dissolvido na água subterrânea por meio da lixiviação e o NH_4^+ pode ser convertido na forma gasosa (NH_3) e se dissipar na atmosfera, via volatilização (Figura 4).

Figura 4 – Ciclo do nitrogênio, mostrando os processos pelos quais o nitrogênio é submetido através das plantas, solo e ação de micro-organismos.



Fonte: Adaptado de Gallo; Basso, 2013.

f) Dinâmica do N no solo

Mineralização e imobilização

A maior parte do nitrogênio presente no solo é constituinte da matéria orgânica. A mineralização da matéria orgânica, e conseqüentemente a liberação do nitrogênio, é a principal fonte de N para as plantas em muitos sistemas agrícolas. A mineralização do nitrogênio pode ser definida como a transformação de N da forma orgânica para a forma inorgânica (NH_4^+ e NO_3^-). Esse processo é realizado por micro-organismos heterotróficos do solo que usam compostos orgânicos como fonte de energia. Essa mineralização geralmente resulta em aumento do pH do meio em que ocorre. Contrária à mineralização ocorre a imobilização do nitrogênio. Esse processo corresponde à transformação do nitrogênio inorgânico em nitrogênio orgânico. A imobilização ocorre por meio da incorporação de N inorgânico nas células de micro-organismos, que ao morrerem, o N poderá voltar a ser mineralizado ou formar compostos complexos que futuramente constituirão a matéria orgânica do solo.

A relação C/N (carbono/nitrogênio) regula a direção em que mineralização e a imobilização ocorrem. A condição de equilíbrio, em que a imobilização é aproximadamente igual à mineralização, ocorre quando a relação C/N dos resíduos está na faixa de 25 a 30 e, nesse caso, a disponibilidade do N inorgânico do solo não é afetada. No entanto, a adição de resíduos orgânicos com baixa concentração de N, como resíduos de gramíneas (C/N de 50 ou mais) faz com que os micro-organismos do solo tenham que recorrer ao N inorgânico disponível no solo, para sustentar o crescimento de sua população e com isso o processo de imobilização predomina. Nesse caso as plantas podem apresentar deficiência de nitrogênio, visto que os micro-organismos tendem a ser mais competitivos.

Nitrificação

A nitrificação é tida como uma seqüência da mineralização e pode ser definida como a conversão do N amoniacal (NH_4^+) em nitrato (NO_3^-). Esse processo ocorre em duas etapas e é dependente da ação de bactérias presentes no solo. A primeira etapa consiste na oxidação do NH_4^+ para formar nitrito (NO_2^-) e ocorre devido a atividade das bactérias nitrificadoras pertencentes ao gênero *Nitrosomonas*. A segunda etapa o NO_2^- é oxidado a NO_3^- por bactérias do gênero *Nitrobacter*.

A nitrificação envolve transferência de elétrons e liberação de íons H^+ , o que contribui para a acidificação dos solos agrícolas, especialmente os adubados com fertilizantes nitrogenados amoniacais.

Desnitrificação

A desnitrificação é um processo que acontece na ausência de oxigênio (O_2), em que o nitrogênio (NO_3^-) atua comoceptor final de elétrons. Este processo é realizado por uma série de espécies bacterianas que são capazes de usar o NO_3^- como receptor de elétrons na ausência de O_2 . A desnitrificação consome H^+ o que alcaliniza o meio, revertendo parte da acidez gerada pela nitrificação.

As bactérias que realizam a desnitrificação são ativas apenas na ausência de O_2 , dessa forma as perdas de N na forma de N_2 ou N_2O só ocorrem em solos inundados ou meios de cultivo saturados com água.

Fixação biológica de nitrogênio

A fixação biológica de nitrogênio consiste na absorção de N na forma de N_2 por meio de micro-organismos. Esses micro-organismos são normalmente bactérias, que podem ser de vida livre ou estabelecem uma relação de simbiose com as plantas. A maior parte dessas bactérias vive no solo e é independente. Poucas são as bactérias capazes de estabelecer uma associação simbiótica com as plantas, em que o micro-organismo fornece diretamente o N fixado à hospedeira em troca de outros nutrientes e carboidratos.

O tipo mais comum de fixação biológica é a que ocorre entre as plantas da família *Fabaceae*, conhecidas popularmente como leguminosas e bactérias denominadas de rizóbios. Os micro-organismos que estabelecem essa associação simbiótica com as plantas fixam o N_2 e o convertem em substâncias chamadas ureídes, que são translocadas das raízes das plantas para a parte aérea, onde são convertidas em aminoácidos ou outros compostos necessários ao metabolismo vegetal.

A relação entre o microrganismo e as raízes da planta se dá pela formação de uma estrutura, denominada de nódulo, no qual as bactérias se instalam. A formação do nódulo é iniciada com o processo de infecção das raízes pelas bactérias fixadoras de nitrogênio. As bactérias presentes no nódulo fixam nitrogênio que é utilizado no metabolismo vegetal, em troca as plantas fornecem açúcares e nutrientes que são utilizados para a sobrevivência das mesmas.

Lixiviação e volatilização

Os processos de lixiviação e volatilização são as principais causas de perdas de N em solos agrícolas. A lixiviação consiste no movimento descendente de NO_3^- no perfil do solo, levando-o às águas subterrâneas (lençol freático). Enquanto a volatilização é descrita como a perda de N na forma de gás amônia (NH_3) para a atmosfera. A lixiviação ocorre porque o NO_3^- apresenta baixa interação química com os minerais do solo, fazendo com que esse ânion percole no perfil do solo. A volatilização ocorre pela formação de NH_3 devido ao aumento do pH do meio ($pH > 7$ ou alcalino). Além disso, o poder tampão da acidez do solo está diretamente relacionado com as alterações de pH. Solos com maior poder tampão apresentam maior resistência à variação do pH e consequentemente tem menores perdas por volatilização. O poder tampão é dependente de outras características dos solos, como a CTC (capacidade de troca de cátions), a textura do solo e o teor de matéria orgânica. Um dos principais fertilizantes nitrogenados que sofre perda de N por volatilização é a ureia [$CO(NH_2)_2$]. Quando aplicada ao solo, a ureia passa por hidrólise enzimática, pela urease, liberando N amoniacal. O N amoniacal pode ser convertido em NH_3 ou permanecer como NH_4^+ , em função do pH do meio. Quando o pH se encontra alcalino ($\geq 6,3$), a reação de conversão de N amoniacal em NH_3 é favorecida, provocando perda por volatilização. Por outro lado, em pH ácido ($< 6,3$), a permanência de íons amônio no solo é favorecida. No entanto, estudos

mostram que mesmo em solos ácidos, quando a ureia é aplicada na superfície do solo ocorre perda de N por volatilização. Dessa forma, para reduzir essas perdas é necessário que se faça a incorporação do fertilizante no solo.

Problemas de perdas por volatilização, também podem ser evitados utilizando-se outras fontes de nitrogênio, como os nitratos e sulfatos, desde que sejam observadas as condições de aplicação e dosagens. Os nitratos são, em geral, a forma preferencialmente absorvida pelas plantas, não necessitando ser transformado, como o caso da ureia, por isso as perdas por volatilização dos nitratos são desprezíveis. Contudo, deve-se ficar atento, pois em altas dosagens, geralmente quando se faz uso de resíduos como fonte de fertilizantes, podem ser geradas perdas por lixiviação. Enquanto os sulfatos, fertilizantes que possuem enxofre em sua composição, não são perdidos por volatilização, pois o N está na forma amoniacal, não necessitando ser transformado para ser absorvido. Entretanto, sucessivas aplicações ocasionam a acidificação do solo, e conseqüentemente o desequilíbrio de nutrientes.

g) Absorção, transporte e redistribuição de N nas plantas

As raízes vegetais absorvem duas formas de nitrogênio, o nitrato (NO_3^-) e o amônio (NH_4^+). Em condições normais de aeração do solo o nitrato é a principal forma absorvida. O NO_3^- é absorvido pelas raízes e translocado pelo xilema até a parte aérea, onde é, preferencialmente, assimilado nas folhas. Enquanto o NH_4^+ é absorvido e assimilado nas células das raízes, sendo translocado para as outras partes da planta os compostos nitrogenados já formados. A redistribuição do nitrogênio para os outros órgãos da planta é predominantemente via floema, na forma de aminoácidos. Esse processo é essencial para suprir os outros tecidos que não participam da assimilação do NO_3^- ou do NH_4^+ .

O nitrato apresenta sinergia com cátions, ou seja, elementos de cargas positivas. Quando ocorre a absorção do nitrato, que tem carga negativa, pela planta, ocorre também a absorção de íons de cargas positivas, como cálcio, potássio, magnésio, presentes na solução do solo. Por outro lado, o amônio, que tem carga positiva, apresenta sinergia com ânions, elementos que possuem carga negativa. Sendo assim, quando o amônio é absorvido pelas plantas, também ocorre a absorção de íons de carga negativa, como o enxofre e o fósforo disponíveis na solução do solo.

Para evitar problemas de perdas com volatilização, podem ser usadas outras fontes como os nitratos e sulfatos, desde que observada as condições de aplicação e dosagens.

h) Sintomas de deficiência de N

O nitrogênio é considerado um elemento de alta mobilidade, sendo absorvido nas raízes e translocado para todas as partes da planta. A baixa disponibilidade de nitrogênio torna as folhas mais velhas amareladas. Esse processo ocorre devido a essa elevada mobilidade do nitrogênio, das folhas mais velhas para as folhas novas. Dessa forma, as folhas velhas se tornam amareladas (Figura 5), caso a deficiência persista, essas folhas tornam-se necróticas e sofrem abscisão (Figura 6a). Além disso, o baixo fornecimento de nitrogênio restringe o crescimento de todos os órgãos das plantas (raízes, caule, folhas, flores e frutos, inclusive as sementes) (Figura 6b).

Figura 5 – Deficiência de nitrogênio em folhas de pepino (*Cucumis sativus*) mostrando amarelecimento.



Fonte: Holmes, 1999.

Figura 6 – Deficiência de nitrogênio em espinafre da Nova Zelândia (*Tetragonia expansa*). Clorose nas folhas mais velhas (a). Planta sem deficiência de N (esquerda), planta com deficiência de nitrogênio apresentando crescimento do sistema radicular e da parte aérea reduzidos (direita) (b). Folhas mais velhas ficam amareladas.



Fonte: Mello, 2010.

Os sintomas de deficiência de N nem sempre seguem tal padrão, pois em plantas da família *Brassicaceae*, como a couve, o brócolis e o repolho, a deficiência de nitrogênio se manifesta através da coloração púrpura das folhas mais velhas (Figura 7).

Figura 7 – Planta de repolho (*Brassica oleracea* var. *capitata*) com deficiência de nitrogênio, apresentando folhas mais velhas de coloração púrpura.



Fonte: Mello, 2010.

i) Sintomas de excesso de N e alterações na qualidade dos vegetais

A aplicação excessiva de nitrogênio também é prejudicial ao desenvolvimento das plantas. De modo geral, o excesso de N é refletido em maior crescimento vegetativo, tornando a planta mais sensível à falta de água e ao ataque de pragas e doenças. Em frutos de tomateiro, o excesso de N também provoca retardamento da maturação e aparecimento de podridão apical, frutos ocos e com ombro verde.

Além disso, em plantas de tomate, a toxicidade pelo excesso de N caracteriza-se por lesões no caule, semelhantes às de outras espécies da família Solanácea. As folhas desenvolvem a aparência de concha. O tomateiro desenvolve lesões marrom-escuras na superfície do caule, principalmente com a adubação com sulfato de amônio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$. As folhas apresentam necroses, clorose e epinastia, em consequência da toxicidade por N-NH_4 . A epinastia ocorre devido à elevada síntese de etileno, desencadeada pelo excesso de NH_4^+ nos tecidos.

Além dos problemas relacionados ao cultivo, o excesso de N, pode gerar a síntese de compostos potencialmente tóxicos, como o nitrato. O acúmulo de nitrato, principalmente nas nervuras das folhas, tem recebido atenção nos últimos anos, devido a sua relação com a methemoglobinemia em bebês. Além disso, o suprimento de N está relacionado à síntese de uma série de compostos, que em excesso podem ser tóxicos aos seres humanos, como por exemplo, alcaloides, glucosinolatos e cianogênicos. De um modo geral, esses compostos estão presentes em baixas quantidades, o que é seguro para o consumo humano. No entanto, a adubação nitrogenada excessiva pode afetar a concentração desses compostos.

4.2 FÓSFORO (P)

a) Função do P nas plantas

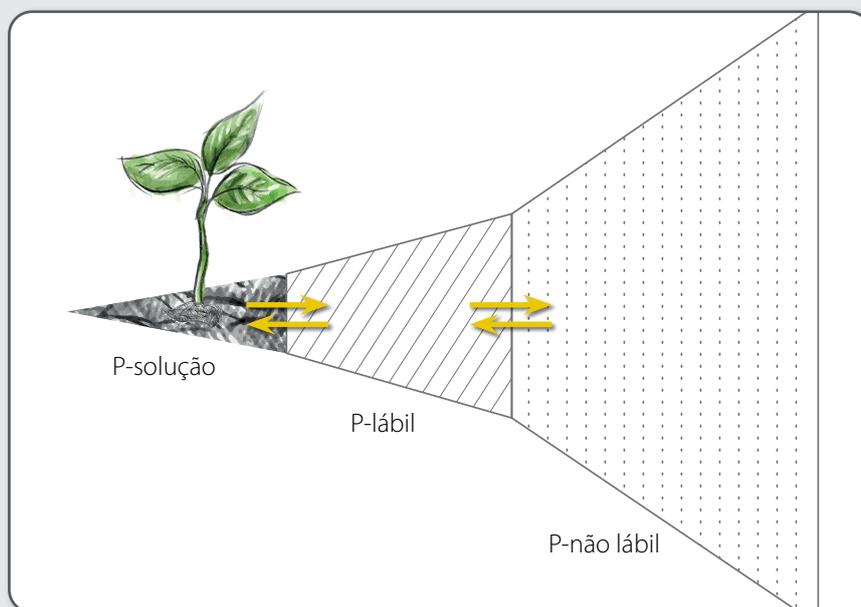
O fósforo participa de uma série de processos metabólicos nas plantas, como a transferência de energia, na forma de ATP (adenosina trifosfato), síntese de ácidos nucleicos (DNA e RNA), respiração, síntese e estabilidade de membranas, ativação e desativação enzimática, metabolismo dos carboidratos e fixação biológica do nitrogênio.

b) Dinâmica do P no solo

A dinâmica do fósforo no solo é complexa, devido aos mecanismos de fixação. De um modo geral, o fósforo adicionado ao solo, por meio de fertilizantes, tende a ficar indisponível para as plantas em um curto espaço de tempo, tornando-se novamente disponível aos poucos. Por exemplo, estudos demonstraram que mais de 90% do fósforo adicionado por meio de fertilizantes, frequentemente está adsorvido na primeira hora de contato com as partículas do solo. Além disso, verificou-se que em um ano após a aplicação de superfosfato simples, 58% do fósforo aplicado encontrava-se disponível para as plantas, 38% estava disponível após 2 anos e 20% após três anos da aplicação.

A disponibilidade de fósforo é regida pela relação entre o fósforo presente na solução do solo (P-solução), o fósforo em equilíbrio com a solução do solo (P-lábil) estando prontamente disponível, e o fósforo absorvido pelos minerais do solo (P-não lábil) (Figura 8).

Figura 8 – Dinâmica da disponibilidade de P no solo. P-solução, P-lábil e P-não lábil, em suas proporções.



Fonte: Sincronia design.

c) P na solução do solo (P-solução)

As concentrações de P na solução do solo são usualmente muito baixas, pois a maior parte do fósforo adicionado é retida nas partículas do solo, tornando-o indisponível para a absorção imediata pelas plantas. Em solos ácidos, com $\text{pH} < 2,0$ a forma predominante é o H_3PO_4 e a medida

que o pH aumenta até em torno de 6 a forma predominante é o H_2PO_4^- . Em solos alcalinos, com pH entre 7 e 12 as formas predominantes são o HPO_4^{2-} e o PO_4^{3-} . As formas H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} são absorvidas pelas plantas, daí se tem a importância em manter o pH do solo próximo a neutralidade.

Outro fator que interfere na disponibilidade de fósforo na solução do solo é a adição de fertilizantes. A reatividade de fertilizantes fosfatados é muito variável, pois existem fertilizantes que apresentam baixa reatividade, levando mais tempo para liberarem fósforo na solução do solo, como o fosfato de Arad (Israel) e o fosfato de Araxá (Brasil), e fertilizantes fosfatados de alta reatividade, o que os torna prontamente disponível na solução do solo, mesmo que por um curto período, o que pode interferir na absorção de outros nutrientes.

d) P-trocável ou P-lábil

Quando o P presente na solução do solo apresenta baixos níveis, devido a absorção pelas plantas, o P-lábil repõe parcialmente o P-solução. Dessa forma, o P-lábil é a fração de P presente no solo que atua como um estoque de fósforo, convertendo-se em P prontamente disponível para as plantas quando necessário. A manutenção conversão de P-lábil em P-solução é dependente do tipo de solo e da adição de fertilizantes. A resistência do solo em alterar o P-lábil em função do P-solução, e vice-versa, é denominada de poder tampão de P do solo. Essa característica permite ao solo um mecanismo de que regula o sistema, controlando tanto excessos como carências, dentro de limites próprios de cada tipo de solo. Dessa forma, em solos cuja concentração de P é escassa (solos tropicais e bastante intemperizados), o solo apresenta mecanismos de conservação bastante efetivos, transformando o P-lábil em P-não lábil.

e) P adsorvido ou P-não lábil

A aplicação de uma fonte solúvel no solo tem, frequentemente, mais 90% do P adsorvido na primeira hora de contato com o solo. Esse fósforo adsorvido na superfície dos minerais do solo, e que não se encontra em equilíbrio com a solução do solo, em um curto espaço de tempo, é chamado de P-não lábil. O P-não lábil é formado por meio da conversão de fósforo em equilíbrio com o P-solução do solo (P-lábil) para fósforo adsorvido. A retenção de solo, em forma P-lábil ou P-não lábil, ocorre tanto pela precipitação do P em solução com formas iônicas de Fe e Al, como, principalmente pela sua adsorção pelos oxidróxidos de Fe e Al, presentes de modo geral em solos tropicais, ácidos, intemperizados, geralmente argilosos.

A adição de fertilizantes tende a aumentar a concentração de P-lábil do solo, pois torna a solução do solo saturada por P. O excesso de P é adsorvido pelos minerais do solo, devido à capacidade tampão de P, tornando o fósforo indisponível para as plantas, por um período de tempo. No entanto, a adsorção de fósforo é um processo reversível. Com o passar do tempo, parte do P-não lábil tende a se tornar-se P-lábil e posteriormente P-solução, tornando-se disponível para a absorção pelas plantas. Estudos mostram que a disponibilidade P tende a aumentar com o passar do tempo, por meio da redução do residual, sendo que no decorrer de 5 anos, o residual diminui gradativamente de 60% para 45%, 35%, 15% e 5%, respectivamente. Dessa forma, o residual de fósforo, pode ser disponibilizado gradativamente para as plantas.

f) Absorção, transporte e redistribuição de P nas plantas

A absorção de P pelas plantas é dependente de uma série de fatores, como o pH do solo, a distribuição do sistema radicular das plantas e a interação do fósforo com outros nutrientes presentes no meio.

O fósforo é considerado um nutriente pouco móvel no solo, o que torna necessário que o sistema radicular intercepte o P dissolvido na solução para que as plantas possam absorvê-lo. Dessa forma, plantas que apresentam sistemas radiculares mais extensos e com maior área de contato entre as raízes e o solo usualmente apresentam maior taxa de absorção de P. O crescimento contínuo do sistema radicular de plantas que apresentam crescimento rápido é essencial para que estas possam explorar novos volumes de solo, onde o fósforo da solução não foi totalmente exaurido.

A principal forma de P absorvida pelas plantas é o H_2PO_4^- , mesmo que as plantas também possam absorver HPO_4^{2-} . Dessa forma, tem-se que o pH do solo em que a planta apresenta maior absorção de P é de 4,5 a 6,0, no qual a forma de H_2PO_4^- é predominante. Após a absorção pelo sistema radicular, o fósforo é translocado para outras partes do vegetal, pelo xilema e pelo floema. Sendo considerado um nutriente de alta mobilidade no floema, seu padrão de redistribuição é definido pelo movimento e demanda de carboidratos dentro da planta.

g) Associação de P com micro-organismos

A presença de micro-organismos na rizosfera desempenha papel fundamental na disponibilidade de P para as plantas. A associação das plantas com micorrizas e a solubilização microbiana de P por bactérias são os mecanismos mais comuns.

No processo de associação simbiótica com as micorrizas, as plantas fornecem carboidratos para estes micro-organismos enquanto as micorrizas fornecem às plantas parte dos nutrientes absorvidos. Essa associação permite que as plantas aumentem sua área de contato radicular com a superfície do solo, o que otimiza o processo de absorção de nutrientes pouco móveis no solo, como o fósforo. Além disso, as micorrizas são capazes de absorver formas de P que estão indisponíveis para a absorção direta pelas raízes. Dessa forma, os micro-organismos solubilizadores de fósforo desempenham papel importante na mineralização de formas orgânicas de P.

Além disso, a associação simbiótica com as micorrizas traz outros benefícios para as plantas, como a supressão de patógenos radiculares e o aumento da absorção de água pelas plantas. A proteção das raízes contra o ataque de fungos ocorre principalmente, por meio de três mecanismos: 1) competição por locais de colonização entre os patógenos e as micorrizas; 2) ativação do sistema de defesa da planta através da colonização das raízes pelas micorrizas; e 3) a melhora do estado nutricional da planta, promovida pela relação simbiótica entre as plantas e micorrizas, o que aumenta a capacidade das plantas em compensar possíveis perdas, devido à incidência de certas doenças, tornando a planta mais tolerante ao ataque desses patógenos. Enquanto a absorção de água é

direta ou indiretamente influenciada pela associação com micorrizas. Dessa forma, a absorção de água pode ser favorecida em plantas, nas quais essas associações ocorrem devido à maior área superficial do sistema radicular, que permite maior contato com a água, assim como pelo maior diâmetro de raízes, que permite captação de maior quantidade de água em maior velocidade. Os benefícios da captação de água e nutrientes decorrentes da associação simbiótica com micorrizas conferem à planta maior capacidade superar condições de estresses bióticos e abióticos.

h) Interação do P com outros nutrientes

O fósforo pode apresentar relação de sinergismo ou competição com alguns nutrientes. A relação entre o fósforo e o nitrogênio é tida como uma relação de sinergismo, quando ambos estão presentes em concentrações adequadas na solução do solo. No entanto, a deficiência de fósforo interfere diretamente na absorção de nitrogênio, e também na conversão do nitrogênio absorvido em aminoácidos, uma vez que esses processos requerem energia, na forma de adenosina trifosfato (ATP) para acontecer. Além disso, em caso de deficiência de fósforo, a fixação biológica do nitrogênio é prejudicada, pois esse processo também é dependente da disponibilidade de ATP, que é reduzida em caso de deficiência de P.

i) Sintomas de deficiência de P

A deficiência de fósforo tem como primeiros sintomas o aparecimento de folhagens verde-escuras ou azul-esverdeadas. Além disso, a deficiência pode ser notada pela redução do crescimento da planta como um todo (Figura 9a). No entanto, para algumas plantas, pode-se observar coloração verde escura nas folhas mais velhas e para outras plantas coloração avermelhada, devido ao acúmulo de antocianinas (Figura 9b).

Figura 9 – Comparação de planta de repolho (*Brassica oleracea* var. *capitata*), sem deficiência de fósforo (esquerda) e com deficiência (direita), apresentando crescimento reduzido (a). Folhas de salsa sem sintoma e com sintoma de deficiência de fósforo (coloração púrpura das bordas das folhas) (b).



Fonte: Mello, 2010.

j) Sintomas de excesso de P e alteração na qualidade dos vegetais

A toxicidade por excesso de P nas plantas é rara, mas quando ocorre pode ser identificada pela observação de concentrações de P no tecido maior do que 10 mg g^{-1} de massa seca. A ocorrência de toxicidade por fósforo é dificilmente observada, uma vez que as plantas têm a capacidade de manter o equilíbrio de absorção de P pelas raízes e a metabolização do mesmo para o crescimento. No entanto, em plantas que apresentam sensibilidade ao excesso de adubação com P, como a ervilha d'angola e a grama preta, concentrações superiores a $3-7 \text{ mg g}^{-1}$ de massa seca, apresentam-se limitantes. Além disso, em tomate a combinação de altos níveis de P e baixos de K pode diminuir o problema de frutos que amadurecem irregularmente (frutos manchados, cerosos, com fundo verde). Contudo, se o equilíbrio entre esses dois nutrientes não for respeitado, tendo-se apenas doses elevadas de P, ocorrerá o aumento do número de frutos manchados, cerosos e redução do número de frutos de fundo verde.

4.3 POTÁSSIO (K)

a) Funções do K nas plantas

O potássio (K) é requerido em uma série de processos metabólicos, entre os quais se destacam a abertura e fechamento estomático, a manutenção do pH da célula (pH em torno de 7) e turgor celular. Além disso, o potássio é requerido como cofator de mais de 50 enzimas e está diretamente relacionado com o processo fotossintético, atuando na regulação enzimática, na integridade estrutural dos plastídios e na abertura e fechamento dos estômatos; favorece o transporte de carboidratos; incrementa a absorção de nitrogênio e a síntese de proteínas.

A nutrição adequada com potássio apresenta uma série de benefícios para as plantas, como o incremento no crescimento das raízes, aumento de resistência a baixas temperaturas e à seca, aumento da resistência às doenças e ao ataque de pragas, aumento da resistência ao acamamento, e em plantas que apresentam fixação biológica de nitrogênio, o potássio promove incremento na formação dos nódulos das raízes.

Além disso, o potássio promove aumento do teor de proteínas e amido dos grãos, melhora a coloração e aroma de frutos, assim como o teor de vitamina C. Também apresenta efeito positivo no armazenamento de produtos agrícolas, como a batata, tomate, cebola, banana, além de ter efeito na redução de desordens fisiológicas que podem afetar a qualidade dos frutos.

b) Formas de K no solo

Potássio estrutural

É a forma em que a maioria do potássio está presente no solo. Nessa forma o potássio é constituinte dos minerais do solo. O potássio presente nesses minerais só é liberado na solução do solo quando estes são intemperizados. O intemperismo dos minerais é um processo lento, incapaz de liberar potássio suficiente para suprir a necessidade das plantas. A fração de potássio que está nessa forma não aparece nos resultados de análise de solo.

Potássio trocável

Encontra-se ligado às cargas negativas das superfícies dos minerais e matéria orgânica do solo. Essa é a principal forma de potássio que repõe o K^+ da solução do solo, na medida em que este

é absorvido pelas plantas. O potássio trocável representa uma reserva de K^+ imediata para absorção pelas plantas.

Potássio na solução do solo

A solução do solo é constituída de elementos minerais e orgânicos que nela estão dissolvidos. As formas minerais presentes na solução do solo são as prontamente disponíveis para a absorção das plantas. A manutenção de íons K^+ na solução do solo é realizada pelo equilíbrio entre o K^+ já presente na solução do solo e o K^+ trocável.

O potássio presente na solução do solo está sujeito a perdas por lixiviação. Este consiste no movimento vertical dos íons K^+ para camadas abaixo daquelas exploradas pelo sistema radicular da cultura. A lixiviação é dependente de elevada concentração de K^+ na solução do solo e geralmente é aumentada pela adição excessiva de fertilizantes potássicos.

Potássio não trocável e potássio fixado

O potássio não trocável é descrito como parte do K estrutural que se dissolve facilmente em meio ácido e o potássio presente entre as camadas de minerais de argila do tipo 2:1, que pode ser facilmente removido. O potássio não trocável pode apresentar contribuição significativa para o aumento da concentração de K^+ na solução do solo, quando a quantidade de potássio trocável é baixa em solos com predominância de minerais 2:1. Além disso, em solos com predominância de minerais 2:1, o potássio das entrecamadas, também pode estar presente na forma fixada, ou seja, não contribui para o aumento da concentração de K^+ na solução do solo, uma vez que somente será liberado caso seja substituído por outro cátion. A substituição do potássio fixado ocorre apenas em condições extremas de baixas concentrações de K^+ na solução do solo, o que permite a entrada de outros íons na entrecamada dos argilo minerais 2:1.

c) Absorção, transporte e acúmulo de K

A principal forma de potássio absorvida da solução do solo pelas plantas é na forma iônica, K^+ . Para que se tenha sucesso na absorção de potássio é necessário contato da superfície radicular com o nutriente. Os mecanismos de transporte do potássio da solução do solo até o sistema radicular são por difusão e fluxo de massa. A difusão ocorre principalmente na rizosfera, região de solo e solução do solo próxima às raízes das plantas. O processo de difusão ocorre em resposta a um gradiente de diferença de concentração entre o K presente na rizosfera e o da superfície radicular. Enquanto o fluxo de massa é dependente da quantidade de água transpirada pela planta e do teor de K na solução do solo.

O potássio é um elemento de alta mobilidade na planta. Apresenta alta mobilidade intracelular e nos tecidos, transloucando-se dos mais velhos para os mais novos, e no caso de transporte de longa distância via xilema e floema. Os órgãos preferencialmente supridos pelo K transportado pelo floema são as folhas novas, os frutos secos e as regiões de crescimento.

A necessidade de potássio para o ótimo crescimento das plantas situa-se na faixa de 20 a 50 gramas por quilo de massa seca do tecido vegetal. Contudo, a planta tem a capacidade de absorver quantidades superiores de potássio, o que é comumente chamado de “consumo de luxo”.

d) Interação do K com outros nutrientes

Não há relatos do efeito tóxico de potássio às plantas causado diretamente por meio de excesso de aplicação de K, via adubação. No entanto, altas concentrações desse elemento podem interferir positiva ou negativamente na absorção de outros nutrientes. Por exemplo, o elevado nível de K no meio aumenta a taxa de absorção de NO_3^- e pode inibir a absorção de cálcio, magnésio e NH_4^+ .

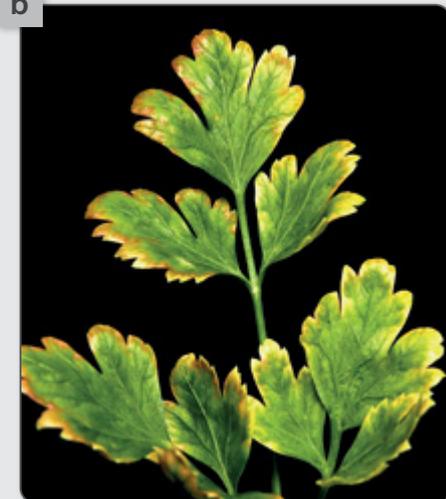
O efeito negativo de elevadas concentrações de potássio em relação aos íons cálcio, magnésio e NH_4^+ se dá porque estes apresentam o mesmo sítio de absorção nas plantas. Dessa forma, a absorção elevada de um desses íons representa a menor absorção do outro. Um exemplo clássico em que a concentração de K apresenta efeito negativo na absorção de outro íon é a relação de antagonismo entre o K e o magnésio, em que o aumento de potássio na solução do solo tem efeito depressivo na absorção de magnésio.

e) Sintomas de deficiência de K

Com a ocorrência de falta de K^+ disponível para as plantas, o K^+ presente nas folhas mais velhas é mobilizado para as folhas jovens e regiões meristemáticas. Esse processo leva à clorose marginal em folhas mais velhas, o que pode evoluir para necrose do tecido, caracterizando o sintoma mais comum de deficiência de K^+ nos vegetais (Figura 10).

Adicionalmente, o sintoma de deficiência de K^+ também pode ser visualizado como a redução do crescimento das plantas, uma vez que o potássio está diretamente envolvido nos processos de geração de energia (respiração e fotossíntese) essenciais para o desenvolvimento vegetal. Além disso, a deficiência de potássio está relacionada com o turgor celular, ou seja, a falta desse nutriente interfere na absorção e eficiência de uso da água. Em caso extremo de deficiência de potássio ocorre a síntese de compostos tóxicos, o que leva à morte celular.

Figura 10 – Deficiência de potássio em salsa (*Petroselinum crispum*). (a) Ocorrência de amarelecimento das margens das folhas. (b) Amarelecimento da margem e das pontas das folhas mais velhas, com pigmentação púrpura.



Fonte: Mello, 2010.

Alguns vegetais podem apresentar particularidades em relação aos sintomas de deficiência de potássio. Em tomate (*Lycopersicon esculentum*) o fornecimento insuficiente de potássio para os frutos pode acarretar em um distúrbio de maturação, ocasionando a formação do ombro amarelo. As manchas nos frutos podem ser observadas pela permanência da coloração verde ou amarela, assim como do enrijecimento, do tecido do fruto próximo ao pedúnculo (Figura 11).

Figura 11 – Deficiência de potássio em tomate, caracterizado pela formação de frutos com ombro amarelo.



Fonte: Mello, 2007.

f) Sintomas de excesso de K e alterações na qualidade dos vegetais

O excesso de adubação potássica também pode apresentar limitações ao cultivo de hortaliças, como por meio de efeito salino. O aumento do nível de sais solúveis na solução do solo tende a elevar a pressão osmótica e causar toxidez iônica às plantas, provocando uma gama de perturbações ao nível celular e da planta toda, que leva a um decréscimo em água e absorção de nutrientes pela planta. Essa redução na absorção de água leva as salinidades a serem chamadas de “seca osmótica”. O murchamento da planta é o fenômeno mais conhecido dos efeitos osmóticos causados pelo súbito aumento da salinidade, que reduz a absorção de água, mas não é o mais comum. Ela causa *déficit* hídrico na zona radicular provocando o aparecimento de sintoma semelhante à de uma seca.

O efeito salino por meio do excesso de adubação potássica ocorre porque o principal fertilizante utilizado como fonte de potássio, na agricultura, é o KCl. O KCl é um fertilizante com elevado teor de K (60% de K_2O , com 50% de K) e cloro (47% de Cl), que também é um nutriente para as plantas. Fertilizante com elevado índice salino como o KCl, apresenta elevada capacidade de aumentar a pressão osmótica da solução do solo, o que pode prejudicar a germinação e o crescimento inicial das plantas se aplicado muito próximo às sementes. Além disso, a elevada concentração de Cl no fertilizante KCl, pode prejudicar o desenvolvimento de algumas culturas, em caso de aplicação de doses elevadas desse fertilizante. Dessa forma, deve-se evitar a fertilização com KCl em culturas que apresentam sensibilidade ao cloro, como a batata, a batata-doce, a chicória, o tabaco e o citros.

Em caso mais severos de excesso de sais no meio de cultivo, pode se observar o surgimento de clorose e necrose, especialmente nos bordos das folhas. Esse sintoma pode ser mais facilmente observado em plantas com alta área foliar e suscetíveis ao estresse por salinidade (Figura 12).

Figura 12 – Sintomas de toxidez por salinidade em chicória (*Cichorium endivia*).



Fonte: Mello, 2010.

4.4 CÁLCIO (Ca)

a) Funções do Ca nas plantas

O cálcio (Ca) é o elemento fundamental na estrutura da célula vegetal, sendo responsável pela resistência da parede celular e manutenção da estrutura da membrana plasmática, mantendo sua permeabilidade. Também é considerado um elemento fundamental para o crescimento de regiões meristemáticas, principalmente para o funcionamento adequado de ápices radiculares.

Além disso, o cálcio atua como ativador de uma série de enzimas e como mensageiro secundário, dessa forma, a alteração de sua concentração nas células vegetais, pode atuar como sinalizador para que processos metabólicos sejam desencadeados. É responsável por regular a ação de hormônios vegetais, atuando diretamente sobre o processo germinativo, crescimento e senescência das plantas.

b) Dinâmica do Ca no solo e Interação com outros nutrientes

O cálcio é o quinto elemento mais abundante na crosta terrestre. Pode ser encontrado em rochas, gesso, concha de ostras e corais. A absorção do cálcio do solo ocorre por interceptação radicular e fluxo de massa, sendo que após sua absorção ele apresenta pouca mobilidade nos tecidos vegetais.

A absorção de cálcio pode ser reduzida quando se tem elevadas concentrações de potássio e amônio no meio de cultivo. Por outro lado, o cálcio pode auxiliar na absorção de outros nutrientes, como o molibdênio e o nitrogênio, quando fornecido às plantas por meio da fixação biológica.

c) Absorção, transporte e redistribuição de Ca nas plantas

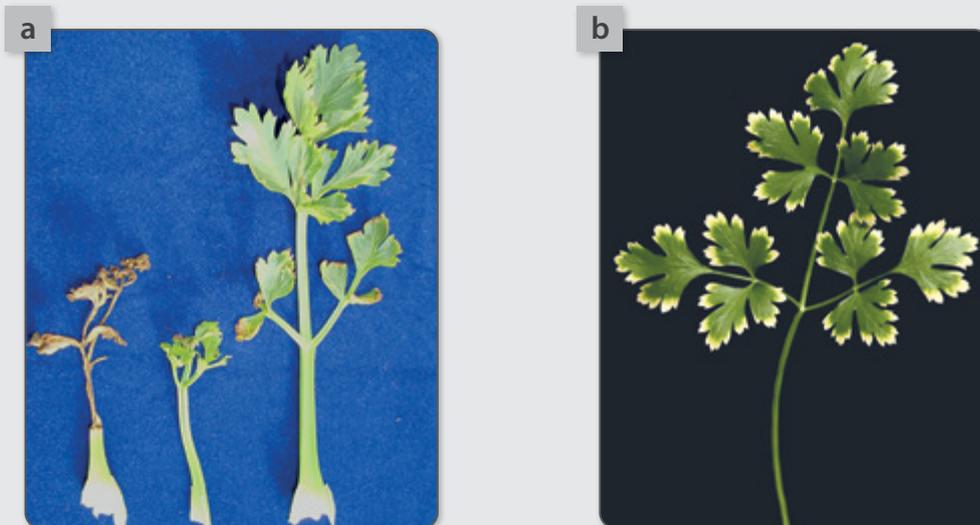
O cálcio é absorvido pelas raízes na forma de Ca^{2+} e pode ser transportado pelo xilema e em parte pelo floema. É considerado um nutriente de baixa mobilidade nas plantas, sendo que muitas das funções que desempenha no metabolismo vegetal estão relacionadas com a constituição de macromoléculas. Dessa forma, a maior parte do cálcio, presente nos tecidos das plantas, encontra-se insolúvel.

d) Sintomas de deficiência de Ca

Plantas com deficiência de cálcio, comumente apresentam crescimento radicular limitado. As raízes deficientes, geralmente, escurecem e apodrecem. Além disso, a deficiência de cálcio pode ser observada nas regiões de crescimento das plantas, como as folhas mais novas e região do meristema apical.

De um modo geral, plantas com deficiência de cálcio apresentam porção apical com coloração amarelada. O cálcio é um elemento pouco móvel na planta, dessa forma seu sintoma de deficiência tende a ser mostrado nas regiões mais jovens (Figura 13). Além disso, o transporte de cálcio ocorre quase que exclusivamente pelo xilema, sendo dependente da corrente transpiratória. Dessa forma, tecidos que apresentam maior transpiração tendem a ter maior disponibilidade de cálcio, como ocorre nas folhas de maior atividade fotossintética. Por outro lado, outros tecidos, como os frutos, não apresentam taxa transpiratória suficiente para que o cálcio seja direcionado para os mesmos em grande quantidade.

Figura 13 – (a) Deficiência de cálcio em aipo (*Apium graveolens* var. *dulce*) caracterizado pela ocorrência de necrose na margem das folhas mais jovens da planta. Com a evolução da deficiência ocorre morte da folha. (b) Deficiência de Ca em Salsa (*Petroselinum crispum*) evidenciando a ocorrência de clorose seguida de necrose na margem das folhas mais novas.



Fonte: Mello, 2010.

e) Distúrbios fisiológicos

Além dos sintomas de deficiências comuns a todas as espécies vegetais, existem alguns distúrbios fisiológicos que ocorrem devido à deficiência de cálcio ou má distribuição do mesmo no tecido vegetal, como a podridão estilar em plantas das famílias *Solanaceae* e *Cucurbitaceae*, e o *tip burn* em alface.

▪ Podridão apical

É um distúrbio fisiológico que ocorre nas plantas da família *Solanaceae*, da qual fazem parte o tomate, o pimentão, berinjela, batata etc. e *Cucurbitaceae* representada pelo melão, melancia, abóbora, pepino etc. A podridão apical caracteriza-se pelo surgimento de uma mancha negra dura e seca na extremidade apical, bem visível desde a formação dos frutos (Figura 14). Esse distúrbio fisiológico é principalmente causado pela carência de cálcio na porção apical do fruto, com o aparecimento dessa mancha ocorre a deterioração do tecido por meio da colonização do local por fungos e bactérias oportunistas.

A ocorrência da podridão apical é favorecida pela baixa mobilidade do cálcio nos tecidos vegetais. De um modo geral, o pouco cálcio translocado é movido pelo fluxo transpiratório, como os frutos apresentam menores taxas transpiratórias do que as folhas ocorrendo, de certa forma uma competição, em que uma pequena parte do cálcio é movida para os frutos. A região apical do fruto é a mais distante, principalmente em frutos alongados, o que dificulta ainda mais a chegada do cálcio nessa região, favorecendo a formação da podridão apical. Essa podridão é dependente da predisposição genética da variedade adotada, uso de solução nutritiva com excesso de sais e adubação mineral desequilibrada, provocando a competição entre os nutrientes.

Figura 14 – Sintomas de podridão apical em frutos de tomate (*Solanum lycopersicum*).



Fonte: Mello, 2007.

f) *Tip burn* ou queima-marginal

O *tip burn* ou queima marginal é o distúrbio fisiológico mais comum em alface, sendo causado pelo desequilíbrio nutricional entre cálcio e nitrogênio, pela falta de água e ocorrência de temperaturas elevadas. O *tip burn* ou requeima-marginal é caracterizado pela necrose da borda das folhas centrais da alface (Figura 15).

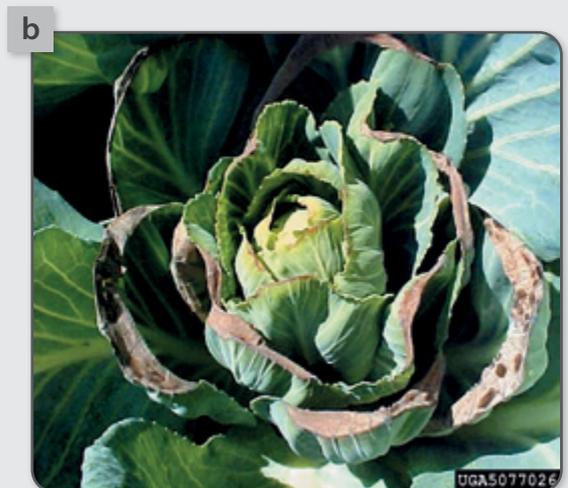
A prevenção da ocorrência de *tip burn* pode ser realizada por meio de calagem, utilização de sistema de irrigação e fornecimento de cálcio no momento do plantio ou durante o ciclo da cultura, juntamente com aplicação de nitrogênio. Além disso, a resistência ou a predisposição genética das variedades adotadas estão diretamente relacionadas à incidência desse distúrbio fisiológico.

Figura 15 – Queimadura das bordas ou *tip burn* em alface (*Lactuca sativa*) provocado pela deficiência de Ca.



Fonte: Mello, 2010 (a), Holmes, 1995 (b).

Figura 16 – Queima das bordas causado por deficiência de cálcio em folhas repolho (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.). Folhas internas (a); Queima das bordas característica, folhas deformadas e má formação da cabeça (b).



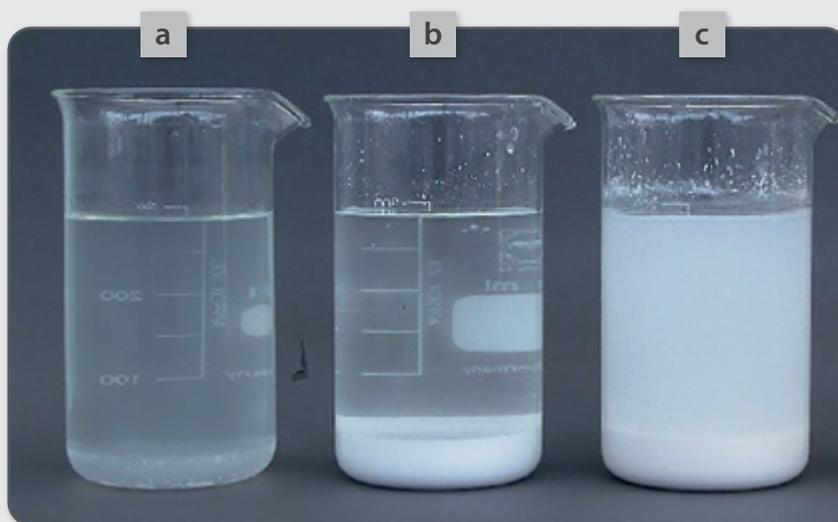
Fonte: Holmes, 2001; Langston, 2006.

g) Sintomas de excesso de Ca e alterações na qualidade dos vegetais

O excesso de Ca em alguns vegetais como o tomate, pode interferir na quantidade de licopeno presente no fruto. Estudos demonstram que há redução de 29% na concentração de licopeno quando se aumenta a concentração de Ca de 0,2 para 20 mM. Dessa forma, é indicado manter-se um nível mínimo de 13,7 mM de Ca na solução, para obter a concentração de 21,5 $\mu\text{g g}^{-1}$ de licopeno. Adicionalmente, o elevado suprimento de Ca reduz a produção e o crescimento do fruto e ramo e pode causar, ao redor do cálice e do ombro do fruto, pequenas manchas amarelas, chamados de *gold speck*. A alta umidade e excesso de adubação com Ca e P aumentam a incidência de *gold speck*, considerado um sintoma de excesso de Ca.

Devido à importância do cálcio e o ciclo curto dos vegetais, seu fornecimento precisa ser imediato por meio de uma fonte de alta solubilidade para que possa ser absorvido pela planta nos picos de maior demanda. As fontes de maior solubilidade são os nitratos de cálcio e cloretos de cálcio (Figura 15 e Tabela 2).

Figura 17 – Solubilidade de fertilizantes utilizados como fontes de Ca em água, sendo (a) Nitrato de Cálcio, altamente solúvel; (b) Gesso, de solubilidade intermediária e (c) Calcário, pouco solúvel em água.



Fonte: Yara fertilizantes.

Tabela 2 – Características dos fertilizantes utilizados como fonte de Ca.

Produto	Teor de Ca(%)	Litros de água para dissolver 1 kg
Nitrato de cálcio	19	1
Cloreto de cálcio	36	1,3
Fosfato monocálcico	16	55
Gesso	23	415
Óxido de cálcio	71	760
Fosfato dicálcico	23	3 165
Calcário	40	66 000

Fonte: Yara fertilizantes.

4.5 MAGNÉSIO (Mg)

a) Funções do Mg nas plantas

O magnésio (Mg) é constituinte de uma série de moléculas necessárias ao metabolismo vegetal, como proteínas, enzimas e clorofilas, sendo estas essenciais para a realização da fotossíntese. Adicionalmente, o magnésio está diretamente relacionado com a manutenção da estrutura do DNA e RNA e com a regulação da atividade de várias enzimas, sendo fator de quase todas as enzimas envolvidas no processo de transferência de energia via ATP (adenosina trifosfato).

b) Dinâmica do Mg no solo

A principal forma de magnésio na solução do solo e na CTC é na forma iônica Mg^{2+} . Além disso, o magnésio pode estar presente na estrutura de alguns minerais do solo. A distribuição do magnésio no solo é semelhante à do potássio, podendo ser dividido em não trocável, trocável e solúvel.

c) Mg não trocável

O Mg não trocável é encontrado principalmente em minerais primários e secundários do solo, como a biotita, ilita, olivina etc. e em carbonatos minerais, como dolomita e magnesita. Nesta forma o magnésio só é liberado na solução do solo quando esses minerais são intemperizados, cujo processo é lento, incapaz de liberar Mg suficiente para suprir a necessidade das plantas.

d) Mg trocável

O magnésio trocável é aquele que se encontra ligado às cargas negativas das superfícies dos minerais e matéria orgânica do solo, compondo a CTC. Esta é a principal forma de Mg que repõe o Mg^{2+} da solução do solo, na medida em que este é absorvido pelas plantas. O Mg trocável representa uma reserva imediata para absorção pelas plantas.

e) Mg solúvel

Os minerais presentes na solução do solo estão prontamente disponíveis para a absorção pelas plantas. A manutenção de íons Mg^{2+} na solução do solo é realizada pelo equilíbrio entre o Mg^{2+} já presente na solução e os íons da CTC (Mg^{2+} trocável).

f) Absorção, transporte e redistribuição de Mg nas plantas

A forma de magnésio absorvida pelas plantas é a forma iônica Mg^{2+} , sendo este transportado tanto pelo xilema como pelo floema. A principal forma de acesso das raízes ao magnésio é por meio de interceptação radicular e fluxo de massa. A absorção de magnésio está envolvida com suas relações com o cálcio e o potássio na solução do solo. A manutenção do equilíbrio entre esses nutrientes é essencial para a nutrição equilibrada das plantas.

O magnésio é considerado um elemento altamente móvel no floema, dessa forma, é translocado para as regiões mais novas e pontos de crescimento, fazendo com que o sintoma de deficiência se manifeste nas folhas mais velhas.

g) Sintomas de deficiência de Mg e interação com outros nutrientes

A deficiência de magnésio, devido à competição com outros cátions tem sido observada com frequência. As principais condições de solo em que a deficiência de magnésio pode ser observada são:

1. Solos ácidos;
2. Proporção de Mg da CTC menor do que 10% da soma de bases trocáveis;
3. Alto teor de potássio;
4. Relação K/Mg > 4;
5. Concentração inferior a $48,6 \text{ mg dm}^{-3}$ ($4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) de Mg no solo.

O principal sintoma de deficiência de magnésio nas plantas é a clorose internerval nas folhas da base da planta, ou seja, nas folhas mais velhas (Figura 18). Em casos mais avançados de deficiência, pode-se observar a ocorrência de um "V" verde, invertido em relação ao pecíolo. Ocorre também a redução de produtividade e, no caso de plantas perenes, alternância de safra por meio da queda das folhas. Nos frutos, pode-se observar redução de tamanho, acidez e teor de vitamina C.

Figura 18 – Ocorrência de clorose internerval em folhas mais velhas de Salsa (*Petroselinum crispum*) em decorrência de deficiência de Mg.



Fonte: Mello, 2010.

4.6 ENXOFRE (S)

a) Funções do S nas plantas

O enxofre apresenta papel fundamental na estrutura e regulação de proteínas; participa do transporte fotossintético e respiratório de elétrons, por meio de grupamentos ferro-enxofre; está presente nos sítios catalíticos de várias enzimas e coenzimas, como as ureases e a coenzima A, que contém enxofre; e é constituinte de compostos do metabolismo secundários dos vegetais, como na aliina antisséptica em alho e sulforafano anti-carcinogênio presente no brócolis.

b) Ciclo do S

O ciclo do enxofre envolve uma série de reações, por meio das quais ocorre a ciclagem do nutriente através do sistema solo-planta. A maior parte do enxofre presente nos solos está na matéria orgânica, que, por meio da degradação por micro-organismos, torna-se disponível para a absorção pelas plantas. O enxofre presente na forma de sulfato (SO_4^{2-}) na solução do solo também pode ser proveniente da degradação de rochas matrizes, que deram origem às partículas do solo

ou da atmosfera. O enxofre presente na atmosfera na forma de SO_2 ou H_2S , provenientes da queima de combustíveis fósseis, pode ser adicionado ao solo pela chuva, na forma de H_2SO_4 , principal componente danoso da chuva ácida.

O enxofre presente no solo é absorvido pelas plantas na forma de SO_4^{2-} e convertido em aminoácidos como a cisteína e a metionina. Esses aminoácidos fazem parte do metabolismo vegetal, quando ocorre a morte do tecido vegetal e sua deposição no solo, estes são a principal fonte de enxofre presente na matéria orgânica, o qual é metabolizado por micro-organismos para, novamente, se tornar disponível para as plantas.

c) Dinâmica do S no solo

A forma de enxofre, preferencialmente, absorvida pelas plantas é o SO_4^{2-} presente na solução do solo. Os principais fatores que influenciam a concentração desse composto na solução do solo são: atividade microbiana, regime hídrico, deposição atmosférica, adição de fertilizantes e absorção pelas plantas.

O enxofre presente solo pode estar em diferentes graus de disponibilidade. O SO_4^{2-} pode estar dissolvido na solução do solo, adsorvido nas partículas minerais e orgânicas, na fração denominada de S-lábil, ou estar fortemente retido nas partículas do solo ou na matéria orgânica, sendo este o S-não lábil.

d) S-lábil e S-não lábil

A fração de S-lábil é aquela que repõe o SO_4^{2-} da solução do solo em um curto espaço de tempo, mantendo um equilíbrio com a mesma. Por outro lado, a fração de S-não lábil é tida como a forma de enxofre que não está prontamente disponível na solução do solo, o que torna o S indisponível para a absorção pelas plantas.

A formação de S-não lábil pode estar relacionada com a composição dos minerais presentes no solo. Solos tropicais tendem a ter maior teor de argila e grande presença de óxidos de ferro e alumínio, o que confere aos mesmos, elevada capacidade de adsorção de SO_4^{2-} . No entanto, técnicas de manejo de fertilidade de solo, como a calagem, auxiliam na reversibilidade desse processo. O aumento do pH reduz a retenção do SO_4^{2-} nas partículas do solo, aumentando sua concentração na solução do solo, o que favorece a disponibilidade de enxofre para as plantas.

e) Absorção, transporte e redistribuição de S nas plantas

O enxofre é um dos elementos mais versáteis, seus estados de oxidação permitem que o mesmo esteja presente no metabolismo vegetal em diferentes formas. A maioria do enxofre nas células vegetais é proveniente da absorção de SO_4^{2-} pelas raízes. No entanto, as plantas também podem absorver enxofre gasoso através dos estômatos.

O SO_4^{2-} absorvido pelas raízes é translocado para as folhas, em sua maioria, via xilema. Ao chegar às folhas, o SO_4^{2-} é incorporado a esqueletos carbônicos e utilizado na síntese de aminoácidos, translocado, via floema, para todas as partes da planta.

f) Interação do S com outros nutrientes

O equilíbrio entre as concentrações dos elementos minerais é de suma importância para a absorção dos mesmos. As interações entre os nutrientes interferem diretamente na capacidade de absorção dos mesmos pelas raízes. A absorção de enxofre é prejudicada com a presença de cloro (Cl^-) quando aplicado em excesso, comumente adicionado como cloreto de potássio. Por outro lado, o enxofre e o fósforo, apresentam relação fortemente positiva, o que é chamado de sinergismo. Além do fósforo, a relação de enxofre com o nitrogênio também apresenta relação sinérgica, sendo expressa em sua maioria como aumento de produtividade.

g) Sintomas de deficiência de S

O enxofre absorvido como SO_4^{2-} pode ser fortemente retido nas folhas velhas das plantas, caracterizando o sintoma de deficiência como folhas mais jovens de coloração amarelada. Em caso de deficiência de enxofre também ocorre o acúmulo de compostos nitrogenados solúveis, como as amidas, que são encontradas em concentrações acima do normal. Além disso, o baixo teor de S nas proteínas influencia a qualidade nutricional das plantas. Em brássicas, o conteúdo de glucosinolatos e seus metabólitos voláteis tem sua concentração dependente do conteúdo de enxofre absorvido.

No tomateiro, apesar de rara, quando ocorre, a deficiência de S pode ser identificada pela presença de plantas com caule de pequeno diâmetro e não produção gemas axilares. As folhas da parte superior tornam-se verdes amareladas, com necrose roxa, havendo tendência de a planta toda tornar-se clorótica. Os folíolos novos apresentam-se pequenos e bem distanciados do ráquis. As raízes possuem menor diâmetro, praticamente sem câmbio e sem engrossamento secundário. Quando a deficiência é severa, aparecem áreas necróticas, tanto na parte inferior como na superior dos folíolos e os bordos e as pontas dos folíolos se enrolam para baixo. Pode haver produção de flores, mas elas caem prematuramente.

5 MICRONUTRIENTES

Os micronutrientes são aqueles nutrientes essenciais absorvidos em pequenas quantidades. Isso ocorre, por eles não participam da estrutura da planta, mas da constituição de enzimas e seus ativadores.

5.1 FERRO (Fe)

a) Função do Fe nas plantas

O ferro atua principalmente na ativação de determinadas enzimas, que estão diretamente envolvidas no processo respiratório, fotossintético e antioxidante do metabolismo vegetal. Uma das principais reações que o ferro catalisa é a biossíntese de clorofila.

b) Dinâmica do Fe no solo

O Fe presente no solo apresenta-se na forma di (Fe^{2+}) ou trivalente (Fe^{3+}) de acordo com o estado de oxirredução do sistema. De um modo geral, solos cultivados apresentam baixo teor de Fe, seja no complexo de troca ou na solução do solo. O ferro presente no complexo de troca é o Fe^{2+} , enquanto o Fe^{3+} está adsorvido aos colóides do solo, formando complexos com ácidos húmicos e colóides orgânicos. Em condições de alagamento a forma Fe^{2+} é predominante no solo, enquanto o Fe^{3+} aumenta com a redução do pH.

A solubilidade do ferro no solo está diretamente relacionada ao pH, apresentando maior disponibilidade em pH mais ácidos. A solubilidade do ferro é reduzida em, aproximadamente, mil vezes para cada unidade de pH que aumenta no solo, na faixa de pH entre 4,0 e 9,0. Dessa forma, na faixa de pH entre 4,0 e 6,0 tem-se maior disponibilidade de ferro.

O aumento de suprimento de Fe nas plantas pode ocorrer, também, devido à formação de complexos solúveis ou quelatos. Sendo assim, os teores de argila e de matéria orgânica também influenciam a disponibilidade de Fe para as plantas. Em solos argilosos existe uma tendência para a retenção do Fe, enquanto em solo com teores adequados de matéria orgânica, o Fe tende a ser disponibilizado, devido às características acidificantes dos ácidos húmicos da matéria orgânica e sua capacidade em formar quelatos, mesmo em condições adversas de pH, permitindo a absorção.

c) Formas de absorção, transporte e redistribuição de Fe nas plantas

O ferro é absorvido pelas plantas nas formas Fe^{2+} , Fe^{3+} ou Fe-quelato. A absorção de ferro pode ocorrer por meio de dois processos. O primeiro consiste na acidificação da rizosfera pelas raízes e consequentemente redução do Fe^{3+} para Fe^{2+} na membrana plasmática das raízes, sendo transportado para o interior da célula por um sistema específico de transporte. Esse processo de redução de ferro é essencial para que muitas plantas consigam absorver esse cátion, principalmente para as plantas dicotiledôneas. O segundo mecanismo, que ocorre em gramíneas monocotiledôneas, como a cevada, milho ou aveia, envolve a formação de sideróforos, que se complexam ao Fe^{3+} , transportando-o para o interior das células das raízes, sem que haja redução para Fe^{2+} .

d) Sintomas de deficiência de Fe

O efeito mais característico da deficiência de ferro é a incapacidade de folhas jovens em sintetizar clorofila, tornando-as amareladas e, algumas vezes, brancas. Como o ferro é considerado um elemento imóvel na planta, sua redistribuição é falha, o que está relacionado com o aparecimento de sintomas de deficiência nas folhas mais jovens e acúmulo nas folhas mais velhas e raízes.

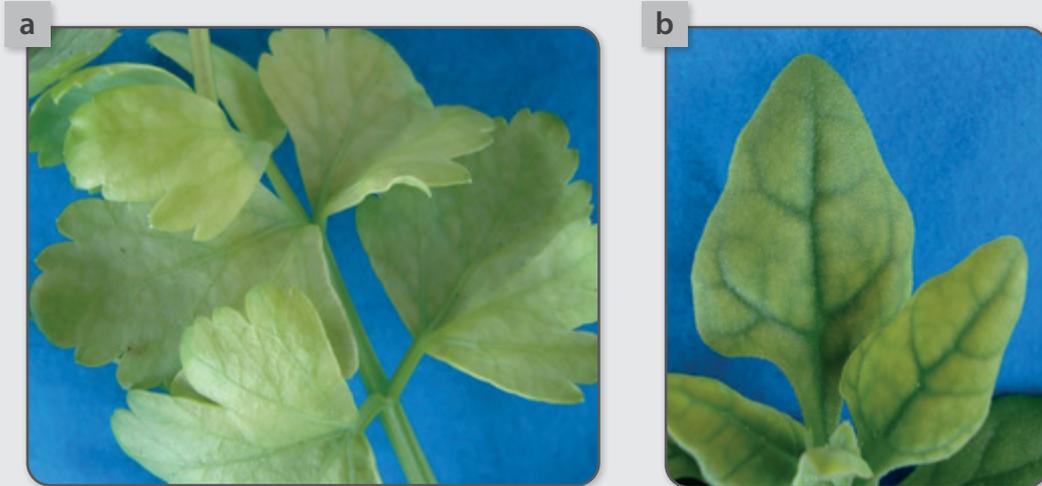
Os sintomas visuais característicos de deficiência de ferro são identificados por meio da observação de coloração verde nas folhas velhas e amarelecimento das folhas jovens (Figura 19). Com o agravamento da deficiência, observa-se clorose internerval característica, na qual somente os vasos permanecem de cor verde, contrastando com o amarelado ou esbranquiçado do limbo foliar. Em caso de deficiência forte, o amarelecimento pode ser total e aparecem zonas necróticas nas bordas das folhas. Ocorre então a queda precoce das folhas e em casos ainda mais graves a desfolha completa. Além disso, o caule e ramos das plantas permanecem finos e curvados, levando a uma redução de crescimento (Figura 20).

Figura 19 – Deficiência de ferro em tomate (*Solanum lycopersicum*) evidenciando amarelecimento das folhas mais novas.



Fonte: Holmes, 1996.

Figura 20 – Sintoma de deficiência de Fe em: salsa (*Petroselinum crispum*), cujas folhas apresentam coloração amarelada característica (a); e espinafre da Nova Zelândia (*Tetragonia expansa*) evidenciando a clorose internerval característica, na qual somente os vasos permanecem de cor verde (b).



Fonte: Mello, 2010.

e) Sintomas de toxidez de Fe

A ocorrência de toxidez por ferro é rara, podendo ocorrer apenas em cultivos como o de arroz irrigado por inundação, no qual se observa elevado nível de Fe-ferroso. No entanto para a maioria dos cultivos em solo, a toxidez não é observada, mesmo em solos que apresentem teores de Fe total superiores a 50 g kg^{-1} . Em tomateiro, os sintomas de toxidez de Fe caracterizam-se pelo arroxamento das nervuras da face inferior dos folíolos, sendo que as do terço inferior da planta apresentam manchas pardas, necrosadas. Toda a planta tem crescimento normal, de cor verde escura e os frutos, quando novos, apresentam manchas verde-escuras ao redor pedúnculo.

f) Interação do Fe com outros nutrientes

Normalmente os solos brasileiros apresentam boa disponibilidade de ferro. No entanto, podem ocorrer situações de deficiência de ferro em decorrência de sua imobilização. Em solos ácidos, ricos em fosfato solúvel, pode ocorrer deficiência por meio da precipitação de Fe na forma de FePO_4 , tornando o Fe indisponível para as plantas.

A disponibilidade de Fe também é dependente do teor de manganês no solo, sendo que na presença de MnO_2 o ferro reduzido se oxida e passa para a forma férrica não absorvida pelas plantas. Assim, a disponibilidade de Fe depende mais do equilíbrio Fe/Mn do que do teor de Fe absoluto. Também tem sido observado que a disponibilidade de Fe é variável em função de outros elementos metálicos, como o Cu, que pode substituir o Fe nos quelatos do solo, causando sua imobilização.

5.2 COBRE (Cu)

a) Funções do Cu nas plantas

O cobre presente nas plantas está, em sua maioria, ligado a enzimas que atuam na fotossíntese. Influenciando a atividade do fotossistema I. Além disso, o cobre também atua como constituinte da enzima oxidase do ácido ascórbico (Vitamina C).

b) Dinâmica do Cu no solo

A maior parte do cobre solúvel encontrado nos solos está dissolvido nos ácidos provenientes da matéria orgânica. A forma iônica do cobre (Cu^{2+}) é fortemente adsorvida pela matéria orgânica do solo, e fixado pelo húmus numa forma mais estável do que a forma trocável. Dessa forma, em solos arenosos, com baixo teor de matéria orgânica, pode-se observar deficiência de Cu, em decorrência de perdas por lixiviação.

A disponibilidade do cobre para as plantas é dependente, principalmente do pH do solo. Sendo que, em condições de pH ácido (5,0 a 6,5) se tem maior disponibilidade de cobre, o que pode causar problemas de fitotoxicidade em cultivos realizados em solos ácidos. Dessa forma, a calagem pode atuar como controladora da disponibilidade de cobre, uma vez que à medida que se aumenta o pH do solo a disponibilidade de cobre diminui.

c) Absorção, transporte e redistribuição de Cu nas plantas

O cobre é absorvido pelas plantas na forma iônica, Cu^{2+} ou como quelato. A absorção envolve gasto de energia por parte da planta, configurando processo ativo de absorção. De um modo geral, o cobre é encontrado em pequenas quantidades nos tecidos das plantas, com teores entre 2 e 20 mg kg^{-1} de cobre na matéria seca.

A direção em que o cobre se movimenta na planta é dependente da sua concentração nos tecidos. Embora se considere que o Cu seja um elemento prontamente móvel nas plantas e que a translocação tende a ocorrer das folhas mais velhas para as folhas mais novas, estudos demonstraram que em plantas bem nutridas a translocação ocorre em função da concentração de Cu nos tecidos e em plantas deficientes o cobre se mostrou relativamente imóvel.

d) Sintomas de deficiência de Cu

A deficiência de cobre se manifesta como:

1. Murcha e enrolamento das folhas mais jovens, assim como inclinação de pecíolos e talos. As folhas tornam-se quebradiças e caem. Necrose nas pontas e margens das folhas (Figura 21).
2. Clorose e outros sintomas secundários.
3. Redução da lignificação. Os vasos não lignificados do xilema são comprimidos por tecidos vizinhos, o que reduz o transporte de água e solutos.

Figura 21 – Sintomas de deficiência de cobre em cebola (*Allium cepa*).



Fonte: Oliveira, Agência Embrapa de Informação Tecnológica.

e) Toxicidade e Interação do Cu com outros nutrientes

A toxidez por cobre pode ser observada quando os teores no solo forem superiores a 300 mg kg^{-1} . Os sintomas de toxidez manifestam-se nas raízes, com perda de vigor, aquisição de coloração escura e engrossamento, paralisando o crescimento. Além disso, a toxidez pode provocar deficiência de ferro, já que o cobre em excesso atua em reações que afetam o estado de oxidação do ferro, limitando sua absorção e translocação na planta. Outro efeito do excesso de cobre é a redução da absorção de fósforo e da disponibilidade Fe, Mn e Al no solo, independentemente do tipo de solo.

Em tomateiro a toxidez por Cu se caracteriza pelo amarelecimento geral da parte aérea. Os folíolos da parte inferior se tornam verde-claro, com nervuras arroxeadas na parte dorsal, os pecíolos também se tornam roxos e as plantas ficam menores e brancas no topo. O tamanho do fruto é reduzido e estes apresentam cor amarelada, com sépalas cloróticas, e cálice e corola brancos.

5.3 BORO (B)

a) Funções do B nas plantas

O boro (B) é um elemento importante no transporte de açúcares e metabolismo dos carboidratos, sendo que na sua ausência comprovou-se acúmulo de açúcares nos tecidos. Além disso, desempenha papel fundamental no florescimento estando diretamente relacionado com o crescimento do tubo polínico (fecundação) e com os processos de frutificação. O boro também atua no metabolismo do nitrogênio e na atividade dos hormônios.

b) Dinâmica do B no solo

Diversos fatores influenciam a disponibilidade de B no solo. A precipitação de boro no solo é dependente do pH, sendo superior em condições de pH entre 8,0 e 9,0. A textura do solo também influencia o teor de B, uma vez que em solos de textura arenosa, o B pode ser facilmente lixiviado.

De um modo geral, o B encontra-se nas camadas superficiais do solo, ligado à matéria orgânica. Dessa forma, a mineralização da matéria orgânica constitui uma fonte importante de B no solo.

c) Formas de absorção, transporte e redistribuição de B nas plantas

O boro é absorvido pelas plantas na forma de ácido bórico (H_3BO_3), e em pH elevados como ânion borato ($B(OH_4)^-$), tanto por via radicular como foliar. O boro é considerado um elemento imóvel nas plantas. Sendo translocado principalmente pelo xilema, com tendência de se acumular nas folhas mais velhas, concentrando-se nas bordas e nas pontas das mesmas. Além disso, as plantas em estádios iniciais de crescimento absorvem mais boro do que as plantas adultas.

d) Sintomas de deficiência de B

A observação de sintomas de deficiência de boro nas plantas pode ser acelerada em condições de seca. Da mesma forma, muitas vezes, os sintomas tendem a desaparecer quando a umidade do solo é adequada.

Os sintomas de deficiência de B são variáveis de espécie para espécie, sendo os mais comuns:

1. Redução de crescimento e deformações nas zonas de crescimento, uma vez que na ausência de boro as células não se diferenciam.
2. Redução da superfície foliar, folhas jovens deformadas, espessas, quebradiças e pequenas. Podem apresentar clorose ou até mesmo um verde mais intenso.
3. Acúmulo de compostos nitrogenados nas folhas mais velhas.
4. Crescimento reduzido de raízes.
5. Abortamento floral.
6. Fendas em ramos, pecíolos e nos frutos. E frutos com formação irregular.

Figura 22 – Corte transversal de duas raízes de nabo (*Brassica rapa subsp. rapa*), à direita raiz com aspecto normal, à esquerda raiz com sintomas característicos de deficiência de boro.



Fonte: Holmes, 2010.

Figura 23 – Deficiência de Boro em batata-doce (*Ipomoea batatas*), os sintomas aparecem como manchas roxas/castanhas elevadas, as manchas podem ocorrer internamente próximas ao anel vascular, podendo se desenvolver também durante o período de armazenamento.



Fonte: Averre, 2009.

e) Distúrbios fisiológicos

▪ Lóculo aberto em tomate

Esta anomalia consiste na má soldadura dos carpelos durante a formação dos frutos. As aberturas expõem o interior dos lóculos, exibindo o tecido corticoso e necrosado da placenta (Figura 24). É observada com maior frequência nos frutos do grupo “salada” e em frutos de maior número de lóculos e com peso unitário maior. A má formação ocorre em várias intensidades, podendo ser apenas uma mancha necrosada ou até mesmo profundas reentrâncias.

O grau de suscetibilidade da ocorrência de tal distúrbio é dependente do cultivar. Aconselha-se, na produção do fruto do tipo “salada” utilizar cultivares resistentes a essa anomalia, efetuar o raleamento precoce das pencas, retardar a poda para após o estabelecimento dos frutos da primeira penca, e realizar adubação com fertilizantes a base de boro no sulco de plantio.

Figura 24 – Lóculos abertos em tomate provocado pela deficiência de Boro.

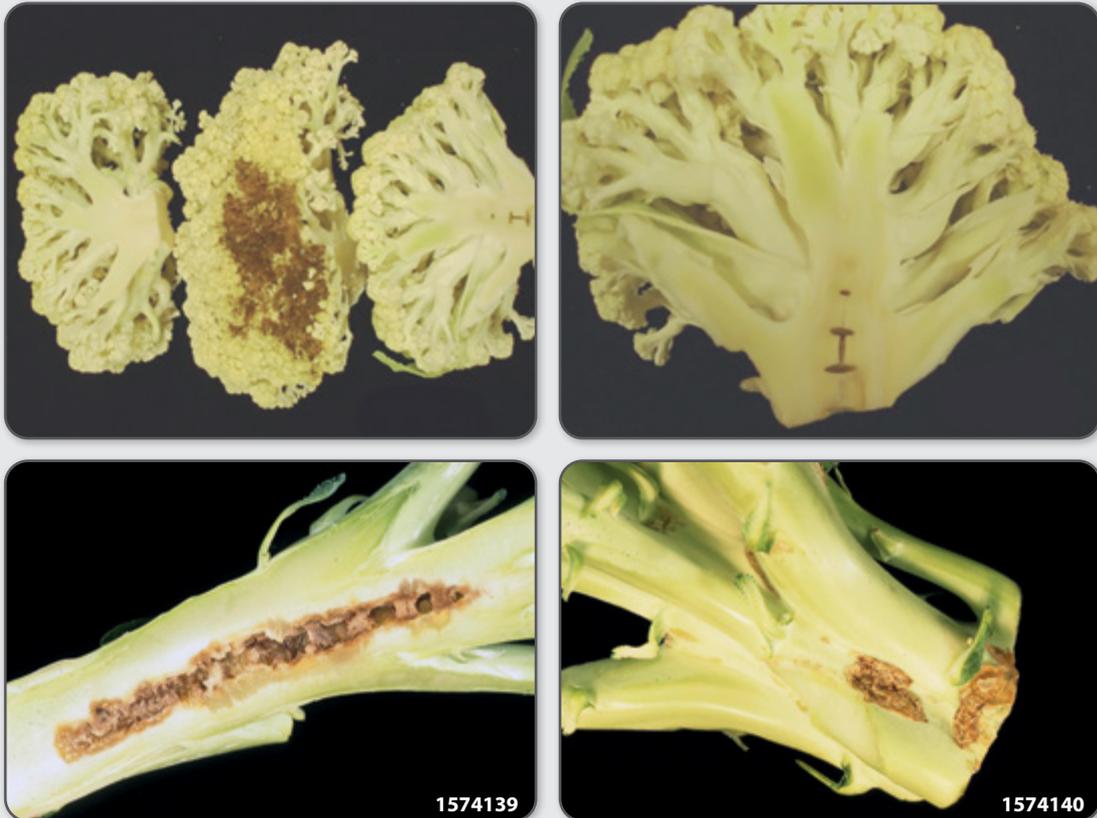


Fonte: Minami; Mello, 2016.

▪ Podridão parda em couve-flor

A podridão é caracterizada pela ocorrência de pontuações escuras na cabeça, medula oca e escurecida e necroses corticosas nas nervuras principais das folhas (Figura 25). Esses sinais são mais perceptíveis em cabeças em ponto de colheita. A aplicação preventiva de B no solo ou foliar é suficiente para contornar tal distúrbio fisiológico.

Figura 25 – Pontuações escuras da cabeça e medula oca decorrentes de deficiência de boro em couve-flor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*).



Fonte: Silva et al., 2003 (a e b); Holmes, 2010 (c e d).

f) Sintomas de toxidez de B

A toxidez de boro é tão grave quanto a sua deficiência. O primeiro sinal de toxicidade de B é o aparecimento de uma clorose internerval verde amarelado e pontos marrom-escuros e necróticos que se desenvolvem nas pontas dos folíolos e se enrolam para dentro, primeiro nas folhas mais velhas e nos bordos e progridem para as mais novas, formando manchas necróticas que se estendem pelas folhas, reduzindo a área foliar e provocando queda na produção. Além disso, a toxicidade de B caracteriza-se pelo definhamento da planta, morte das folhas na parte inferior, necrose e deformação de folíolos (Figura 26).

Figura 26 – Sintomas de toxidez de boro em couve-flor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*)



Fonte: Silva et al., 2003.

5.4 MANGANÊS (Mn)

a) Funções do Mn nas plantas

O manganês é um elemento essencial para a fotossíntese, uma vez que atua na síntese de clorofila, como ativador enzimático, e na fotólise da água, participando do funcionamento do fotossistema II. Além disso, o Mn está relacionado com a ativação de um grande número de enzimas.

b) Dinâmica do Mn no solo

O manganês do solo é componente de óxidos, carbonatos, silicatos e sulfetos, sendo os óxidos e sulfetos as formas mais comuns. No solo, o manganês pode apresentar-se di, tri ou tetravalente, enquanto na solução do solo e na CTC apresenta-se como Mn^{2+} , sendo que as formas Mn^{3+} e Mn^{4+} formam óxidos praticamente insolúveis.

Os principais fatores que determinam a disponibilidade do Mn são, o pH (valores baixos favorecem a redução e altos a oxidação), as condições de oxirredução do solo, teores de matéria orgânica e equilíbrio com outros cátions, principalmente Fe, Ca e Mg.

c) Formas de absorção de Mn

As plantas absorvem o Mn na forma divalente (Mn^{2+}), não absorvem a forma tetravalente (Mn^{4+}) e não se sabe se absorve a forma trivalente (Mn^{3+}). A absorção de Mn é controlada metabolicamente, de forma semelhante à de outros cátions, como o Ca e Mg. O Mn é facilmente absorvido quando presente na forma solúvel no solo. Sendo que, com o aumento do pH, ocorre redução da absorção e com o aumento do teor de matéria orgânica aumenta a absorção.

d) Sintomas de deficiência de Mn

A manifestação de deficiência de Mn não é muito comum nas plantas. Quando ocorre, pode ser identificada como o surgimento inicial de manchas cloróticas entre as nervuras evoluindo para necrose nas folhas sendo jovens ou velhas (Figura 27). A deficiência de Mn tem efeito mais pronunciado na formação de carboidratos estruturais, o que é notado pela redução do crescimento das raízes das plantas.

Em plantas de tomate, a deficiência de Mn pode ser caracterizada pela ocorrência de pontos marrons no caule e pecíolo, assim como amarelecimento do topo da planta. As plantas têm menor altura e matéria seca, e a produção é mais baixa. Os frutos das plantas deficientes em Mn são vermelho-amarelados e alguns apresentam áreas amarelo-esverdeadas que nunca se tornam vermelhas. Nestas áreas, surgem pontos pardos antes dos frutos amadurecerem, que posteriormente se tornam vermelhos.

Figura 27 – Deficiência de manganês em folha de pepino.



Fonte: Yara fertilizantes.

e) Sintomas de toxidez por Mn

A toxidez de Mn é comum em solos que apresentam grande quantidade de Mn^{2+} , disponível para a absorção pelas plantas. Dessa forma, ocorrem comumente em solo ricos em húmus, com pH inferior ou igual a 5,5 e com elevadas condições redutoras, condições que favorecem o acúmulo de Mn^{2+} no solo. O sintoma de toxidez caracteriza-se pelo aparecimento de manchas marrons nas folhas, sendo mais visível em plantas jovens.

5.5 MOLIBDÊNIO (Mo)

a) Funções do Mo nas plantas

As principais funções do molibdênio nas plantas estão relacionadas ao metabolismo do nitrogênio. Sendo que, o Mo é constituinte da enzima nitrato-redutase responsável pela assimilação de nitrogênio pelas plantas e, também está envolvido no processo de fixação biológica de N.

Além disso, o molibdênio está envolvido na formação do ácido ascórbico (Vitamina C) e na atividade respiratória.

b) Dinâmica do Mo no solo

O molibdênio pode apresentar-se no solo de três formas: íons molibdato, na solução do solo e MoO_4^{2-} ou HMoO_4^- , adsorvidos de forma lábil ou não lábil aos coloides do solo.

A concentração de molibdênio na solução do solo é muito baixa, variando de acordo com o pH da mesma e com o teor de fósforo do solo. A concentração de Mo tende a ser maior em solos com pH entre 5,4 e 6,4. No solo, o Mo está ligado à matéria orgânica e a oxihidróxidos de ferro e alumínio. Para o Mo-lábil, a adsorção do MoO_4^{2-} se assemelha à adsorção de fosfato ou sulfato. O Mo não lábil está presente na constituição de rochas ígneas e também é encontrado em olivinas.

Pode ser observada competição entre os íons Mo, os sulfatos e fosfatos, sendo que, os íons sulfato competem fracamente com os íons Mo, e os íons fosfato competem fortemente pelo mesmo sítio de ligação.

c) Formas de absorção e transporte de Mo

O molibdênio é o micronutriente exigido em menor quantidade pelas plantas e também é o que ocorre em menor concentração no solo. No entanto, plantas como as crucíferas (couve-flor, repolho) e as leguminosas são plantas mais exigentes.

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 devido ao efeito competitivo de SO_4^{2-} . O molibdênio é considerado um elemento moderadamente móvel na planta. Geralmente as plantas requerem baixas quantidades de molibdênio, cerca de 40 a 50 g ha⁻¹ para suprir a necessidade. No entanto, grandes quantidades de MoO_4^{2-} podem ser absorvidas pelas plantas sem efeitos tóxicos.

d) Sintomas de deficiência de Mo

O sintoma de deficiência de molibdênio é caracterizado pela deformação das folhas, mesmo mantendo a coloração verde, devido à morte de células do parênquima. As folhas apresentam tamanho reduzido, clorose e mosqueados de cor marrom em toda parte da folha. Surgem áreas necróticas na ponta das folhas, que se estendem até as bordas. Por último, a folha morre, provocando uma queda prematura. Em plantas de tomate, a deficiência de Mo é caracterizada pelo aparecimento de um colorido verde-amarelado na parte internerval das folhas, assim como enrolamento das margens para cima. Os folíolos exibem necrose e enrugamento nas pontas e, em fases mais adiantadas todo folíolo torna-se necrosado e enrugado. Os pecíolos se voltam para baixo e os brotos terminais desenvolvem-se lentamente. Os sintomas são mais visíveis nas folhas mais velhas, as quais se mostram bronzeadas, secas, com aparência de papel.

e) Distúrbios fisiológicos

▪ Ponta de chicote em brássicas

A ponta de chicote é um distúrbio fisiológico caracterizado por uma deformação do limbo foliar, que se apresenta fortemente recortado, quase reduzido à nervura principal (Figura 28). Além

disso, podem ser observados orifícios ou falhas no limbo, semelhante aos danos causados por insetos mastigadores e ausência de broto terminal em mudas. Aplicações de molibdênio via foliar são indicadas nestes casos.

Figura 28 – Ponta de chicote em couve (*Brassica oleracea var. italica*), provocada pela deficiência de molibdênio.



Fonte: Tiger Sul Deficiency Images.

f) Sintomas de toxidez de Mo

Os sintomas de toxidez com Mo são caracterizados pelo amarelecimento de parte da planta, sendo que a parte mais alta permanece um pouco mais verde. Em casos de toxidez em tomateiro, este perde os folíolos da parte inferior da planta, que se tornam bronzeados e necrosados. Os frutos de tomate apresentam-se de tamanho reduzido e com área bronzeada escura na porção equatorial. Os brotos tornam-se amarelados, sendo que as folhas do ponteiro se tornam bronzeadas e a lâmina é reduzida praticamente à nervura central e as folhas velhas tornam-se mosqueadas.

5.6 ZINCO (Zn)

a) Funções do Zn nas plantas

O zinco é um micronutriente que atua como cofator enzimático, sendo essencial para a ativação, regulação e estabilização da estrutura das enzimas. O Zn atua como cofator de uma série de enzimas, entre as quais se encontram enzimas relacionadas com a fotossíntese, a respiração, a fermentação e a síntese de auxinas, hormônio vegetal envolvido no crescimento.

b) Dinâmica no solo e formas de absorção de Zn

A disponibilidade do Zn presente no solo é afetada pelo pH, sendo que há maior disponibilidade de Zn em solos de pH ácido, e em solos cujo pH é maior que 7,0 o Zn é minimamente disponibilizado. Dessa forma, a calagem excessiva dos solos pode resultar em deficiência de Zn.

O zinco é absorvido pelas plantas na forma de Zn^{2+} , tanto pelas raízes como pelas folhas. A mobilidade e redistribuição do Zn nas plantas são muito baixas. Os teores de Zn nas plantas variam de 3 a 150 $mg\ kg^{-1}$ de matéria seca. Sendo que teores inferiores a 25 $mg\ kg^{-1}$ caracterizam deficiência do elemento nas folhas.

c) Sintomas de deficiência de Zn

A deficiência de Zn costuma ocorrer apenas em cultivos pluri-anuais, embora possa ocorrer em alguns cultivos anuais, como no milho, por exemplo. A deficiência de Zn se manifesta com o crescimento restrito da gema terminal, o que se traduz em um crescimento na forma de roseta nos cultivos herbáceos, e em outros cultivos, no encurtamento dos entrenós. Aparecem zonas cloróticas que evoluem para necrose nas folhas mais jovens. A deficiência de Zn também pode ser provocada por altos teores de P, como observado em videira.

Em tomateiro a deficiência de Zn é primeiramente identificada pela observação de clorose nas partes internervais dos folíolos da parte mais baixa da planta, com as nervuras permanecendo verdes. As plantas deficientes apresentam as raízes com os pelos absorventes intumescidos, com a extremidade recurvada. As raízes secundárias tendem a apresentar nodulações e a extremidade da raiz principal morre (Figura 29).

Figura 29 – Sintomas de deficiência de Zn em folhas de tomate.



Fonte: Yara fertilizantes.

d) Sintomas de toxidez de Zn

A toxidez por Zn pode ocorrer apenas em condições de solos ácidos ou em solos cujo material de origem é rico em Zn. Nesses casos, as folhas apresentam pigmentação vermelha no pecíolo e nas nervuras, sendo também verificada clorose resultante da baixa concentração de Fe, uma vez que o excesso de Zn impede a redução do Fe (Fe^{3+} para Fe^{2+}), bem como seu transporte para o interior das plantas.

5.7 CLORO (Cl)

a) Funções do Cl nas plantas

O cloro é essencial no processo fotossintético das plantas, em que atua na liberação do O_2 por cloroplastos isolados, no fotossistema II.

b) Formas de absorção, transporte e redistribuição do Cl

O cloro é absorvido pelas plantas tanto pela raiz, como pelas folhas, na forma de Cl^- . O Cl apresenta elevada mobilidade de redistribuição nas plantas, podendo migrar para as partes que apresentam maior atividade metabólica.

As concentrações foliares adequadas de Cl para o crescimento das plantas estão entre 20 e 100 $mg\ kg^{-1}$, sendo que concentrações foliares inferiores a 2 $mg\ kg^{-1}$ caracterizam deficiência.

c) Sintomas de deficiência e toxidez por Cl

Os sintomas de deficiência de Cl raramente se desenvolvem em condições de campo e não são fáceis de identificar. Os sintomas mais comuns consistem na redução do tamanho das folhas, clorose, seguida de bronzeamento, evoluindo para necrose. As raízes apresentam crescimento limitado, sendo mais espessas ou em forma de maçãs próximo ao ápice.

A toxicidade de Cl é variável nas plantas de acordo com o seu grau de tolerância. Plantas como a beterraba, o milho, o espinafre e o tomate são consideradas plantas tolerantes, denominadas de halófitas. O excesso de Cl, devido ao uso de KCl na adubação, pode ser problema sério em culturas como batata e alface, causando amarelecimento e abscisão prematura de folhas. Em batata, a produção e qualidade também são prejudicadas. Os sintomas de toxidez podem se manifestar como redução da largura das folhas, que tendem a enrolar-se, bem como por ampla necrose que provocam o secamento da mesma.

5.8 NÍQUEL (Ni)

a) Funções do Ni nas plantas

O níquel está envolvido no metabolismo do N, tendo maior importância para as plantas que recebem adubação com ureia ou seus derivados, atuando diretamente na metabolização da mesma.

b) Formas de absorção de Ni

As plantas absorvem o níquel na forma de cátion divalente (Ni^{2+}). Seu teor na solução do solo é muito baixo, mesmo em solos que ocorram serpentinas, neste caso, pode ocorrer toxidez do elemento para a maior parte das espécies cultivadas. A capacidade de redistribuição de Ni nas plantas é considerada intermediária.

c) Sintomas de deficiência e toxidez por Ni

Os sintomas de deficiência de Ni, em leguminosas, se manifestam na forma de acúmulo de ureia, provocando necrose dos folíolos. Em plantas de tomate a deficiência de Ni se manifesta na

forma de clorose nas folhas jovens, evoluindo para necrose do meristema. Além disso, a deficiência de Ni afeta o crescimento, o metabolismo, a senescência e a absorção de Fe pelas plantas. O suprimento adequado de Ni aumenta a resistência das plantas a doenças.

O limite máximo de Ni no solo, para que não ocorra fitotoxicidade, é aproximadamente 100 mg kg^{-1} , enquanto na planta, em tomate, por exemplo, a margem de fitotoxidez é de 25 mg kg^{-1} de matéria seca. Os sintomas de fitotoxidez por Ni são clorose, crescimento fraco e queda na produção. Pode ser acompanhado da redução na absorção de nutrientes e desordens no metabolismo das plantas.

6 ELEMENTOS BENÉFICOS

Os elementos benéficos são aqueles capazes de estimular o crescimento das plantas, mesmo não sendo essenciais, sendo essenciais apenas para algumas espécies vegetais ou sendo requerido em condições específicas. Podem ser classificados como elementos benéficos o sódio (Na), o silício (Si), o selênio (Se) e o cobalto (Co), tendo maior importância para as plantas cultivadas o cobalto e o silício.

6.1 COBALTO (Co)

Ainda não se identificou a exigência geral de plantas superiores por cobaltos, no entanto nas plantas hospedeiras de bactérias que fixam nitrogênio, como as leguminosas, o cobalto é requerido. Os micro-organismos fixadores de nitrogênio apresentam necessidade de cobalto, não a planta hospedeira, uma vez que o cobalto faz parte do complexo enzimático que funcionam nos bacteroides que fixam N. Os sintomas de deficiência de cobalto se caracterizam por sintomas típicos de deficiência de N.

6.2 SILÍCIO (Si)

O silício é o segundo elemento mais abundante no solo, estando atrás apenas do oxigênio, uma vez que, o silício está presente na composição da maioria dos minerais do solo. A solubilidade dos silicatos, bem como a concentração de silício na solução do solo é bastante variável. Na solução do solo, o Si apresenta-se na forma de H_4SiO_4 , em cuja forma também é absorvido.

O Si deposita-se em forma amorfa na parede celular das plantas, contribuindo para a rigidez e elasticidade da mesma. Apesar de não ser requerido de forma essencial, muitas plantas acumulam concentrações altas de silício em seus tecidos, contribuindo para melhorar o crescimento e a produtividades destas. Trabalhos científicos comprovam a essencialidade de silício para a cana-de-açúcar, tomate e pepino. Para o arroz, o silício confere resistência ao ataque de fungos, assim como reduz toxidez causada por Fe, o que aumenta o rendimento do cultivo. Plantas deficientes em silício se mostram quebradiças e suscetíveis ao ataque de fungos.

7 **DIAGNOSE DA DEFICIÊNCIA DE MACRO E MICRONUTRIENTES**

A diagnose do estado nutricional das plantas consiste na utilização de metodologias para identificação de deficiências, toxidez ou desbalanço nutricional no sistema solo-planta. Dessa forma a diagnose pode ser realizada, principalmente, de três formas: diagnose visual, diagnose da fertilidade do solo e diagnose do tecido vegetal.

Cada método tem suas vantagens e desvantagens, sendo que a diagnose visual se apresenta como um método rápido e de fácil execução, no entanto é pouco preciso. Por outro lado, a análise de fertilidade do solo proporciona bons indicativos, mas em se tratando de um meio complexo como o solo, o elemento mineral pode estar presente, mas devido às relações complexas envolvidas, pode não estar disponível para as plantas. E a análise dos tecidos ou análise foliar, apesar de apresentar limitantes na execução, devido à especificidade quanto ao momento da coleta, representa o real estado nutricional da planta, naquele momento.

7.1 **DIAGNOSE VISUAL**

A identificação da deficiência nutricional por meio da diagnose visual é rápida e pouco dispendiosa, contudo apresenta limitações, uma vez que quando é possível identificar os sintomas de deficiência, perdas significativas de produção já ocorreram. Além disso, em condições de campo é comum que se tenha associado mais de um sintoma de deficiência ou excesso de nutrientes, o que dificulta a identificação correta.

A análise visual envolve uma análise criteriosa de fatores bióticos e abióticos que possam alterar o estado nutricional da planta ou induzir padrões de danos similares à deficiência e toxidez de nutrientes. Dessa forma, deficiência ou excesso de água, variações bruscas de temperatura, textura e compactação do solo, reações entre misturas de produtos fitossanitários, toxidez por herbicidas, senescência natural das folhas, ataque de pragas e doenças etc., devem ser considerados na análise de diagnose visual.

Além disso, é importante observar que a deficiência nutricional se caracteriza por ocorrer em reboleiras, apresenta simetria e um gradiente de intensidade das folhas velhas para as jovens, em caso de nutrientes móveis no floema e o inverso para os nutrientes imóveis. A tabela 3 apresenta alguns princípios para a diagnose visual.

Tabela 3 – Alguns princípios para diagnose visual de deficiência nutricional.

Parte da planta	Sintoma	Nutriente*
Deficiência		
Folhas velhas e maduras	Clorose	
	Uniforme	N (S)
	Internerval e manchas	Mg (Mn)
	Necrose	
	Secamento da ponta e margens	K
Folhas novas	Clorose	
	Uniforme	Fe (S)
	Internerval ou manchas	Zn (Mn)
Lâminas e ápices	Necrose (clorose)	Ca, B, Cu
	Deformação	Mo (Zn, B)
Toxicidade		
Folhas velhas e maduras	Necrose	
	Manchas	Mn (B)
	Secamento da ponta e margens	B, sais (injúrias de pulverização)
	Clorose (necrose)	Toxicidade não específica

* Símbolos entre parênteses indicam que os sintomas são variáveis.

Fonte: Marschner, 2012.

O uso de chaves de identificação de deficiência também é uma ferramenta adotada na diagnose visual. A tabela 4 mostra uma chave de descrição de sintomas de deficiência mais frequentes nas principais culturas olerícolas.

Tabela 4 – Chave de descrição para identificação de sintomas de deficiência ou distúrbios fisiológicos em hortaliças.

Cultura	Sintomas	Elementos deficientes
Alface	Folhas novas com pontas queimadas	Ca
	Cabeças menores	Cu
Alho	Chochamento dos bulbos	B
Batata	Tubérculos pequenos e mal formados	P ou K
	Folhas mais velhas amareladas entre as nervuras	Mg
	Morte dos brotos, tubérculos menores	B
Brócolis	Escurecimento dos botões	B
Cenoura	Cavidades escuras nas raízes	Ca
Couve-flor	Escurecimento em manchas na cabeça, cavidade negra no interior do caule	B
	Estrangulamento do limbo	Mo
Tomate	Podridão estilar (fundo preto)	Ca
	Enegrecimento interno (coração negro)	Ca
	Amarelecimento entre as nervuras das folhas baixas	Mg
	Lesões negras e rachadura dos frutos	B
	Frutos inchados	Excesso de N

Fonte: Malavolta, 1980.

A diagnose visual é um método simples e rápido de identificar deficiências nutricionais nas áreas de cultivo. No entanto, é um método pouco preciso e precisa ser complementado com outras análises, como as análises de solo e foliar.

7.2 ANÁLISE DE SOLO

A diagnose nutricional das plantas, com base na análise de solo se deve principalmente à manutenção da disponibilidade de nutrientes no meio. Dessa forma, a avaliação da fertilidade do solo, por meio de análise, exige que sejam seguidos certos procedimentos para obtenção de sucesso. Estes procedimentos consistem desde a divisão da área em glebas e talhões, amostragem simples e composta de maneira correta e utilização de manual adequado no momento da interpretação dos resultados.

a) Amostragem

A realização da coleta de solo destinada à análise deve ser realizada de forma homogênea, uma vez que os resultados obtidos nessas amostras serão extrapolados para uma determinada área cultivada. Dessa forma a precisão da análise está diretamente relacionada à amostragem adequada.

Para a realização de uma amostragem representativa da área de cultivo deve-se dividir a área em glebas ou talhões, que devem ser divididos de forma homogênea, podendo considerar áreas em que características como topografia, cobertura vegetal ou uso agrícola, textura, cor e condições de drenagem do solo, histórico de manejo e produtividade agrícola são semelhantes. Sendo assim, as glebas ou talhões tem seu limite definido de acordo com essas características e suas combinações e não apenas por seu tamanho.

A coleta de amostras deve ser realizada em cada gleba ou talhão, sendo coletadas pelo menos 10 amostras, que serão misturadas, posteriormente para se obter uma amostra composta, que será enviada para o laboratório de análises de solo. Sendo que quanto maior o número de amostras melhor é a representatividade dos resultados obtidos pela análise de solo para àquela gleba. A profundidade de amostragem adequada é aquela em que se concentrará o maior volume de raízes da cultura a ser cultivada. Sendo que para culturas anuais geralmente, a profundidade amostrada é de 0-20 cm ou 0-10 e 10-20 cm. Enquanto para culturas perenes, a amostragem é feita em camadas mais profundas como, de 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm. Além disso, a coleta dessas amostras deve ser realizada por meio de caminhamento em ziguezague na gleba, para que se garanta a representatividade da área na amostragem.

A amostragem de solo pode ser realizada com o auxílio de uma série de equipamentos. O produtor pode utilizar diversos tipos de equipamentos, sendo estes específicos para amostragem de solo, como o trado de rosca, o trado calador e o trado inglês e equipamentos comumente encontrados em propriedades rurais, como a pá de corte.

b) Interpretação de resultados de análise de solo

▪ Métodos de Análises Laboratoriais

Os resultados obtidos com a análise de solo são, de modo geral, interpretados com o auxílio de manuais de recomendação de adubação, elaborados por institutos de pesquisa. Por exemplo, para o Estado de São Paulo têm-se as recomendações de adubação e calagem pelo Boletim 100 (RAJI et al., 1997), em Minas Gerais, pela 5ª Aproximação, a Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico. No Estado do Paraná, pela Circular Técnica 128 (OLIVEIRA, 2003), e o Manual de adubação de calagem para o estado do Paraná (SBCS, 2017).

Além da disponibilidade desses manuais de interpretação de resultados de análises de solo, deve-se atentar também ao método de análise adotado. Cada manual é desenvolvido com base em uma série de estudos que adotam condições específicas. Dessa forma, para se utilizar os manuais de maneira correta o conhecimento do método de análise adotado em cada manual é essencial. Por exemplo, no Estado do Paraná, as análises de P são realizadas por meio de extração por Mehlich-1, enquanto no Estado de São Paulo a extração é feita com Resina, o que altera as classes de interpretação a serem utilizadas, devendo atentar-se ao uso de manuais específicos para cada condição de extração de nutrientes. A tabela 5 mostra os extratores utilizados em alguns métodos de extração de nutrientes.

Tabela 5 – Métodos de análises químicas para avaliar a fertilidade do solo, utilizados pelos laboratórios. São Paulo – SP, Minas Gerais – MG, Rio Grande do Sul e Santa Catarina (RS e SC) e Paraná (PR).

Característica	SP	MG	RS e SC	PR
pH	CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹ (1:2,5)	H ₂ O (1:2,5)	H ₂ O (1:1)	H ₂ O (1:2,5)
Al ³⁺	KCl 1 mol L ⁻¹			
Ca ²⁺ e Mg ²⁺	Resina	KCl 1 mol L ⁻¹	KCl 1 mol L ⁻¹	KCl 1 mol L ⁻¹
H + Al	SMP	Ca (OAc) 0,5 mol L ⁻¹ pH 7,0 ou SMP	SMP	Ca (OAc) 0,5 mol L ⁻¹ pH 7,0
P disponível	Resina	Mehlich-1	Mehlich-1	Mehlich-1
K disponível e Na	Resina	Mehlich-1	Mehlich-1	Mehlich-1
S disponível	Ca (H ₂ PO ₄) ₂ 500 mg L ⁻¹ em H ₂ O	Ca (H ₂ PO ₄) ₂ 500 mg L ⁻¹ em H ₂ O	Ca (H ₂ PO ₄) ₂ 500 mg L ⁻¹ em H ₂ O	Ca (H ₂ PO ₄) ₂ 500 mg L ⁻¹ em H ₂ O
Fe, Mn, Cu e Zn disponíveis	DTPA	Mehlich-1	Mehlich-1	Mehlich-1
B disponível	Água quente	Água quente	Água quente	Água quente
Matéria Orgânica	C oxidável por CrO ₇ ²⁻ dosagem titulométrica ou colorimétrica	C oxidável por CrO ₇ ²⁻ dosagem titulométrica ou colorimétrica	C oxidável por CrO ₇ ²⁻ dosagem colorimétrica	Matéria Orgânica por incineração

Fonte: Adaptado de Novais et al., 2007.

▪ Interpretação de Resultados

O diagnóstico da fertilidade do solo se baseia na relação entre os teores de nutrientes, os outros parâmetros descritos na análise do solo, como pH, CTC, teor de matéria orgânica etc., e as classes de adequação relacionadas à produção relativa das culturas. Sendo que as classes de disponibilidade muito baixa, baixa, média e alta se relacionam, em geral, com produção relativa menor que 50, de 50 a 70, de 70 a 90 e de 90 a 100%, respectivamente. Além disso, as classes de

disponibilidade são variáveis entre os métodos de análise utilizados e são estabelecidas para cada nutriente. Por exemplo, de acordo com o manual de Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo – Boletim Técnico 100, os teores de fósforo, extraído pelo método de resina, considerados para hortaliças são: muito baixo para teores $\leq 10 \text{ mg dm}^{-3}$, baixo para teores de 10 a 15 mg dm^{-3} , médio para teores de 26 a 60 mg dm^{-3} , alto para teores de 61 a 120 mg dm^{-3} e muito alto para teores maiores do que 120 mg dm^{-3} . Com as classes de disponibilidade de nutrientes são específicas, é necessário buscar tabelas de interpretação que atendam não apenas os métodos utilizados para a análise, mas também que contenham especificações para cada cultura.

A Tabela 6 mostra a quantidade de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos que devem ser utilizados no cultivo das principais espécies de hortaliças em caso de baixa disponibilidade destes no solo.

Tabela 6 – Doses de nitrogênio (N), fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O), em kg ha^{-1} , recomendados para hortaliças em solos com baixos teores de fósforo e potássio disponíveis baseada na 5ª aproximação, descrita por Ribeiro et al. (1999).

Cultura	N ⁽¹⁾	P_2O_5 ⁽²⁾	K_2O ⁽²⁾
Abóbora italiana	120	200	240
Abóbora menina	60	150	100
Alface	150	400	120
Alho	80	250	80
Batata doce	60	180	90
Batata inglesa	190	420	350
Berinjela	100	200	160
Beterraba	100	300	240
Brócolos	150	400	240
Cebola	120	300	180
Cebolinha	160	200	120
Mandioquinha salsa	40	180	90
Cenoura	120	400	320
Chuchu	430	200	360
Couve-flor	150	300	240
Ervilha	90	150	120
Jiló	100	200	160
Melancia	120	200	150
Milho doce	120	100	80
Morango	220	400	350
Pepino	120	300	250
Pimentão	150	300	240
Quiabo	120	240	240
Repolho	150	400	240
Tomate rasteiro	120	600	200
Tomate tutorado	400	1250	800

⁽¹⁾A dose recomendada corresponde à quantidade aplicada no plantio somado à quantidade aplicada em cobertura.

⁽²⁾Para teores médios, altos e muito altos de P e K no solo, as doses recomendadas são: 77, 53 e 30%, respectivamente, das recomendadas para teores baixos.

Fonte: Novais et al., 2007.

7.3 ANÁLISE FOLIAR

A análise foliar ou análise nutricional dos tecidos consiste na determinação da concentração dos elementos minerais em uma amostra tomada em uma determinada porção da planta, em um determinado estágio fenológico. A análise dos tecidos da planta é utilizada nas seguintes situações: verificação do equilíbrio nutricional, constatação de deficiência ou toxidez dos elementos minerais e acompanhamento, avaliação e ajuste do programa de adubação.

O sucesso da análise foliar é dependente de três etapas básicas: obtenção de padrões de referência, normatização da amostragem e preparo de amostras e interpretação dos resultados.

a) Procedimentos para amostragem

O momento da amostragem e o tipo de material vegetal coletado para realização de análise foliar é variável entre as plantas. Dessa forma, a tabela 7 apresenta como e quando deve ser realizada a amostragem para realização de análise foliar em algumas hortaliças cultivadas.

Tabela 7 – Cultura, parte da planta amostrada, época de amostragem e tamanho da amostra para análise química do tecido vegetal.

Cultura	Parte amostrada	Época	Quantidade*
Abóbora	Pecíolos e limbo foliar das folhas novas completamente expandidas.	Início do florescimento	40 folhas
Alface	Folhas recém-maduras	Formação da cabeça	40 folhas
Alho	Folha mais nova, completamente desenvolvida	Antes, durante ou após a formação da cabeça	40 folhas
Batata	Folha mais desenvolvida	Amontoa	30 folhas
Cebola	Folha mais alta	Meio do ciclo	40 folhas
Cenoura	Folha com pecíolo	40 dias	40 folhas
Couve-flor	Folha recém-madura	Formação da cabeça	40 folhas
Ervilha	Folha recém-madura	Pleno florescimento	40 folhas
Espinafre	Folha recém-madura	Meio do ciclo	40 folhas
Mandioca	Primeira folha recém-madura	3 a 4 meses de idade	30 folhas
Maracujá amarelo	Folhas em todas as posições	250 a 280 dias	60 folhas
Melão	Folhas completamente desenvolvidas	45 dias	40 folhas
Pepino	Folhas do caule	Início da frutificação	40 folhas
Pimentão	Folhas maduras	Florescimento	40 folhas
Pimenta	Folhas	90 a 150 dias	-
Repolho	Folhas recém-maduras	Formação da cabeça	40 folhas
Tomate	Pecíolo e limbo foliar da folha oposta ao 3º cacho.	Florescimento do 3º cacho	40 folhas

* Quantidades de material a ser coletado em um talhão homogêneo.

Fonte: Adaptado de Novais et al., 2007.

Após a coleta, as amostras devem ser acondicionadas corretamente, de forma a minimizar a respiração, a transpiração e a atividade enzimática. Dessa forma, o ideal é que a amostra chegue ao laboratório ainda verde, no mesmo dia da coleta, acondicionada em sacola plástica e mantida em baixa temperatura. Caso isso não seja possível, é recomendado o armazenamento em saco plástico e em refrigerador a 5 °C (LUCENA, 1997).

b) Interpretação de resultados de análise foliar

A interpretação dos resultados é um momento crucial da análise de tecidos. Os resultados de análise foliar são interpretados com base em padrões preestabelecidos. O Nível Crítico é um desses métodos, este consiste na comparação dos resultados da análise foliar de tecidos específicos com valores de referência, que indicam uma relação entre os nutrientes e o crescimento e produção das plantas (Tabela 8). A interpretação dos resultados baseada no Nível Crítico indica se a concentração de nutrientes encontrado na análise foliar está dentro dos padrões para obtenção de alta produtividade. Dessa forma, valores iguais ou superiores são observados em plantas bem nutridas, no caso de valores inferiores, este indica uma deficiência do elemento em questão.

Tabela 8 – Valores de referência para interpretação dos resultados de análises de tecidos das principais hortaliças cultivadas.

Cultura	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Z
	dag kg ⁻¹						mg kg ⁻¹					
Abóbora												
Pecíolo	0,18	0,56	8,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Limbo Foliar	4,02	0,46	2,36	1,36	0,40	0,31	-	-	-	-	-	-
Alface	3,0-4,7	0,5-0,75	6,00-7,00	0,65-1,50	0,35-0,40	0,16-0,25	30-35	5-30	50-200	50-100	-	50-150
Alho												
Antes da bulbificação	5,0	0,30	4,00	0,10	0,15	1,50	-	-	-	-	-	-
Durante a bulbificação	4,0	0,30	3,00	0,60	0,30	0,70	50	25	200	100	-	75
Após a bulbificação	3,0	0,30	2,00	0,60	0,30	0,30	-	-	-	-	-	-
Batata	4,5-6,0	0,29-0,50	9,3-11,5	0,76-1,00	0,10-0,12	-	25-50	7-20	50-100	30-250	-	45-250
Cebola	4,0	0,30	4,0	0,40	0,40	0,40	0,40	0,70	-	-	-	-
Cenoura	3,6	0,22	6,34	1,84	0,39	0,38	-	-	-	-	-	-
Couve-flor	2,5	0,50	2,8	2,00	0,40	0,12	60-80	8-10	120-140	45-70	0,4-0,8	34-50
Ervilha	4,5	0,30	2,0	1,50	0,30	0,50	100-110	15-20	100-120	40-50	0,6-1,0	80-200
Espinafre	4	0,40	6,0	1,00	1,00	0,30	30-40	10-15	300-400	200-500	-	100-120
Pepino	4,72	0,47	3,39	4,66	0,75	0,17	54	-	-	-	0,50	43
Pimentão	3,2-3,7	0,20-0,22	5,70-5,95	2,95-3,45	0,54-0,60	0,30-0,45	-	-	-	-	-	-
Repolho	2,86	0,41	2,54	0,58	0,17	0,60	-	15-20	80-100	48	0,12	40
Tomate												
Pecíolo	2,6-5	0,60-0,80	7,0-9,0	1,5-3,0	0,50-0,90	0,45-0,50	-	35-50	60-75	95-160	-	125-140
Limbo foliar	4-5	0,55-0,70	3,0-6,0	2,3-4,6	0,50-0,75	-	-	25-40	260-360	290-300	-	35-40
Folha	5	0,25	3,60	-	0,60	0,80	-	-	180	280	-	30-60

Fonte: Adaptado de Novais et al., 2007.

8 FERTILIZANTES

8.1 CLASSIFICAÇÃO DOS FERTILIZANTES

Os fertilizantes minerais são constituídos por compostos inorgânicos, que podem ser naturais ou produzidos a partir de matérias-primas na indústria. A classificação deles engloba fertilizantes simples (composto por apenas um composto químico, contendo um ou mais nutrientes), mistos (mistura física de dois ou mais fertilizantes simples, complexos ou ambos) e complexos (formado por dois ou mais compostos químicos, resultantes de reação química de seus componentes, contendo dois ou mais nutrientes).

Os fertilizantes sólidos ainda podem ser classificados em mistura de grânulos (mistura de matérias-primas granuladas); mistura granulada (mistura de fertilizantes em pó no mesmo grânulo) e complexo granulado (mistura de matérias-primas que resultam em novo composto químico). Os fertilizantes líquidos são classificados como soluções (fertilizantes líquidos na forma de soluções verdadeiras); suspensões (fertilizantes líquidos com a presença de uma fase sólida dispersa em meio líquido; exemplos: URAN e Aquamônia).

As características que permitem descrever os fertilizantes são: solubilidade, higroscopicidade, salinidade, reação ácida ou alcalina e densidade. A **solubilidade** de um fertilizante pode ser expressa em água (fertilizantes nitrogenados e potássicos), em água, citrato neutro de amônio e ácido cítrico (fertilizantes fosfatados). A **higroscopicidade** refere-se à capacidade de o fertilizante absorver água da atmosfera e está relacionada à compatibilidade entre fertilizantes na produção de misturas. Fertilizantes altamente higroscópicos como a ureia podem ser revestidos por materiais como o enxofre, polímeros, formaldeídos e fosfatos naturais para evitar esse fator que impede a sua mistura com determinados fertilizantes. A **salinidade** consiste na capacidade do fertilizante em aumentar a pressão osmótica do meio, relativa ao nitrato de sódio, cujo valor de referência é igual a 100%. A **reação** é a capacidade que o fertilizante tem de acidificar ou alcalinizar o meio. O poder de acidificação é determinado em termos da quantidade de CaCO_3 necessária para corrigir a acidez; o poder de alcalinidade é expresso em termos da quantidade de CaCO_3 , que gera alcalinidade equivalente à gerada pelo fertilizante. A **densidade** relaciona massa e volume do fertilizante e é importante para o dimensionamento de áreas de armazenamento e embalagens. Em fertilizantes líquidos a densidade afeta diretamente a fluidez e a viscosidade.

8.2 FERTILIZANTES SOLÚVEIS

Os fertilizantes solúveis são usados na produção de hortaliças via água de irrigação, prática denominada de fertirrigação. Dentre as vantagens da fertirrigação é possível citar menor uso de mão de obra, redução dos custos de aplicação, maior eficiência do uso dos nutrientes, flexibilidade de aplicação e possibilidade de aplicação de micronutrientes após o plantio.

Para a prática da fertirrigação, o primeiro passo é fazer análise da água, quanto às suas características físicas, químicas e biológicas. A qualidade da água de irrigação é avaliada por meio dos minerais dissolvidos e sais, quantificados por meio de análises químicas. A somatória total dos sais presentes na água tem relação direta com a condutividade elétrica. É desejável que a água tenha CE menor que 0,5 dS/m. Para o preparo das soluções nutritivas há necessidade de se utilizar fertilizantes altamente solúveis em água a fim de não ocorrer entupimento nos sistemas de irrigação. Além da solubilidade, as características a serem levadas em consideração para a escolha dos fertilizantes são: pureza; concentração e forma do elemento no fertilizante; índice de salinidade; índice de acidez; condutividade elétrica (CE) do fertilizante; densidade (fertilizantes líquidos); compatibilidade entre os fertilizantes.

Os fertilizantes solúveis em água devem ter resíduos insolúveis inferiores a 0,5%. Elevado teor de resíduo insolúvel ocasiona, ao longo do tempo, entupimento do sistema de irrigação, além de poder favorecer a precipitação de nutrientes, que poderiam ser absorvidos pelas plantas.

Os fertilizantes nitrogenados são os mais solúveis, sendo o N apresentado nas seguintes formas: N-NO_3^- , N-NH_4^+ , N-NH_2 . As fontes fosfatadas são as de menor solubilidade e o fosfato poderá reagir com os íons Ca caso a água seja rica nesse nutriente, favorecendo o entupimento do sistema. Os fertilizantes fosfatados usados para fertirrigação são os ortofosfatos. A maior parte dos fertilizantes como fonte de P contém flúor (F), que pode ser tóxico para algumas plantas, principalmente de espécies que produzem bulbos e tubérculos. Além disso, os polifosfatos também têm sido produzidos pela indústria, estes têm sido mais comumente utilizados na base de plantio.

Quanto às fontes potássicas, os fertilizantes à base de cloreto e nitrato são os mais solúveis, porém o cloro pode ser tóxico em altas concentrações e ser tóxico para o desenvolvimento de culturas sensíveis a esse elemento. Os fertilizantes potássicos, na sua maioria, são à base de nitrato e sulfatos. O KCl normalmente não é usado para o crescimento de plantas em casa-de-vegetação. O seu uso é feito quando a concentração na água primária é muito baixa.

Os fertilizantes contendo magnésio são à base de nitrato e sulfatos. Porém o sulfato de magnésio tem uma solubilidade muito lenta em água fria. Assim, o nitrato de magnésio normalmente é utilizado. Os fertilizantes contendo Ca são à base de nitratos, sendo que em algumas situações o cloreto de Ca é adequado para determinados grupos de plantas.

Os micronutrientes também são aplicados via fertirrigação, mas sua disponibilidade é fortemente afetada pelo pH. Valores de pH elevados reduzem a disponibilidade de todos os micronutrientes, exceto Mo. Normalmente os fertilizantes contendo micronutrientes são à base de sulfatos, embora o Cl e o nitrato também são formas adequadas. O íon acompanhante, porém, não

é importante porque as quantidades adicionadas são insignificantes. O Fe é fornecido a partir de quelatos produzidos artificialmente, cujo tipo de quelato usado será determinado pelo pH do meio de cultivo. A ligação ortho-ortho nos quelatos de ferro permitem maior estabilidade e proteção do ferro, aumentando a absorção desse elemento pelas plantas, como o Fe ligado ao HBED (Fe – Ácido Diacético bis (2-hidroxibenzil) Etilenodiamino) e EDDHA (Fe – Etileno Diamino Di-orto-Hidroxi Fenil Acetato) e EDDHMA (Fe – Etileno Diamino Di-orto-Hidroxi paraMetil Fenil Acetato). Desses agentes quelatizantes, a estabilidade do Fe ligado ao HBED é maior em uma ampla faixa de pH em relação aos demais.

O índice salino representa a capacidade do fertilizante em aumentar a pressão osmótica do meio de cultivo em relação ao nitrato de sódio, cujo valor é igual a 100. Dessa forma, quanto mais baixo for o índice salino, menor será o poder de salinização dele. Fertilizantes como fonte de fósforo apresentam os menores valores de índice salino. Fertilizantes como cloreto de potássio e nitrato de amônio, por sua vez, apresentam índices salinos superiores a 100. Para culturas que são mais sensíveis ao excesso de sais, devem-se adotar fertilizantes com menor índice salino para o manejo da fertirrigação.

Quanto ao índice de acidez, os fertilizantes podem alterar o pH do meio. Os fertilizantes nitrogenados amoniacais, a ureia e o enxofre elementar são acidificantes e podem ser usados para o controle do pH em água com pH mais alcalino.

A CE de cada fertilizante será somada à CE presente na água para o preparo de soluções nutritivas, resultando na CE final que não deverá ultrapassar o limite de CE da espécie/cultivar a ser produzida. Quando a CE ultrapassa o limite tolerável para a planta ocorre redução na produtividade e qualidade do produto a ser comercializado, que depende do aumento da salinidade no meio de cultivo. Espécies como o pimentão, tomate e alface são consideradas moderadamente sensíveis à salinidade, tolerando faixas entre 1,3-1,8 dS/m; 2-3,5 dS/m e 1-2 dS/m.

A compatibilidade entre fertilizantes é muito importante no momento da elaboração de uma solução nutritiva, pois misturas incompatíveis geram precipitados como a mistura de fertilizantes contendo Ca e Mg com fosfatos; Ca com sulfatos. Assim, nitrato de cálcio, nitrato de magnésio, sulfato de magnésio não devem ser misturados com fosfato monoamônico (MAP), fosfato diamônico (DAP) ou qualquer outro fertilizante que contenha fosfato. Da mesma forma, fertilizantes como o nitrato de cálcio não deve ser misturado com fertilizantes que contenham sulfatos como sulfato de potássio, sulfato de magnésio, sulfato de cobre, entre outros (Tabela 7).

Tabela 7– Compatibilidade entre fertilizantes.

	Ureia	Nitrato amônio	Sulfato amônio	Nitrato de cálcio	Nitrato de potássio	Cloreto de potássio	Sulfato de potássio	Fosfato de amônio	Fe, Zn, Cu, Mn sulfato	Fe, Zn, Cu, Mn quelato	Ácido fosfórico	Ácido sulfúrico	Ácido nítrico
Ureia	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Nitrato amônio	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Sulfato amônio	C	C	C	I	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Nitrato cálcio	C	C	I	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Nitrato potássio	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Cloreto de potássio	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Sulfato de potássio	C	C	PC	I	C	PC	C	C	C	C	C	C	C
Fosfato de amônio	C	C	C	I	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Fe, Zn, Cu, Mn sulfato	C	C	C	I	C	C	PC	I	C	C	C	C	C
Fe, Zn, Cu, Mn quelato	C	C	C	PC	C	C	C	PC	C	C	C	C	C
Sulfato de magnésio	C	C	C	I	C	C	PC	I	C	C	C	C	C
Ácido fosfórico	C	C	C	C	C	C	C	C	I	PC	C	C	C
Ácido sulfúrico	C	C	C	I	C	C	PC	C	C	C	C	C	C
Ácido nítrico	C	C	C	C	C	C	C	C	C	I	C	C	C

I = incompatível; PC = parcialmente compatível (solubilidade reduzida) e C = compatível

8.3 FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO CONTROLADA

Os fertilizantes de liberação lenta (SRFs) e de liberação controlada (CRFs) não estão claramente definidos na literatura, mas esses materiais são classificados dessa forma por serem manufaturados por materiais e técnicas distintas com propriedades diferentes. O termo CRF foi aceito quando aplicado aos fertilizantes onde os fatores como a taxa, o padrão e a duração da liberação dos nutrientes são bem conhecidos e controláveis durante o preparo do CRF. Os SRFs, entretanto, são fortemente afetados pelas condições de manipulação, tais como armazenamento, transporte e distribuição no campo, teor de umidade do solo, temperatura e atividade biológica (RABAN et al., 1997).

Eles estão disponíveis no mercado desde 1950, embora a maioria dos avanços no desenvolvimento desses produtos ocorreu entre 1980 e 1990. O primeiro fertilizante de liberação controlada tornou-se comercialmente disponível como fonte de nitrogênio. Posteriormente surgiram os fertilizantes como fontes de P, K e outros elementos, incluindo os micronutrientes (OBREZA et al., 2006).

Dentre os materiais empregados na fabricação dos fertilizantes, o enxofre é o mais comum, principalmente, para cobertura da ureia, por ser um material de baixo custo e apresentar baixo nível de higroscopicidade.

Os fertilizantes cobertos com coberturas não orgânicas, como a ureia, coberta com enxofre, dependem da qualidade da cobertura para a liberação do N. Nesse tipo de material, há três tipos de coberturas: danificadas por rachaduras, danificadas por rachaduras que foram cobertas por ceras durante o processo de fabricação, e espessas e perfeitas. Os fertilizantes cobertos com coberturas danificadas liberam rapidamente a ureia quando em contato com a água.

Os fertilizantes de liberação controlada ainda são pouco utilizados na produção de hortaliças em virtude do seu preço mais elevado. Além disso, as taxas de liberação dos nutrientes dos CRFs sofrem influência da temperatura, o que tem ocasionado resultados variáveis quanto à sua eficiência no aumento de produtividade.

8.4 BIOESTIMULANTES

A demanda por alimentos irá aumentar nos próximos anos, com diminuição da disponibilidade *per capita* de terra agricultável e água, e aumento de estresses abióticos e bióticos. Esse crescimento gera a necessidade de aumento da produção agrícola, mas com otimização dos recursos naturais e redução dos efeitos adversos do ambiente.

As plantas estão sujeitas a várias condições de estresse por salinidade, *déficit* hídrico, temperaturas extremas, metais tóxicos e radiação ultravioleta. Esses fatores ambientais limitam o crescimento e a produtividade das plantas em níveis diferentes, dependendo da severidade do estresse. Uma das respostas das plantas ao estresse é a produção de espécies de oxigênio reativas (ROS), como $\text{OH}\cdot$, $\text{O}_2\cdot^-$, H_2O_2 , entre outras.

Essas espécies são consideradas danosas por causarem estragos através da peroxidação dos componentes lipídicos da membrana celular e também através da interação direta com várias macromoléculas. As células têm diferentes mecanismos de adaptação para manter ROS em níveis controlados. Entretanto, concentração baixa de ROS participa em um mecanismo de transdução de sinal.

Esses ROS são eliminados por metabolitos de baixo peso molecular como glutathione, ácido ascórbico, α -tocoferol e enzimas antioxidativas como catalase, ascorbato peroxidase e superóxido dismutase. Entretanto, em condições de elevado estresse a geração de radicais livres excede a capacidade antioxidativa da célula, que contribui para gerar efeitos adversos no crescimento das plantas.

Em resposta aos diferentes estresses, as plantas acumulam grandes quantidades de diferentes tipos de solutos compatíveis, que são compostos orgânicos altamente solúveis de baixo peso molecular e usualmente não tóxicos, em altas concentrações nas células. Esses solutos fornecem proteção às plantas do estresse, pela sua contribuição ao ajuste osmótico celular, desintoxicação,

proteção da integridade da membrana e estabilização das enzimas-proteínas. Os solutos incluem a prolina, polyols, trealose e compostos de amônio quaternário tais como glicina, betaina, prolina betaina e pipercolato betaina.

Nesse contexto, os bioestimulantes constituem em alternativas para ativar mecanismos de defesa das plantas, que atuam na diminuição dos efeitos provocados por fatores abióticos e bióticos, como temperaturas elevadas, estresse hídrico, ataques por pragas e doenças.

Os bioestimulantes são substâncias e ou micro-organismos que estimulam processos naturais quando aplicados às plantas ou rizosfera para aumentar a absorção de nutrientes, tolerância ao estresse biótico e abiótico, e qualidade dos produtos. Os bioestimulantes não tem ação direta sobre as pragas e doenças, por isso, não podem ser classificados como pesticidas. Os bioestimulantes têm sido obtidos de diferentes materiais orgânicos e incluem substâncias húmicas, materiais orgânicos complexos, elementos químicos benéficos, peptídeos, sais inorgânicos, extratos de algas, antitranspirantes, aminoácidos e outras substâncias contendo nitrogênio.

a) Substâncias húmicas

Substâncias húmicas são materiais orgânicos resultantes de reações de vários processos bióticos e abióticos. Esse conjunto complexo de moléculas derivadas de materiais vegetais e animais representa um dos materiais orgânicos mais abundantes da crosta terrestre.

As categorias gerais de substâncias húmicas são: ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas. Elas apresentam em sua composição proteínas, carboidratos, biopolímeros alifáticos e ligninas.

No solo, os ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas apresentam as seguintes funções: afetam a fisiologia vegetal, a composição e a função dos micro-organismos da rizosfera; controlam a disponibilidade de nutrientes; são responsáveis pelas trocas de oxigênio e carbono entre o solo e a atmosfera; participam da transformação e transporte de elementos tóxicos.

Pesquisas mostram que as substâncias húmicas interferem positivamente na biologia e fisiologia das plantas, principalmente devido aos hormônios presentes na estrutura dos húmus (PIZZEGHELLO et al., 2001). Técnicas de biologia molecular e genética têm confirmado a presença do ácido indolacético em substâncias húmicas. O ácido húmico melhora o crescimento radicular pela liberação de compostos a base de auxinas que induzem a atividade da H^+ -ATPase na membrana plasmática de células radiculares, resultando na acidificação do apoplasto e levando ao afrouxamento das paredes celulares e alongação das células das raízes. Substâncias húmicas também podem apresentar giberelinas e citocininas.

Os ácidos húmicos são solúveis em meio básico e precipitam em meio ácido. Eles possuem maior peso molecular que os ácidos fúlvicos, que são solúveis tanto em meio ácido como em meio básico. As características estruturais específicas dos ácidos húmicos e fúlvicos variam de acordo com a fonte do material orgânico e o tempo de sua transformação. Os ácidos fúlvicos tem maior acidez total, maior número de grupos carboxílicos, maior adsorção e capacidade de troca de cátions que os ácidos húmicos. Eles são responsáveis pela quelação e mobilização de íons metálicos incluindo Fe e Al. Como são moléculas de baixo peso molecular, elas podem passar através de microporos

de sistemas de membranas artificiais ou biológicas. A capacidade combinada de ácidos fúlvicos e nutrientes quelatos, tais como Fe, se movem através das membranas, sugerindo que os ácidos fúlvicos podem apresentar papel similar aos quelatos naturais na mobilização e transporte de Fe e outros micronutrientes. As huminas são materiais complexos, quimicamente heterogêneos, inativos, insolúveis em soluções ácidas e alcalinas. As substâncias húmicas do solo possuem tamanho menor que 250 μm , apresentando eleva superfície específica, resultando em substâncias de alta reatividade. No solo, elas apresentam várias funções, dentre as quais é possível citar:

- Em função da baixa densidade desses materiais orgânicos, grande estabilidade dos complexos argilo-húmicos (huminas) e por sua característica, de flocculação das partículas dos solos, as substâncias húmicas aumentam a porosidade e conseqüentemente diminuem a densidade aparente dos solos.
- As substâncias húmicas e os minerais de argila são dois agentes cimentantes que mais contribuem para a agregação do solo pela formação de complexos estáveis que favorecem sua estruturação.
- As substâncias húmicas são escuras devido à estrutura tridimensional delas, que apresentam grupos funcionais aromáticos e alifáticos conjugados que absorvem melhor os raios infravermelhos, favorecendo a elevação da temperatura do solo, o que favorece a germinação, crescimento e atividade microbiana.
- As substâncias húmicas, podem ligar-se e reter os ânions (NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , OH^- , PO_4^{2-} , CO_3^-) por possuir grupos amino, amido, ligações peptídicas, polipeptídicos e outros nitrogenados. Esses ânions, ligados diretamente ou através de metais no caso dos fosfatos, são facilmente assimilados pelas plantas.
- As substâncias húmicas possuem elevada capacidade de retenção de água, pela agregação das moléculas em função das suas ligações covalentes com o hidrogênio, formando estruturas esponjosas, com grandes espaços vazios, que retêm a água no solo.
- As substâncias húmicas podem formar complexos ou quelatos relativamente estáveis com cátions como Zn^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} e Fe^{2+} , aumentando sua disponibilidade para as plantas;
- A degradação das substâncias húmicas no solo libera compostos como CO_2 , H_2O , NO_3^- , PO_4^{2-} , SO_4^{2-} , constituindo-se em fonte desses nutrientes no solo.

Minérios de lignitos altamente oxidados, ricos em ácidos húmicos e fúlvicos, conhecidos como leonardita aplicados no solo tem resultado em maior absorção de nutrientes pelas plantas, melhoria da estrutura do solo, com efeitos diretos na produção, produtividade e qualidade das culturas.

Um dos benefícios importantes dos ácidos húmicos para as plantas é a disponibilização do fósforo adsorvido na fração argila ou complexado com íons, como o fosfato cálcico, pelo fato dos ácidos húmicos complexarem o cálcio solúvel e protegerem os fosfatos da interação cálcio-fosfato, e pela ação dos grupos funcionais amina, na adsorção do ânion fosfato, deixando-o disponível para absorção pelas plantas.

b) Aminoácidos

Os aminoácidos são mais conhecidos como constituintes das proteínas e seu papel central na fisiologia celular e na planta é muitas vezes esquecido. O metabolismo dos aminoácidos é fortemente ligado ao metabolismo de carboidratos, amônio (absorvido e sintetizado a partir de nitrato), síntese de proteínas e metabolismo secundário.

A biossíntese de aminoácidos usa compostos do metabolismo de carboidratos, e a degradação dos aminoácidos leva a vários metabolitos que são usados no ciclo do ácido cítrico como uma fonte de energia.

Os aminoácidos desempenham papéis importantes em plantas como compostos precursores para a síntese de várias classes de metabólitos secundários (por exemplo fenilpropanóides, alguns alcaloides, e glucosinolatos), que atuam na síntese de compostos que fazem parte da estrutura das plantas (por exemplo, lignina), da defesa (por exemplo glucosinolatos, nicotina), proteção (por exemplo, pigmentos), entre outros. Finalmente, os aminoácidos são utilizados como condutores de nitrogênio assimilado entre vários órgãos através do floema e do xilema.

Os aminoácidos têm resultado em efeitos positivos no crescimento das plantas, produtividade e qualidade das culturas, sendo fundamentais no processo de formação dos tecidos vegetais e síntese de clorofilas, além de serem precursores ou ativadores de hormônios vegetais e substâncias de crescimento, como ácido indolacético (OPIK et al., 2005).

As rotas metabólicas para a síntese de todos os aminoácidos estão presentes nas folhas (FOYER et al., 2003), onde o N reduzido está prontamente disponível. O amônio é assimilado através da sintase glutamato ou ciclo GS-GOGAT. Primeiramente, amônio e glutamato reagem para formar glutamina, catalisado pela sintase glutamina. Então, o grupo amino da glutamina é transferido para 2-oxoglutarato para produzir duas moléculas de glutamato, catalisado pela sintase glutamato (GOGAT) (FORDE; LEA, 2007). O grupo α -amino do glutamato pode ser transferido para oxaloacetato pela aminotransferase aspartato para produzir aspartato e a transferência do grupo amida da glutamina para aspartato, pela sintase asparagina, gera glutamato e asparagina.

A asparagina é usada como principal fonte armazenada de N e transporte de moléculas em muitas espécies vegetais, porque ela é relativamente inerte e tem uma relação N:C relativamente alta (2:4) comparada com outros aminoácidos (LEA et al., 2007). Algumas variedades de batata também acumulam asparagina em resposta à deficiência severa de enxofre, porém outras variedades acumulam glutamina (MUTTUCUMARU et al., 2013).

Os aminoácidos podem ser usados para substituir parcialmente o nitrato ou através de pulverizações foliares, em muitas plantas. Na maioria dos casos, a aplicação de aminoácidos pode levar a redução do conteúdo de nitrato e aumento do conteúdo total de N nas plantas.

9 CONCLUSÃO

O conhecimento das funções dos nutrientes e a maneira correta de identificar sua falta ou excesso são primordiais para obtenção de elevada produtividade e produtos de qualidade. Para as culturas hortícolas que, de um modo geral, apresentam alto investimento, a minimização de riscos está atrelada à adequada nutrição das plantas. Dessa forma, o treinamento para identificação do estado nutricional das plantas se faz essencial no sistema de cultivo.

REFERÊNCIAS

- AVERRE, C. North Carolina State University, Bugwood.org. Disponível em: <<https://www.forestryimages.org/>>. Acesso em: 06 jun. 2017.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas**: princípios e perspectivas. 2. ed. Londrina: Planta, 2004. 403 p.
- FORDE, B. G.; LEA, P. J. Glutamate in plants: metabolism, regulation, and signalling. **J Exp Bot.**, 2007. v. 58, p. 2.339-2.358.
- FOYER, C. H., et al. Markers and signals associated with nitrogen assimilation in higher plants. **J Exp Bot.**, 2003. v. 54, p.585-593.
- GALLO, L. A.; BASSO, L. C. **O metabolismo do nitrogênio e ciclo do nitrogênio**. Disponível em: <<http://docentes.esalq.usp.br/luagallos/nitrogenio.htm>> Acesso em: 2 dez. 2015.
- HOLMES, G. California Polytechnic State University at San Luis Obispo, Bugwood.org. Disponível em: <<https://www.forestryimages.org/>>. Acesso em: 06 jun. 2017.
- LANGSTON, D. B. University of Georgia, Bugwood.org. Disponível em: <<https://www.forestryimages.org/>>. Acesso em: 06 jun. 2017.
- LEA, P. J., et al. Asparagine in plants. **Ann Appl Biol.**, 2007. v. 150, p. 1-26.
- LUCENA, J. J. Methods of diagnosis of mineral nutrition of plants: a critical review. **Acta Hortic.**, 1997. v. 448, p. 179-192.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição de plantas**. São Paulo: Agrônoma Ceres, 1980. 251 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Elsevier, 2012. 651 p.
- MUTTUCUMARU, N.; et al. Photosynthetic assimilation of ¹⁴C into amino acids in potato (*Solanum tuberosum*) and asparagine in the tubers. **Planta**, 2013. v. 239, p. 161-170.
- NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.
- OBREZA, T. A. et al. **Advancement with controlled-release fertilizers for Florida citrus production**: 1996-2006. Florida: University of Florida-Institute of Food and Agricultural Sciences, Soil and Water Science Department, SL-243, 2006.
- OLIVEIRA, E.L. **Sugestão de Adubação e Calagem para culturas de interesse Econômico no Estado do Paraná pela Circular Técnica 128**. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 2003. 30 p.
- ÖPIK, H. et al. **The physiology of flowering plants**. Cambridge: University Press, 2005. 392 p.
- PIZZEGHELLO, D. et al. Hormone-like activity of humic substances in *Fagus sylvatica* L. forests. **New Phytologist**, 2001. v. 151, p. 647-657.

RABAN, S.; ZEIDEL, E.; SHAVIV, A. Release mechanisms controlled release fertilisers in practical use. In: MORTWEDT, J.J.; SHAVIV, A. (Eds.) **Third Int. Dahlia Greidinger Sym. on Fertilisation and The Environment**. Israel: Technion Haifa, 1997. p. 287-295.

RAJI, B.; CANTARELLA, H. et al. **Manual de Recomendação de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo - Boletim Técnico 100**. Campinas: FUNDAG, 1997. 290 p.

RIBEIRO, A.C. et al. (Ed). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade de Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 259 p.

SBCS – Sociedade Brasileira de Ciência do solo. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre: Núcleo Regional do Sul - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400 p.

SILVA, J. B. C. et al. **Cultivo de tomate para industrialização**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Brasília, 2003. Disponível em: <<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>> Acesso em: 10 fev. 2016.

TIGER SUL. **Micronutrient Deficiency Images**. Disponível em <<http://www.tigersul.com/tiger-university/plant-diagnostics/deficiency-images/>>. Acesso em: 09 jun. 2017

OLIVEIRA, V. R. Sintoma de deficiência de cobre. In: SOUZA, R. B. **Árvore do conhecimento: Cebola**. Sintomas de deficiências nutricionais. Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC). Brasília. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cebola/arvore/CONT000gusd7pip02wx7ha0g934vgi0a6eu6.html>> Acesso em: 12 maio de 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre: ARTMED, 2013, 918 p.



BIBLIOGRAFIA

BARKER, V. A.; PILBEAM, D. J. **Handbook of Plant Nutrition**. New York, Taylor & Francis Group, LLC, 2007. 613 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas**. 2.ed. Londrina, Editora Planta, 2004. 403p.

FERNANDES, M. S., eds. **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 432p.

FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (Eds.) **Micronutrientes na Agricultura**. Piracicaba, POTAFOS/CNPq, 1991. 734 p.

FILGUEIRA, F.A.R. **Novo Manual de Olericultura**. Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2007. 421 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London, Elsevier Ltda., 2012. 651 p.

NOVAIS, R. F., ALVAREZ, V. H. V. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.



SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL

Administração Regional do Estado do Paraná

Rua Marechal Deodoro, 450 - 16º andar

Fone: (41) 2106-0401 - Fax: (41) 3323-1779

80010-010 - Curitiba - Paraná

e-mail: senarpr@senarpr.org.br

www.sistemafaep.org.br



Facebook
Sistema Faep



Twitter
SistemaFAEP



Youtube
Sistema Faep



Instagram
sistema.faep



Linkedin
sistema-faep



Flickr
SistemaFAEP