

## Capítulo 4 - Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral

Marcelo Augusto Batista  
Tadeu Takeyoshi Inoue  
Michel Esper Neto  
Antonio Saraiva Muniz

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

BATISTA, M.A., INOUE, T.T., ESPER NETO, M., and MUNIZ, A.S. Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. In: BRANDÃO FILHO, J.U.T., FREITAS, P.S.L., BERIAN, L.O.S., and GOTO, R., comps. *Hortaliças-fruto* [online]. Maringá: EDUEM, 2018, pp. 113-162. ISBN: 978-65-86383-01-0. <https://doi.org/10.7476/9786586383010.0006>.

---



All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença [Creative Commons Atribuição 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia [Creative Commons Reconocimiento 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

# Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral

Marcelo Augusto Batista, Tadeu Takeyoshi Inoue, Michel Esper Neto e Antonio Saraiva Muniz

## 1 Introdução

O estudo da fertilidade do solo, dos fertilizantes, da adubação e da nutrição mineral de plantas tem sido abordado por vários autores brasileiros e internacionais de forma extensiva e completa. Dessa forma, o objetivo deste capítulo é abordar, sucintamente, os principais aspectos envolvidos para o conhecimento do solo, dos fertilizantes e da nutrição mineral para o bom desenvolvimento de hortaliças-fruto de forma geral.

A demanda de nutrientes por este grupo de plantas é alta, sendo necessário, para produções substanciais, o uso adicional de fertilizantes orgânicos e minerais. Contudo esse uso pode dar-se de forma desordenada, com adubação excessiva, podendo resultar em desequilíbrios, caracterizados pelo excesso de alguns nutrientes e/ou deficiência de outros. Isso acarreta prejuízos financeiros por gastos desnecessários, baixas produções e produtos com menor qualidade nutricional e visual. O uso desordenado de fertilizantes pode também trazer problemas ambientais, como contaminação do solo e da água dos lençóis freáticos, mananciais, nascentes, córregos e rios. Assim, o conhecimento do solo, da capacidade de este fornecer nutrientes e água para as plantas e a demanda nutricional das mesmas são quesitos indispensáveis para o uso adequado dos recursos naturais, a fim de obter as melhores respostas em crescimento e em desenvolvimento das culturas, além de considerar os aspectos econômicos e socioambientais.

Os nutrientes no solo apresentam comportamentos diversos, e o conhecimento das especificidades de cada um possibilita a previsão desses comportamentos em cada cenário de manejo. Os nutrientes que se encontram no solo podem seguir diversas rotas, tais como: serem perdidos por erosão, lixiviação, volatilização, fixação nas argilas do solo, imobilização e absorvidos pelas plantas, desempenhando, nesse caso, seu principal papel. Associado a isso, a exportação dos nutrientes absorvidos pelas culturas juntamente com o produto para fora das áreas de cultivo contribuem para aumentar a complexidade às suas dinâmicas.

Dessa forma, este capítulo abordará questões associadas aos conceitos sobre a química da sorção dos nutrientes catiônicos e aniônicos no solo, a apresentação de cada um dos macro e micronutrientes, informando os principais tópicos associados à dinâmica do nutriente no solo e na planta e, por último, discussões sobre os principais fertilizantes e as formas de adubação.

## 2 Conceitos sobre fertilidade do solo

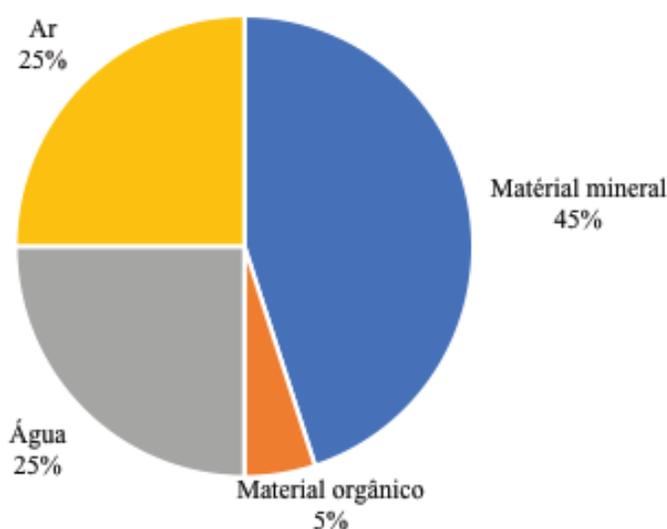
### 2.1 Solo como meio para o desenvolvimento de plantas

O solo é o principal e mais importante meio para desenvolvimento de plantas, porém não é a única forma, visto a possibilidade de as plantas poderem ser desenvolvidas em soluções nutritivas (hidroponia) ou em substratos orgânicos, nos quais recebem os nutrientes por meio de irrigação (fertirrigação).

O solo é produto do intemperismo das rochas. O intemperismo pode ser químico, físico e biológico. Vários fatores e processos atuam conjuntamente, influenciando a formação de uma classe específica de solo. Os fatores que influenciam na formação do solo são o material de origem (rocha ou material orgânico), o clima local, a atividade biológica (macro, meso e microfauna e vegetais), em um determinado relevo e durante um período de tempo. Já os processos que atuam para a diferenciação das camadas e/ou horizontes do solo são os fenômenos de perdas, adição, translocação e transformação dos materiais que ocorrem no perfil do solo. A interação desses fatores formará solos com diferentes fertilidades, cores, profundidades, entre outros atributos.

Tomando uma amostra indeformada de solo, pode-se afirmar que o solo é composto por três fases: sólida, líquida e gasosa (Figura 1). Essas três fases podem se alterar em decorrência de eventos pedoclimáticos, bem como durante o processo de cultivo e manejo do solo. A fase sólida é composta de uma porção mineral e outra orgânica. De forma geral, a maior parte dos solos é composta por minerais (> ou igual a 45% da fase sólida) e a menor parte por compostos orgânicos (< ou igual a 5% da fase sólida). Exceção à regra se dá na classe dos Organossolos, que apresentam participação mais generosa da fração orgânica.

Composição Ideal dos Solos



**Figura 1** - Composição ideal do solo, com suas respectivas participações do material mineral, material orgânico e espaços vazios (poros do solo) ocupados com água ou ar.

Fonte: Os autores.

As fases gasosa e líquida do solo ocupam os espaços entre as partículas do solo, os chamados poros do solo, que podem ser classificados de forma simplificada como macroporos ( $\emptyset$  efetivo > 0,08 mm) e microporos ( $\emptyset$  < 0,08 mm). Os poros maiores possibilitam a drenagem do excesso de água no solo e são ocupados geralmente com ar. Os poros menores são responsáveis pelo armazenamento de água no solo. Tanto a água, quanto o ar do solo são importantes para o processo

produtivo. A dinâmica de ocupação desses espaços no solo pela água ou ar depende das condições pedoclimáticas e de manejo do solo. Por exemplo, imediatamente após uma chuva com elevado volume e intensidade ou logo após a irrigação, provavelmente quase a totalidade dos poros do solo poderão estar ocupados com água. Porém, se o solo estiver passando por um período longo de seca, provavelmente a totalidade dos espaços estarão ocupados com ar.

A fase líquida ou a solução do solo é composta pela água do solo mais elementos minerais e ar que nela se encontram dissolvidos. Da solução do solo as plantas absorvem a água e, juntamente com a ela, os nutrientes essenciais para o seu adequado desenvolvimento. A fase gasosa é conhecida como o ar do solo. Como o solo é um sistema aberto, o ar atmosférico interage diretamente como o ar do solo e vice-versa. Apesar disso, a composição do ar do solo é diferente do ar atmosférico, sendo as principais diferenças a maior concentração de CO<sub>2</sub> e a menor concentração de O<sub>2</sub> do ar do solo em relação ao ar atmosférico. Estas diferenças na composição do ar do solo se devem aos processos de respiração pelas raízes das plantas e pelos microrganismos do solo.

As partículas do solo, independentemente de sua composição química ou mineralogia, são classificadas quanto ao seu diâmetro efetivo (Tabela 1). A fração menor do que 2 mm é chamada de Terra Fina (TF). As frações mais grosseiras que a TF são as frações cascalho, calhau e matacões que, dependendo da quantidade, podem se tornar problema para o cultivo, dificultando o manejo e o crescimento de plantas. A definição das classes que compõem a TF segue a seguinte ordem decrescente: areia grossa, areia fina, silte e argila, conforme classificação proposta pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS).

**Tabela 1** - Classificação das partículas da terra fina seca ao ar (TFSA) solo de acordo com os tamanhos, conforme a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS)

| Frações do solo | Dimensões (mm)  |
|-----------------|-----------------|
| Areia Grossa    | 2-0,2           |
| Areia Fina      | 0,2-0,05        |
| Silte           | 0,05-0,002      |
| Argila          | < 0,002 ou 2 μm |
| Coloides        | < 0,001 ou 1 μm |

Fonte: Van Lier (2010).

A planta é composta por vários elementos. Mais de 96% em massa da composição elementar das plantas restringem-se a três elementos: carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), também conhecidos como elementos essenciais não-minerais, pois os mesmos originam-se do ar atmosférico e da água que as plantas absorvem principalmente via solo. Esses três elementos são metabolizados pelas plantas pelo processo da fotossíntese. O processo simplificado da fotossíntese ocorre conforme Reação 1.



Os outros 4% da massa das plantas são compostos por outros elementos conhecidos como elementos essenciais minerais, a saber: o nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e zinco (Zn). Estes ainda são divididos quanto à sua quantidade requerida pelas plantas, sendo denominado de macronutrientes, requeridos na magnitude de g kg<sup>-1</sup> (g de

elemento por kg de matéria seca das plantas), e micronutrientes, requeridos na magnitude de mg kg<sup>-1</sup>. Os macronutrientes são os elementos N, P, K, Ca, Mg e S e os micronutrientes são B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni e Zn. Os macronutrientes primários (N, P e K) são assim chamados porque as plantas tendem a usar em maior quantidade e por se tornarem deficientes mais rapidamente nos solos. Já os macronutrientes secundários (Ca, Mg e S) são necessários em quantidades menores do que os primários e tornam-se deficientes no solo mais lentamente. Ambos, porém, ambos são essenciais e eventualmente essas regras podem ser quebradas. Quando se discutem a qualidade e as características organolépticas de frutos, os macronutrientes secundários assumem importância semelhante à dos primários.

Outros elementos podem compor a planta, entretanto sem essencialidade definida, devendo ser destacado os nutrientes denominados benéficos, como cobalto (Co), sódio (Na), silício (Si) e vanádio (V).

## 2.2 Coloides e íons do solo

A fração quimicamente ativa do solo se encontra na fração argila do solo ( $\emptyset < 2\mu\text{m}$ ), pode apresentar partículas de tamanho diminuto ( $\emptyset < 1\mu\text{m}$ ) conhecidas como coloides. São conhecidos dois tipos de coloides nos solos, os coloides inorgânicos, formados pelos argilominerais (caulinita, vermiculita, montmorilonita etc.), pelos óxidos de ferro (hematita, goethita, maghemita etc.) e pelos óxidos de alumínio (gibbsita), e os coloides orgânicos, formados a partir da matéria orgânica do solo (MOS) e constituintes do húmus do solo. Os coloides inorgânicos são formados no processo de intemperismo das rochas durante a formação do solo, sendo produtos desse intemperismo. Já os coloides orgânicos são resultado dos processos de decomposição e de mineralização de materiais orgânicos no solo que irão formar um residual orgânico de composição química variável e mais resistente à mineralização, conhecido como húmus, constituído de substâncias húmicas propriamente ditas (dimensões coloidais, com cargas) e substâncias não-húmicas.

Esses coloides podem apresentar excedente de cargas negativas ou positivas que deverão ser contrabalanceadas pelos íons que se encontram dissolvidos na solução do solo. O excesso de carga líquida negativa dos coloides proporciona a aproximação de íons carregados positivamente ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  etc.) por mecanismo de atração eletrostática denominado de ligações eletrostáticas ou iônicas (ligações de baixa energia). Essa habilidade é conhecida como capacidade de troca catiônica (CTC), que é um dos atributos químicos mais importante do solo. Quando esses coloides apresentam excedente de cargas líquidas positivas, íons de carga negativa ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{MoO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ) irão se aproximar desses coloides pelos mesmos mecanismos de atração eletrostática e os coloides apresentarão capacidade de troca aniônica (CTA). Na maioria dos solos, predomina um balanço de cargas elétricas negativas, explicando a maior ênfase dada à CTC nos estudos de fertilidade do solo.

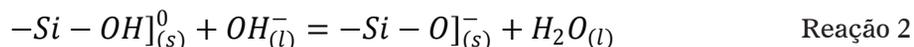
## 2.3 Origens das cargas do solo

A presença de cargas na superfície dos coloides inorgânicos tem origem da substituição isomórfica (cargas permanentes ou independentes de pH) e/ou pela protonação e desprotonação na superfície dos coloides inorgânicos e orgânicos (cargas variáveis ou dependentes de pH).

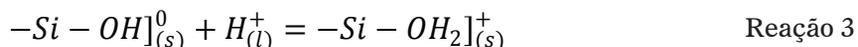
Durante a formação dos minerais da fração argila, dependendo da atividade dos íons presentes no meio, pode ocorrer a substituição de íons de raio iônico semelhante, mantendo-se a estrutura original (tetraedros ou octaedros), caracterizando a substituição isomórfica. Porém essa substituição pode ocorrer por íons de carga menor (p.e.  $\text{Si}^{4+}$  por  $\text{Al}^{3+}$  folhas tetraedrais ou  $\text{Al}^{3+}$  por  $\text{Mg}^{2+}$  e/ou  $\text{Fe}^{2+}$  folhas octaedrais), gerando, frequentemente, excedente de cargas negativas na estrutura do mineral, como vermiculita e montmorilonita. Já o aumento do pH da solução ao redor do coloide

pode levar à perda de prótons pelos grupos silanol (-Si-OH), aluminol (-Al-OH) e ferrol (-Fe-OH) nos colóides inorgânicos e carboxílico (R-COOH), fenólico (ϕ-OH) e álcool (R-OH) da superfície dos colóides e, por sua vez, gerar CTC (Reação 2). A diminuição do pH da solução do solo pode levar ao ganho de prótons pela superfície dos colóides, levando ao aparecimento da CTA (Reação 3).

Surgimento de cargas negativas (CTC) pela elevação do pH



Surgimento de cargas positivas (CTA) pela diminuição do pH



Os solos tropicais apresentam, em sua grande maioria, superioridade de colóides com cargas dependentes de pH, ou seja, a elevação do pH do solo é importante para a expressão da CTC. Outro fator importante que contribui para a CTC nos solos tropicais é a presença de MOS.

## 2.4 Adsorção de cátions e ânions

O processo de adsorção é importante para manutenção da fertilidade do solo, pois os íons adsorvidos podem ser deslocados para a solução do solo e ser absorvidos pelas plantas. Dessa forma, a adsorção de íons servirá como um grande armazém de elementos que poderão atender o suprimento das plantas, influenciando diretamente na capacidade produtiva de cada solo.

Os íons do solo (cátions e ânions) apresentam-se hidratados, sendo a molécula de água a ponte de ligações entre a superfície do colóide e o íon adsorvido. Esse tipo de adsorção é chamado de complexo de esfera externa (CEE), pois entre o íon adsorvido e a superfície do colóide existe, pelo menos, uma molécula de água. Esse tipo de ligação é fraca (ligação eletrostática), porque o íon por si só não consegue ligar-se especificamente em uma posição na superfície do colóide, o que faz que o mesmo seja facilmente trocável por outro íon de carga semelhante que esteja próximo à superfície do colóide. Na Figura 2, pode-se observar que um mesmo mineral (gibbsita ou superfície de uma caulinita) pode apresentar sítios com CTC e com CTA. Os íons  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  possuem um conjunto de moléculas de água que se orientam com o lado mais negativo para a superfície do cátion e o oposto ocorre com o íon  $Cl^-$ . O  $Ca^{2+}$  encontra-se adsorvido à superfície do mineral, apresentando-se trocável (formando um CEE); já os íons  $Mg^{2+}$  e  $Cl^-$  encontram-se próximo ao mineral sem ter uma relação química forte com a superfície deste (íons difusos).

## 2.5 Adsorção específica de ânions

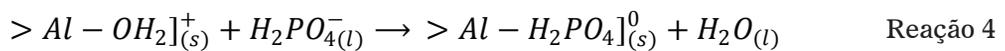
Quando há uma ou mais ligações diretas entre o íon adsorvido e a superfície do colóide, ou seja, sem existir molécula de água entre o íon e a superfície do colóide, esse tipo de adsorção é chamado de complexo de esfera interna (CEI). Nessa de adsorção, outros íons não podem substituir com facilidade o íon adsorvido, devido às ligações relativamente fortes formadas, que dependem da natureza do íon e do tipo do sítio (específico) do colóide. Exemplo desta ligação é a formação de CEI mono ou bidentada (binucleada) entre o ânion fosfato ( $H_2PO_4^-$ ) e a superfície de óxidos de ferro e alumínio (Figura 2). Os íons fosfato ( $H_2PO_4^-$ ) encontram-se parte na solução do solo (íon difuso) e parte fixado (formando um CEI). Nota-se que entre o íon fosfato e a superfície do mineral não há nenhuma molécula de água, ou seja, as ligações formadas nessa condição são mais fortes, fazendo que o mesmo se torne não trocável e, na maioria das vezes, não disponível (não lábil). Esse

fenômeno é muito importante para o ânion fosfato, cujos mecanismos de adsorção dominantes se dão por formação do CEI, que resulta em menor disponibilidade do elemento, caracterizando o que genericamente é denominado de fixação.

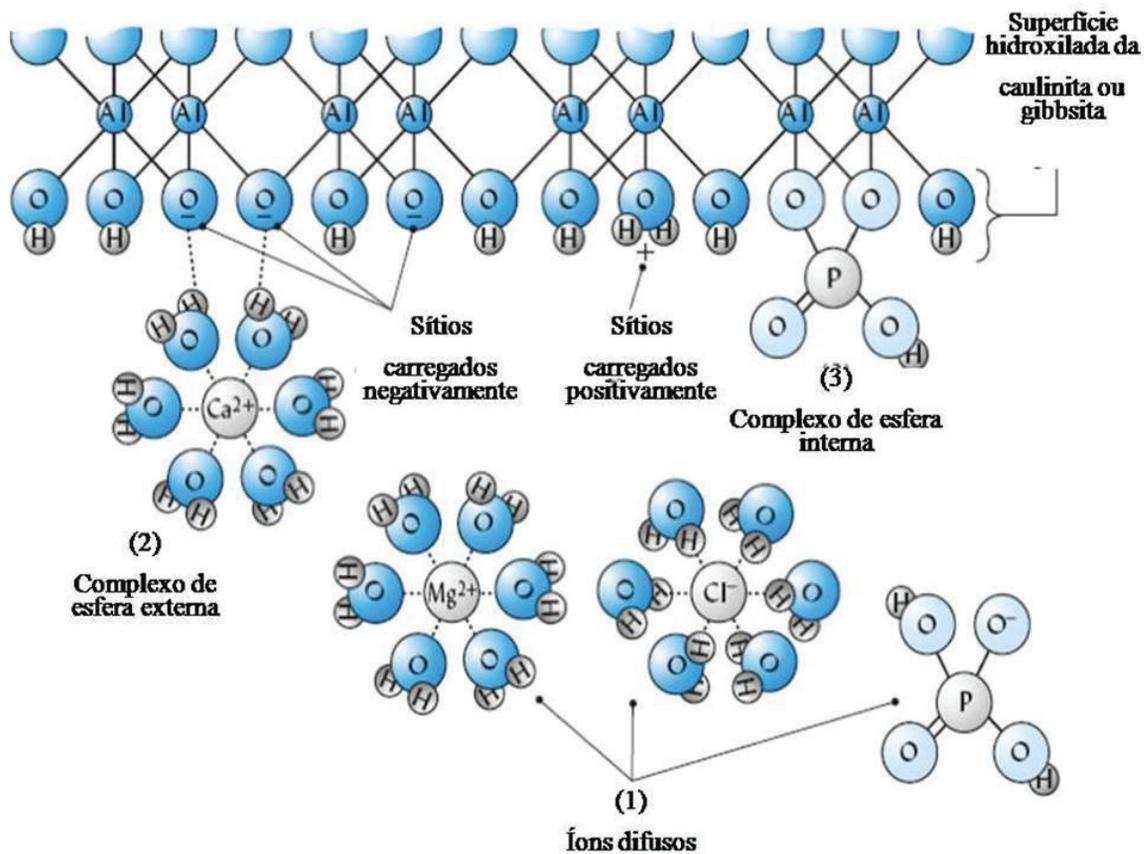
A formação de CEI de alguns ânions, como fosfato ( $H_2PO_4^-$ ), arseniatos ( $AsO_4^{3-}$ ), molibdatos ( $MoO_4^{2-}$ ) e sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ), na superfície de óxidos de ferro e alumínio em solos tropicais, é uma reação muito importante, visto a sua influência na disponibilidade desses elementos. A sequência de adsorção específica dos ânions, segundo Parfitt (1980), é a seguinte:

Fosfatos > molibdatos > fluoretos > sulfatos

A ilustração da formação do CEI do ânion  $H_2PO_4^-$  em hidróxidos de alumínio (p.e. gibbsita –  $Al(OH)_3$ ) é muito conhecida, conforme reação 4.



Esta reação irá diminuir a carga líquida positiva do colóide e deixará o ânion  $H_2PO_4^-$  fortemente ligado, podendo dificultar sua disponibilização para as plantas. Essa especificidade de ligação acarretará em baixos teores de P dissolvido na solução do solo, podendo comprometer o crescimento e o desenvolvimento de plantas que nesse solo forem cultivadas.



**Figura 2** - Representação esquemática dos íons solvatados na solução do solo formando os (1) íons difusos e da adsorção de cátions e ânions em torno de um colóide pela formação de (2) complexos de esfera externa (CEE) e (3) interna (CEI).

Fonte: Brady e Weil (2013).

## 2.6 Reações de troca de cátions

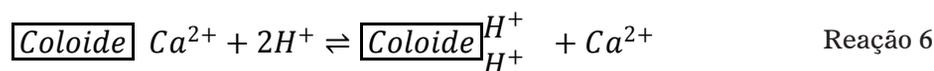
Na superfície dos coloides do solo, existem vários íons que se encontram adsorvidos por meio de CEE que podem ser trocados por outros íons de carga semelhante. A troca catiônica ocorre quando o cátion que se encontra adsorvido se distancia um pouco mais da superfície do colóide do que sua distância normal; com a diminuição da energia de atração, essedá condições para que outro cátion possa assumir a posição próxima à carga negativa da superfície do colóide. Se isso acontecer com um cátion, o processo é chamado de troca catiônica. Os íons adsorvidos por meio de CEE são chamados de íons trocáveis e a superfície dos coloides orgânicos e inorgânicos que tenham cargas (positivas ou negativas) são chamados de complexo de troca de cátions.

Conforme Brady e Weil (2013), os princípios das reações de troca catiônica são a reversibilidade, a equivalência de cargas, a lei da relação, os efeitos dos ânions sobre a ação das massas, a seletividade do cátion e os cátions complementares.

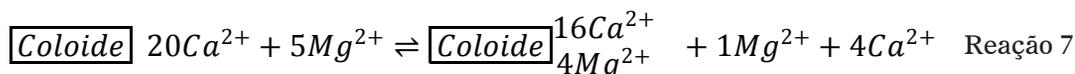
A ‘reversibilidade’ da reação é um princípio fundamental na reação de troca catiônica: um íon pode substituir outro pela alteração da sua concentração na solução do solo, conforme elucidado na Reação 5.



A troca catiônica é quimicamente equivalente do ponto de vista das cargas (equivalente de cargas), ou seja, um elemento que possua duas cargas positivas (p.e.  $\text{Ca}^{2+}$ ) deverá ser substituído por outro elemento de carga igual (p.e.  $\text{Mg}^{2+}$ ) ou pela quantidade igual de cargas (p.e.  $2\text{K}^+$  ou  $2\text{H}^+$ ). Dessa forma, haverá equivalência de cargas (Reação 6).

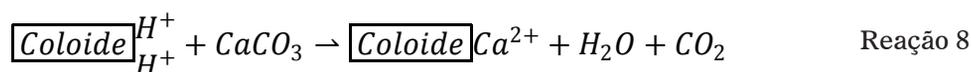


A ‘lei da relação’ afirma que, quando um sistema está em equilíbrio, vai existir uma relação entre os íons adsorvidos e os íons na solução do solo. Por exemplo, se um colóide apresenta 20 íons de  $\text{Ca}^{2+}$  adsorvidos e são adicionados ao sistema (solução do solo) 5 íons de  $\text{Mg}^{2+}$ , para que haja equilíbrio entre a solução do solo e os íons adsorvidos, parte do  $\text{Ca}^{2+}$  deverá desorver e parte do  $\text{Mg}^{2+}$  deverá adsorver para que haja relação (proporcionalidade) entre os íons da solução e os íons adsorvidos (Reação 7).



Porém, caso o íon adicionado ao sistema tenha 1 carga (p.e.  $\text{K}^+$ ), a reação torna-se um pouco mais complexa e, até este momento, admitiu-se que os íons se comportam exatamente igual nas reações de troca e de adsorção, o que veremos mais à frente que isso não é verdade.

A determinação de que uma reação de troca aconteça e se mantenha dessa forma (quando o íon desorvido seja impedido de adsorver novamente) pode ser influenciada pelo ânion associado ao cátion (efeito dos ânions sobre a ação das massas). Isso pode acontecer se o íon desorvido ‘precipitar’, ‘volatilizar’ ou ‘associar-se fortemente’ a um ânion. Exemplo clássico disso é a adição de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) ao solo que, ao dissociar-se, irá aumentar a concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  na solução do solo e dos íons  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$  que irão formar  $\text{OH}^-$ . Com o aumento de íons  $\text{OH}^-$ , estes irão consumir  $\text{H}^+$  da solução do solo, os quais serão repostos novamente pelo complexo de troca, gerando sítios de adsorção com cargas negativas, abrindo possibilidade para que o  $\text{Ca}^{2+}$  seja adsorvido nos coloides do solo. Ou seja, uma vez que os  $\text{H}^+$  vão para a solução do solo, são impedidos de retornarem ao complexo de troca, pois reagem com o  $\text{OH}^-$  formando  $\text{H}_2\text{O}$ , resultando que o sentido da reação seja para a direita (Reação 8).



Como citado anteriormente, na realidade, alguns cátions se ligam mais fortemente aos coloides do solo do que outros cátions, fazendo que estes sejam menos susceptíveis de serem deslocados dos coloides do solo. Essa força de ligação geralmente será maior quanto maior for a carga e menor o raio hidratado do cátion. Assim, os cátions são retidos pelos coloides do solo na seguinte ordem, denominada de série liotrópica:



A 'seletividade dos cátions' fica evidente ao constatar que os cátions mais fracamente retidos (menor valência e maior raio iônico hidratado) tendem a ficar mais distantes da superfície dos coloides do solo e, por sua vez, poderão ser mais facilmente deslocados para a solução do solo, ficando mais propensos a serem movimentados para camadas mais profundas, fora do alcance das raízes, o que caracteriza a perda do elemento por lixiviação. Isso explica por que em solos tropicais úmidos os coloides do solo apresentam grande parte de suas cargas balanceadas com íons de  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+$ .

As forças relativas de adsorção podem ser alteradas pela presença de sítios específicos de adsorção para algum cátion. Um exemplo disso é a afinidade de micas finas e vermiculitas pelos íons  $\text{K}^+$  devido à CTC e ao espaço ditrigonal existente entre as folhas de tetraedros de silício desses minerais. Outro exemplo disso é a afinidade do  $\text{Cu}^{2+}$  a alguns sítios dos húmus. Essa seletividade proporciona diminuição das perdas desses íons do sistema solo.

Dependendo do cátion vizinho (B) (às vezes chamados de 'cátion complementar') que se encontra adsorvido ao complexo de troca, esse poderá determinar a facilidade com que outro cátion (A) poderá ser desorvido. Se o cátion B (p.e.  $\text{Na}^+$ ) for um cátion com ligação mais fraca, isso implica que o mesmo oscila a distâncias maiores da superfície de um coloide, enquanto que, se um cátion A (p.e.  $\text{K}^+$ ) apresenta uma força de ligação maior, o mesmo oscila mais próximo da superfície. Com isso, dos cátions adsorvidos, aquele que oscilar mais distante da superfície do coloide será mais facilmente trocado por outro íon adicionado à solução do solo.

## 2.7 CTC e CTA

A quantidade de cargas negativas e positivas da superfície das partículas que compõem o complexo coloidal do solo são chamadas, respectivamente, de capacidade de trocar cátions (CTC) e capacidade de trocar ânions (CTA). Esses atributos do solo são medidos comumente em termos de quantidades de cargas por massa ou volume de solo. Geralmente esses atributos são medidos em termos de centímol de cargas ou milímol de cargas por decímetro cúbico ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  ou  $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ).

A fim de ilustrar melhor a relação de quantidade de cargas por volume ou massa de solo, algumas informações são importantes. Um mol de qualquer elemento (átomos, moléculas ou carga) descreve a quantidade deste que é expressa pelo número de Avogrado ( $6,02 \times 10^{23}$ ). Ou seja, um mol de  $\text{Ca}^{2+}$  tem  $6,02 \times 10^{23}$  átomos de  $\text{Ca}^{2+}$  e um mol de  $\text{Mg}^{2+}$  tem  $6,02 \times 10^{23}$  átomos de  $\text{Mg}^{2+}$  e assim sucessivamente. Como a massa do  $\text{Ca}^{2+}$  é de  $40,08 \text{ g mol}^{-1}$  e como o íon  $\text{Ca}^{2+}$  tem duas cargas positivas,  $1 \text{ mol}_c \text{ de } \text{Ca}^{2+} = 20,04 \text{ g}$  ( $40,08/2$ ) e  $1 \text{ cmol}_c \text{ de } \text{Ca}^{2+} = 0,2004 \text{ g}$  ( $20,04/100$ ). Outro exemplo é o íon  $\text{Al}^{3+}$ , como a massa do  $\text{Al}^{3+}$  é de  $26,98 \text{ g mol}^{-1}$  e como o íon  $\text{Al}^{3+}$  tem três cargas positivas,  $1 \text{ mol}_c \text{ de } \text{Al}^{3+} = 8,99 \text{ g}$  ( $26,98/3$ ) e  $1 \text{ cmol}_c \text{ de } \text{Al}^{3+} = 0,090 \text{ g}$  ( $8,99/100$ ).

Como discutido anteriormente, a CTC e a CTA podem alterar com mudanças no pH do solo (Reação 2 e 3), principalmente em solos com grande participação de minerais que apresentam

cargas dependentes de pH, caso comum de solos formados em regiões tropicais úmidas e de húmus cujas cargas são predominantemente dependentes de pH. Desta forma, para a determinação padrão da CTC de solos diferentes, optou-se, no Brasil, determinar a CTC do solo usando uma solução tamponada a pH 7,0. Esses métodos que utilizam soluções tamponadas medem o potencial máximo do solo de adsorver cátions no pH de determinação (pH 7,0), ou seja, será uma CTC potencial ou máxima, comumente chamada de CTC a pH 7,0. Uma forma indireta de se determinar a CTC do solo se dá pela soma das bases trocáveis (SB) do solo ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ ) e dos cátions ácidos do solo ( $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ ). Assim, pode-se escrever matematicamente a SB e a CTC da seguinte forma (Equação 1):

$$SB = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ \quad \text{Equação 1}$$

$$CTC = SB + H + \text{Al}^{3+} \quad \text{Equação 2}$$

Com a determinação da CTC a pH 7,0, infere-se sobre a CTC potencial ou máxima do solo quando em pH 7,0. A determinação mais próxima da condição atual do solo pode ser determinada pela soma da SB mais os íons  $\text{Al}^{3+}$  trocáveis do solo. Essa CTC é denominada de capacidade de trocar cátions efetiva (CTCe) e pode ser escrita da seguinte forma matematicamente (Equação 3):

$$CTCe = SB + \text{Al}^{3+} \quad \text{Equação 3}$$

O tamanho da CTC do solo depende fortemente de alguns atributos do solo, principalmente da quantidade de argila, do tipo de argila, da quantidade de MOS e do pH do solo. O tipo de argila é função do grau de intemperismo do solo. Dois solos podem ter teor igual de argila e apresentar CTC diferentes, em consequência do grau de intemperismo. De forma geral, solos mais argilosos, solos com argilas mais ativas (vermiculitas, esmectitas, montmorilonitas etc.), solos com mais MOS e com pH próximo da neutralidade tendem a ter maior CTC.

## 2.8 Saturação por bases do solo

Vários cátions podem ser adsorvidos pelos coloides do solo e os cátions que dominam o complexo de troca influenciam fortemente em seus atributos. As bases trocáveis (SB) do solo ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ ) são, de forma geral, elementos importantes no processo produtivo das culturas e, dessa forma, tem-se calculado de forma relativa a participação dos mesmos na CTC do solo. Essa participação relativa das bases do solo na CTC é chamada de saturação por bases (V%) e pode assim ser descrita (Equação 4):

$$V\% = \left( \frac{SB}{CTC} \right) \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

Da mesma forma, é possível quantificar relativamente cada um dos cátions trocáveis do solo em relação à CTC (porcentagem de saturação), como segue (Equação 5):

$$n\% = \left( \frac{n}{CTC} \right) \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Em que  $n$  pode ser  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  ou  $\text{K}^+$ , tendo-se  $\text{Ca}\%$ ,  $\text{Mg}\%$  ou  $\text{K}\%$ , respectivamente.

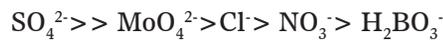
## 2.9 Reações de troca de ânions

Os principais responsáveis pela CTA, dependendo do pH do solo, são a caulinita, os óxidos de ferro e de alumínio. É um atributo que, dependendo do grau de intemperismo do solo, pode superar a CTC, sendo isso possível em alguns solos tropicais ou horizontes/camadas mais profundos do solo. A troca de ânions pode acontecer por duas vias preferenciais: ou por meio da adsorção aniônica (formação de CEE – p.e.  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ) ou por fixação (formação de CEI –  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ).

A troca dos ânions adsorvidos por CEE segue os mesmos princípios da troca catiônica, em que as cargas negativas na superfície dos colóides atraem os ânions para próximo da superfície e pode ocorrer a troca entre os ânions. Como exemplo, pode-se ilustrar a troca de  $\text{NO}_3^-$  por  $\text{Cl}^-$ :



A sequência de adsorção dos ânions segue a seguinte ordem decrescente:



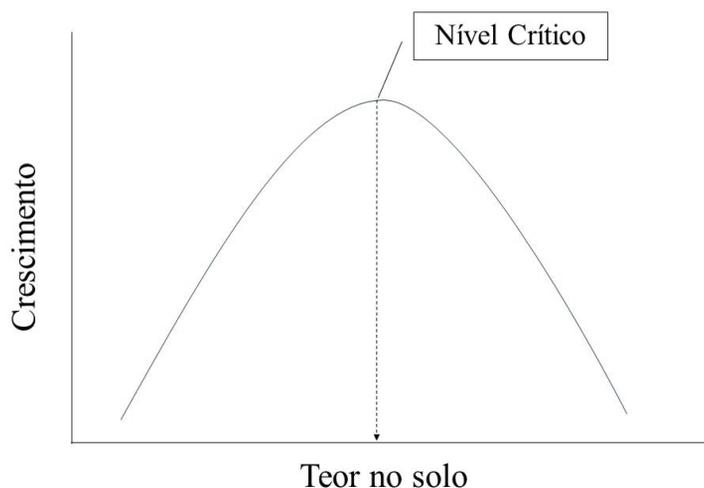
Isso irá ocorrer de forma equivalente do ponto de vista de cargas e, diferentemente da CTC, a CTA diminui com o aumento do pH.

A troca de ânions é importante para a manutenção dos ânions do solo, evitando que os mesmos sejam perdidos por lixiviação. Esse atributo tende a aumentar com o aumento da profundidade do solo em solos tropicais devido, principalmente, à diminuição da MOS nas camadas mais profundas do solo.

## 2.10 Elemento disponível

Os elementos químicos se distribuem no solo na forma de variados compostos inorgânicos (minerais cristalinos e minerais de baixa cristalinidade, ou amorfos) e orgânicos (MOS), íons adsorvidos aos colóides minerais e orgânicos do solo e íons na solução do solo. Um elemento M, Al, por exemplo, pode fazer parte da rede cristalina de um mineral caulinita ou do mineral gibbsita –  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (Figura 2), pode ocorrer na forma iônica ( $\text{Al}^{3+}$ ), adsorvido aos colóides do solo e estar em equilíbrio com íons  $\text{Al}^{3+}$  na solução do solo. Além disso, íons  $\text{Al}^{3+}$  podem formar complexos com a matéria orgânica, caracterizando as formas orgânicas de ocorrência do elemento.

Sob o ponto de vista de nutrição mineral de plantas, são de interesse os elementos que estão na ‘solução do solo’ e aqueles que estão na fase sólida que podem ser transferidos para a solução, como os ‘íons trocáveis’. Além desses, existe uma parte dos elementos que estão na fase sólida que não são trocáveis, mas que podem ser solubilizados (formas metaestáveis), transferidos para solução e ser absorvidos pelas plantas, via raízes. Esses elementos são de interesse da análise de solo para fins de avaliação da fertilidade do solo, ou seja, de avaliar a capacidade do solo em fornecer nutrientes para as plantas. Esse conjunto de elementos que estão na fase sólida e são transferíveis para a solução constituem a reserva lábil do solo, origem do ‘teor disponível’ para as plantas, estimado via a análise de solo, com o uso de substâncias químicas, denominadas de extratores. A premissa para o uso de extratores é a de extrair os elementos de interesse em quantidades que correlacionam com o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Essa correlação significa que variações nas quantidades extraídas implicam variações nas quantidades absorvidas, com impactos no crescimento das plantas (Figura 3).



**Figura 3** - Crescimento de planta em função de teor no solo estimado por um extrator (relação esperada quando o extrator é capaz de avaliar o disponível).

Fonte: Os autores.

Com base nisso, tem-se que um elemento pode ter sua disponibilidade estimada por mais de um extrator. Um exemplo é o fósforo para o qual, no Brasil, são usados dois métodos de análise: resina aniônica (sólida, esférica, saturada com  $\text{NaHCO}_3$ ) e extrator Mehlich-1 (mistura de  $\text{HCl}$   $0,025 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ ). Esses extratores têm modos de interação com o solo diferentes, indicando teores de P diferentes para um mesmo teor efetivo para as plantas. Extratores distintos extraem teores diferentes e indicam níveis críticos diferentes e critérios de interpretação idem. Entenda-se nível crítico (NC) como o teor mínimo no solo para o ótimo crescimento desejado da planta. Por outro lado, um extrator pode ser usado para estimar a disponibilidade de mais de um elemento, como é o caso do Mehlich-1 usado na determinação de P, K, Fe, Cu, Mn, Zn.

## 2.11 Reação do solo

### 2.11.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

A reação do solo reflete a atividade de íons  $\text{H}^+$  e  $\text{OH}^-$  na solução do solo, medida pelo pH ( $\text{pH} = -\text{Log}(\text{H}^+)$ ) em que a atividade do  $\text{H}^+$  é dada em  $\text{mol L}^{-1}$ , cuja escala varia de 0 a 14, considerando que (Reação 10):



$$K_w = \frac{(\text{H}^+) + (\text{OH}^-)}{(\text{H}_2\text{O})^2} = (\text{H}^+)(\text{OH}^-) = 1 \times 10^{-14}$$

considerando  $(\text{H}_2\text{O}) = 1$  em  $T = 298 \text{ K}$  e  $P = 101,325 \text{ kPa}$ , tem-se:

$$(\text{H}^+)(\text{OH}^-) = 1 \times 10^{-14}$$

Aplicando-se  $-\text{Log}$  tem-se:

$$[-\text{Log}(\text{H}^+)] + [-\text{Log}(\text{OH}^-)] = -\text{Log}10^{-14}$$

$$[-\text{Log}(H^+)] + [-\text{Log}(OH^-)] = 14$$

Para  $H^+ = OH^-$  tem-se  $H^+ = 10^{-7}$  e  $OH^- = 10^{-7}$

$$-\text{Log}(H^+) = -\text{Log}(10^{-7}) = \text{pH} = 7,0$$

$$-\text{Log}(OH^-) = -\text{Log}(10^{-7}) = \text{pOH} = 7,0$$

Se  $(H^+) > 10^{-7}$ , tem-se mais íons  $H^+$  em solução, ou seja,  $\text{pH} < 7,0$ ; e

Se  $(H^+) < 10^{-7}$ , tem-se mais íons  $OH^-$  em solução, ou seja,  $\text{pH} > 7,0$ .

A reação do solo pode ser caracterizada como reação ácida, reação alcalina ou reação neutra. Na reação ácida ( $\text{pH} < 7,0$ ), há predomínio de íons  $H^+$  na solução do solo; na reação alcalina ( $\text{pH} > 7,0$ ), há predomínio de íons  $OH^-$  e, na reação neutra ( $\text{pH} = 7,0$ ), há equilíbrio desses íons. O  $\text{pH} = 7,0$  é uma condição pontual e efêmera, com os solos apresentando seu  $\text{pH}$  na faixa ora ácida, ora alcalina.

### 2.11.2 O que condiciona a acidez ou a alcalinidade do solo

A condição ácida ou alcalina do solo é consequência da remoção e/ou adição de bases no solo, bem como de produtos que podem originar íons  $H^+$ , pela ação de fatores naturais e/ou antrópicos (manejo). A acidificação do solo caracteriza-se pela intensa remoção das bases do solo (Ca, Mg, K e Na), associada com a adição de íons  $H^+$ , os quais têm sua origem primária na dissolução e na reação do  $CO_2$  na água, de acordo com a Reação 11:



Os íons  $H^+$  têm retenção preferencial nos colóides do solo, condicionando-se um ambiente com maior proporção deles na solução do solo. A remoção de bases ocorre, naturalmente, em ambientes em que o balanço hídrico é positivo, ou seja, a precipitação pluviométrica é maior que a evapotranspiração, gerando um excesso de água que percola no perfil do solo, carregando consigo  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  e  $Na^+$  liberados durante o intemperismo (lixiviação), inclusive o  $HCO_3^-$ . A remoção é continuada e tanto mais intensa quanto mais plano é o relevo, caracterizando os ambientes de ocorrência dos Latossolos, condição dominante nas regiões tropicais úmidas, onde a maioria dos solos é ácida. Na Tabela 2, observa-se que os resultados de análise de dois Latossolos ácidos, na região de Maringá – PR.

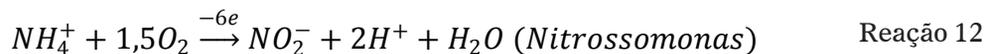
**Tabela 2 - Resultado de análise de fertilidade de dois Latossolos na região de Maringá – PR**

| Solo              | pH                | pH               | H+Al | Al <sup>3+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | SB   | CTC  | V  |
|-------------------|-------------------|------------------|------|------------------|------------------|------------------|----------------|------|------|----|
|                   | CaCl <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O |      |                  |                  |                  |                |      |      |    |
| LVd <sup>1</sup>  | 3,8               | 4,6              | 4,74 | 1,00             | 1,35             | 0,42             | 0,14           | 1,91 | 6,65 | 29 |
| LVdf <sup>2</sup> | nd                | 5,1              | 4,80 | 0,60             | 3,80             | 1,00             | 0,06           | 4,86 | 9,66 | 50 |

<sup>1</sup>Latossolo formado a partir de arenito (textura média); <sup>2</sup>Latossolo desenvolvido a partir do basalto (textura muito argilosa). nd = não determinado.

Fonte: Os autores.

Outras causas da acidificação são a liberação de  $H^+$  pelas raízes quando da absorção de cátions para manutenção da eletroneutralidade interna da planta, a exportação de bases do solo com conseqüente diminuição dos seus teores no solo, a dissociação de grupos ácidos da matéria orgânica e a adição de adubos nitrogenados, fontes de íons  $NH_4^+$ . As bactérias do grupo *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*, ao utilizarem os íons  $NH_4^+$  como fonte de energia, oxidam  $N-NH_4^+$  a  $NO_2^-$  e  $NO_3^-$ , com liberação de íons  $H^+$ , segundo as reações 12 e 13:



Na Tabela 3, tem-se um exemplo do efeito do cultivo na acidificação do solo. O solo sob mata nativa apresenta pH na faixa alcalina e, na área de cultivo adjacente à mata nativa, os solos estão na faixa ácida, reflexo das ações naturais e antrópicas que levaram à remoção de bases, adição de  $H^+$ , com conseqüente diminuição dos teores de Ca e Mg, diminuição do pH do solo, presença de alumínio trocável ( $Al^{3+}$ ). Eventos naturais e antrópicos explicam a acidificação de solos agrícolas, em sistemas puramente extrativistas.

**Tabela 3** - Reação do solo em área sob mata nativa e em área cultivada, no município de Maringá - PR

| Solo      | Prof.   | pH                | pH               | H+Al                               | Al <sup>3+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | SB    | CTC   | V  |
|-----------|---------|-------------------|------------------|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-------|-------|----|
|           | (cm)    | CaCl <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> |                  |                  |                  |                |       |       | %  |
| Mata      | 0-2,5   | 7,2               | 7,7              | 2,22                               | 0,0              | 24,81            | 2,99             | 0,49           | 28,29 | 30,51 | 93 |
| Mata      | 2,5-5,0 | 7,2               | 7,6              | 2,37                               | 0,0              | 16,89            | 2,62             | 0,30           | 19,81 | 22,18 | 89 |
| Mata      | 5,0-10  | 6,4               | 7,5              | 2,54                               | 0,0              | 7,51             | 2,47             | 0,23           | 10,21 | 12,75 | 80 |
| Cultivada | 0-2,5   | 4,5               | 5,1              | 6,67                               | 0,3              | 3,57             | 1,39             | 0,69           | 5,65  | 12,32 | 46 |
| Cultivada | 2,5-5,0 | 4,3               | 5,0              | 6,67                               | 0,5              | 2,19             | 1,17             | 0,49           | 3,85  | 10,52 | 36 |
| Cultivada | 5,0-10  | 4,1               | 4,7              | 7,79                               | 0,5              | 1,83             | 0,82             | 0,52           | 3,17  | 10,96 | 29 |

Fonte: Os autores.

A alcalinização é beneficiada pelas condições ambientais que favorecem a permanência das bases liberadas durante o intemperismo. Ações antrópicas podem contribuir para a alcalinização, pela adição no solo de corretivos agrícolas e de outros compostos, fontes de Ca, Mg e OH<sup>-</sup>. São registrados casos de alcalinidade em áreas de cultivos de hortaliças em estufas e até mesmo a céu aberto, embora sejam situações mais restritas. Na Tabela 4 tem-se resultado de análise de solo sob horta, que recebeu altas doses de insumos fontes de Ca, Mg e OH<sup>-</sup>, ocasionando na elevação das bases do solo, saturação por bases e pH na faixa alcalina.

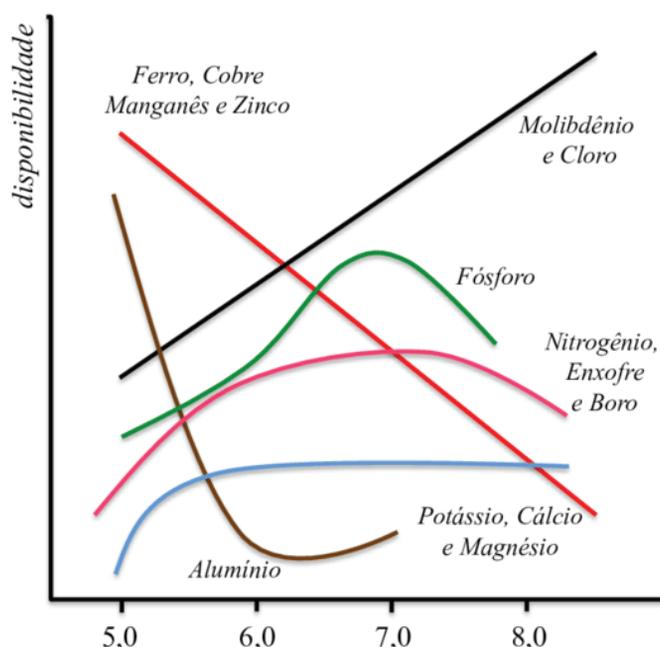
**Tabela 4** - Resultado de análise de fertilidade do solo sob horta pertencente a Universidade Estadual de Maringá (UEM)

| Solo       | pH                | pH               | H+Al                               | Al <sup>3+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | SB    | CTC   | V  |
|------------|-------------------|------------------|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-------|-------|----|
|            | CaCl <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> |                  |                  |                  |                |       |       | %  |
| Canteiro 1 | 7,1               | 7,4              | 2,03                               | 0,00             | 19,6             | 7,0              | 1,72           | 28,32 | 30,35 | 93 |
| Canteiro 2 | 7,0               | 7,3              | 2,03                               | 0,00             | 18,4             | 6,0              | 1,99           | 26,39 | 28,42 | 93 |
| Canteiro 3 | 7,0               | 7,3              | 2,03                               | 0,00             | 15,5             | 6,0              | 1,99           | 23,49 | 25,52 | 92 |

Fonte: Os autores.

### 2.11.3 Reação do solo e a disponibilidade de nutrientes no solo

A reação do solo interfere em processos biológicos, químicos e físico-químicos no solo. Entre esses processos, destaca-se a disponibilidade dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), dos micronutrientes (B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni e Zn) e de elementos tóxicos, especialmente o Al<sup>3+</sup>. Na Figura 4, tem-se um resumo da disponibilidade de nutrientes e elementos tóxicos, em função do pH.



**Figura 4** - Efeito do pH do solo na disponibilidade de nutrientes pelo solo.

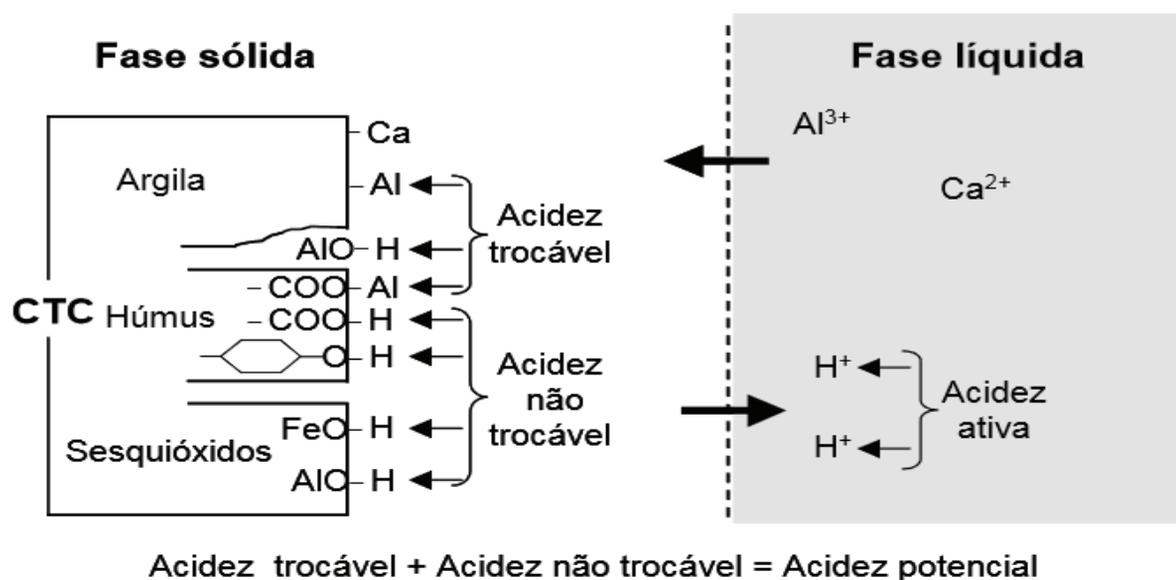
Fonte: Malavolta, Boareto e Paulino (1991).

Em alta acidez, há limitações na disponibilidade de Ca, Mg e K e favorecimento na disponibilidade de Al<sup>3+</sup> fitotóxico. O alumínio tem sua disponibilidade favorecida em condições ácidas, ocorrendo a sua solubilização quando o pH em água decresce a valores menores que 5,6, podendo atingir níveis tóxicos, dependendo dos teores efetivos no solo e da sensibilidade das plantas ao elemento. Aumento de pH propicia aumento da disponibilidade de Mo e Cl, mas resulta na diminuição da disponibilidade dos micronutrientes Cu, Fe, Mn, Ni e Zn, que podem atingir

níveis insuficientes, na faixa da alcalinidade. O fósforo pode ter sua disponibilidade diminuída em condições de acidez média a elevada ( $\text{pH} < 5,5$ ) e quando em condições de alcalinidade ( $\text{pH} > 7,5$ ). Nitrogênio tem disponibilidade aumentada pelo aumento da mineralização da matéria orgânica com o aumento do pH. O enxofre tem sua disponibilidade aumentada pelo incremento da dessorção do mesmo com o aumento do pH e pela maior mineralização da matéria orgânica. Boro tem sua disponibilidade diminuída especialmente em condições alcalinas. Considerando esses aspectos, o pH adequado para a maioria das culturas situa-se na faixa de 6,0-7,0, incluindo aí as hortaliças- fruto.

#### 2.11.4 A acidez do solo

O solo apresenta acidez ativa e acidez de reserva ou potencial (Figura 5). A acidez ativa se refere aos íons  $\text{H}^+$  dissociados na solução do solo, medida pelo pH, determinada com relativa facilidade e êxito com o uso do instrumento pHmetro (potenciômetro de hidrogênio, medidor de pH). No Brasil, as determinações mais comuns são pH em água ( $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) e pH em solução de  $\text{CaCl}_2$  0,01M ( $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ ).



**Figura 5** - Componentes da acidez do solo na fase sólida e na fase líquida.

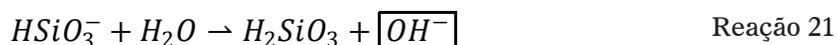
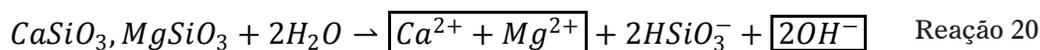
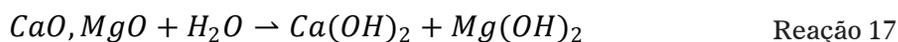
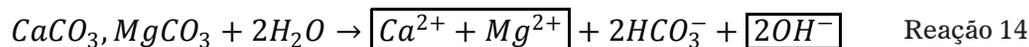
Fonte: Raij e Quaggio (1983).

A acidez potencial de reserva refere-se aos íons hidrogênio, dissociáveis de várias fontes no solo, estimada pelos teores de  $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ , expresso em  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ . Ela é constituída de duas frações: a) fração trocável (acidez trocável), representada pelos íons  $\text{Al}^{3+}$  e pequena porção  $\text{H}^+$  trocável adsorvidos aos colóides do solo; b) fração não trocável (acidez não trocável), constituída pelos íons  $\text{H}^+$  dissociáveis de diversas fontes, como os que se encontram ligados covalentemente a compostos da matéria orgânica (grupos carboxílicos e fenólicos), aos minerais de argila com carga variável e aos íons provenientes da hidrólise do  $\text{Al}^{3+}$ .

No Brasil, utiliza-se a solução tampão SMP ( $\text{pH}=7,5$ ) ou acetato de cálcio  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a  $\text{pH} = 7,0$  para a estimativa da acidez não trocável e trocável ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ). Para estimativa da acidez trocável, são usadas soluções salinas não tamponadas, tal como o  $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ .

## 2.11.5 Correção da acidez do solo

Para a correção da acidez do solo são utilizados os corretivos agrícolas. Os principais deles são os calcários agrícolas que têm, em sua constituição básica,  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ . São denominados calcários dolomíticos quando apresentam teor equivalente de  $\text{MgO} > 12\%$ , calcário calcítico quando o teor equivalente de  $\text{MgO}$  é  $< 5\%$  e magnesiano quando o teor equivalente de  $\text{MgO}$  está entre  $5\%$ - $12\%$ . São também corretivos agrícolas  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{Mg(OH)}_2$ ,  $\text{CaSiO}_3$  e  $\text{MgSiO}_3$ . A característica comum a todos eles é a de fornecer íons  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$  (Reações de 14 a 21).



As cinzas de origem vegetal podem ser fontes desses íons, com potencial para corrigir acidez, mas, devido às pequenas concentrações, teriam que ser usadas em grandes quantidades. É possível que isso aconteça em sistemas de produção de hortaliças, o que contribui para a alcalinização dos solos, em alguns casos.

A correção da acidez se dá pela reação entre os íons  $\text{OH}^-$  e os íons componentes da acidez do solo ( $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ ), conforme reações 22 e 23:



As plantas apresentam variações quanto à faixa ideal de pH, à função das exigências das mesmas em nutrientes e à tolerância ao  $\text{Al}^{3+}$ . A correção de acidez será norteada pelo pH do solo

e/ou a saturação por bases (V%), adequado para a planta de interesse, haja vista a relação linear existente entre pH e V%, ou seja: quando se aumenta V%, aumenta-se o pH. Valores desses atributos abaixo dos valores adequados para a cultura (Tabela 5) são indicadores da necessidade da prática de calagem. Hortaliças-fruto, de maneira geral, apresentam baixa tolerância à alta acidez, com saturação por bases adequada > 70% e pH > 6,0. São inadequadas condições de pH <5,5 e > 7,5, considerando os efeitos do pH na disponibilidade de nutrientes e/ou elementos tóxicos e seus reflexos negativos no crescimento e no desenvolvimento das plantas.

**Tabela 5** - Valores de  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  (relação solo:solução de 1:1) e saturação por bases (V%) adequados para algumas hortaliças-fruto

| Hortaliças   | V%              |                 |                 | pH                   |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|
|              | PR <sup>1</sup> | SP <sup>2</sup> | MG <sup>3</sup> | RS e SC <sup>4</sup> |
| Abobrinha    |                 | 80              | 65-70           | 6,0                  |
| Berinjela    |                 | 80              | 70              | 6,0                  |
| Ervilha      |                 | 80              |                 | 6,0                  |
| Feijão vagem |                 | 80              | 70              |                      |
| Jiló         |                 | 80              | 70              |                      |
| Melancia     |                 | 70              | 65-70           | 6,0                  |
| Melão        |                 | 70              | 80              | 6,0                  |
| Morango      | 70              | 80              | 80              | 6,0                  |
| Pepino       |                 | 80              | 75              | 6,0                  |
| Pimenta      |                 | 80              |                 |                      |
| Pimentão     |                 | 80              | 70              | 6,0                  |
| Quiabo       |                 | 80              | 70              |                      |
| Tomate       | 80              | 80              | 70-80           | 6,0                  |

<sup>1</sup> Segundo Manual de Adubação e Calagem para o estado do Paraná. <sup>2</sup> Segundo Boletim Técnico 100 – SP. <sup>3</sup> Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. <sup>4</sup> Manual de Calagem e Adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.

Fonte: Os autores.

O alto uso de adubos minerais e adubos orgânicos nos sistemas de produção de hortaliças é uma realidade, decorrente da estratégia de aplicar esses insumos por prescrição, na maioria das situações. O monitoramento via análise de solo visa à verificação de limitações por acidez ou alcalinidade, sendo possível a partir de um ciclo de cultura, haja vista as especificidades de manejo nesses sistemas. Não raro, verificam-se condições de solos alcalinos, com indícios de salinidade, especialmente em ambientes de cultivo protegido. Nessas situações, deve-se atentar para o monitoramento das áreas de produção, de modo a evitar estresses nutricionais, consequência de alcalinidade e/ou excesso de sais, com impacto na disponibilidade de micronutrientes e água.

São índices úteis para verificação de salinidade a condutividade elétrica (CE), o pH do solo, a porcentagem de saturação de sódio trocável (PST). Solos com indícios de salinidade apresentam pH na faixa alcalina, CE > 4 dS m<sup>-1</sup>, PST > 15%. Raij e Quaggio (1983) encontraram que o valor do  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  foi 0,6 menor que o valor do  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ . No entanto, essa diferença pode ser maior ou menor,

representando 0,6 a média das diferenças. Quando a diferença é mais estreita ( $< 0,3$ ) e está na faixa alcalina, pode constituir um alerta para excesso de sais.

$$PST = \left( \frac{Na^+}{CTC} \right) \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

### 2.11.6 Amostragem do solo

O princípio básico da amostragem é a 'homogeneidade da gleba', que continua válido para os sistemas com hortaliças, com a 'gleba' podendo ser área com dimensões de canteiros pequenos, como 50 m<sup>2</sup>, ou menores. Nesses sistemas, o manejo de adubação é o fator decisivo na definição de homogeneidade da área-canteiro que, será representada pela amostra, que em última instância, será considerado, ou não, com base na relevância da área que se pretende analisar, independentemente de suas dimensões físicas. Deve-se ter em mente que quanto maior o número de amostras simples por canteiro maior a representatividade da amostra. Entretanto é recomendável que não seja inferior a 3, mesmo para os canteiros com dimensões mesmo que diminutas, com 15-20 amostras simples para áreas maiores, respeitada a homogeneidade. A profundidade de coleta deverá ser a profundidade de incorporação dos corretivos, fertilizantes orgânicos e minerais.

## 3 Macronutrientes

### 3.1 Nitrogênio (N)

O N é o nutriente requerido em maiores quantidades pela maioria das plantas, participa da estrutura de metabólitos fundamentais para o desenvolvimento das mesmas, como aminoácidos, proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos (DNA e RNA), pigmentos, lipoproteínas e vitaminas.

As formas preferencialmente absorvidas pelas plantas são nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nessa ordem. O contato entre esses íons e as raízes das plantas acontece por meio do fluxo de massa juntamente com a água que se move do solo para a raiz. Algumas formas de aminoácidos também podem ser absorvidas, porém são de pouca ocorrência, visto que raramente são encontrados na forma livre nos solos.

Após a entrada no citosol, as formas de N são reduzidas a nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) e posteriormente convertidas a NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no plastídio, para então serem incorporadas às estruturas de aminoácidos e metabólitos. Concomitantemente, em alguns casos, o NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e o NH<sub>4</sub><sup>+</sup> podem ser transportados para o vacúolo para serem reduzidos ou redistribuídos inalteradamente para a parte aérea da planta. A quantidade de N requerida pela planta não é estática durante seu ciclo. Geralmente, a necessidade aumenta gradativamente durante os estádios vegetativos até atingir seu ápice no florescimento e diminui nas fases mais avançadas de desenvolvimento. Em situações severas de deficiência de N, os sintomas são clorose generalizada das folhas mais velhas. (devido à diminuição das clorofilas e à alta mobilidade do elemento nos vegetais que são redistribuídos para regiões mais novas que necessitam do elemento), diminuição do crescimento e da produção.

A principal fonte de N está na atmosfera (gás - N<sub>2</sub>), diferentemente de outros elementos que são provenientes de rochas e minerais. Para o N atmosférico ser transferido até o solo, alguns mecanismos estão envolvidos, como a fixação atmosférica por meio dos relâmpagos. A alta energia proveniente das descargas elétricas atmosféricas faz que a tripla ligação do N<sub>2</sub> se rompa, formando óxidos que posteriormente reagem com a H<sub>2</sub>O da chuva formando HNO<sub>3</sub> que chega ao solo. Outra

forma da chegada do N-atmosférico até o solo é via fixação biológica (fixação simbiótica e não-simbiótica). O  $N_2$  é transformado em  $NH_3$  pelo organismo fixador e fixado em cadeias de compostos orgânicos (Reação 24), este mecanismo é responsável por até 92% de todo o N adicionado ao solo proveniente da atmosfera.

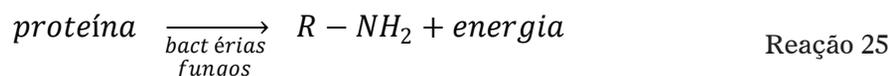


As bactérias responsáveis pela fixação podem ser de vida livre, como *Azotobacter*, *Beijerinckia* e cianobactérias, ou de vida simbiótica, como as bactérias do gênero *Rhizobium* comum em leguminosas.

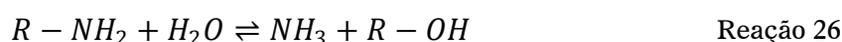
No solo, acontecem constantemente várias reações químicas envolvendo o N, que têm início no processo de mineralização da MOS. Essas reações são influenciadas pelo ambiente, afetando diretamente a dinâmica do elemento e, por sua vez, a absorção pelas plantas. Merecem destaque a fixação de N, de interesse em solos com argilas 2:1; as que envolvem perdas de N no solo, que são principalmente a lixiviação do nitrato ( $NO_3^-$ ), volatilização de amônia ( $NH_3$ ) e emissões de óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ).

O N da MOS é importante fonte do elemento no solo. Em média, apenas 5% do N encontra-se na forma mineral no solo; a grande maioria apresenta-se na forma orgânica (95%). Para que esse se torne disponível, é necessário que ocorra a mineralização, ou seja, a passagem do N-orgânico para N mineral. A passagem acontece com o auxílio de microrganismos que decompõem a matéria orgânica por meio dos seguintes processos: primeiro a aminização (Reação 22), depois a amonificação (Reações de 25 a 27).

#### Reação de aminização



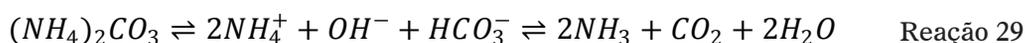
#### Reação de amonificação



Após a formação de amônio no solo, o cátion formado poderá sofrer várias reações, como adsorção no complexo de troca, absorção pelas plantas, imobilização pelos microrganismos do solo, pode sofrer perda de  $H^+$  (sentido para a esquerda na reação 27) e ser perdido na forma de gás  $NH_3$  (volatilização), fixação do  $NH_4^+$  em minerais do tipo 2:1, ou continuar as reações no solo e sofrer a nitrificação.

A fixação de amônio ocorre em filossilicatos do tipo 2:1, como vermiculitas, esmectitas, montmorilonitas etc. Nas folhas de tetraedros de silício que compõem esses minerais, existe um sítio de adsorção específico (espaço ditrigonal), com tamanho similar ao raio iônico do íon  $K^+$  e  $NH_4^+$ , tornando compatível o aprisionamento desses íons. Dependendo das condições ambientais, o amônio poderá retroceder à solução do solo e tornar-se disponível novamente para as plantas. Porém esses minerais não apresentam, de forma geral, participação relevante em solos tropicais (Latosolos, Nitossolos, Argissolos entre os principais), exceção é dada à classe dos Vertissolos.

A volatilização de amônia (NH<sub>3</sub>) é um dos processos de perda de N mais comuns em solos agrícolas, principalmente pelo uso de ureia (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> com 45% de N), que é um fertilizante nitrogenado muito usado na agricultura. A ureia é transformada pela ação da enzima urease em (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, o qual se dissocia em 2NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + OH<sup>-</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, gerando um ambiente alcalino, que favorece a transformação do NH<sub>4</sub><sup>+</sup> em NH<sub>3</sub>, que é um gás que se volatiliza (Reações 28 e 29).

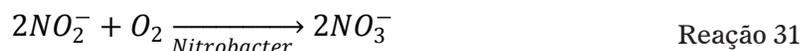
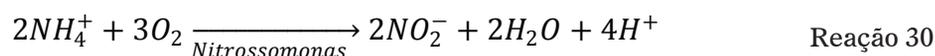


pH entre 7,0 a 9,0

Essas reações são inerentes à aplicação de ureia no solo, e as perdas serão tanto maiores em aplicações superficiais – em ambientes alcalinos, com altos teores de matéria orgânica ou palha na superfície, frequentes em áreas de produção de hortaliças – bem como em solos de textura média ou arenosa.

A nitrificação é o processo de formação de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) por meio de dois grupos de bactérias, as *Nitrossomonas* e a *Nitrobacter*. Em uma primeira etapa, o amônio é transformado em nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) pelas *Nitrossomonas* (Reação 30). Nesta etapa, há a liberação de prótons H<sup>+</sup> que acidificam o solo. Em uma segunda etapa, o nitrito é transformado em nitrato pela *Nitrobacter* (Reação 31).

### Reação de nitrificação

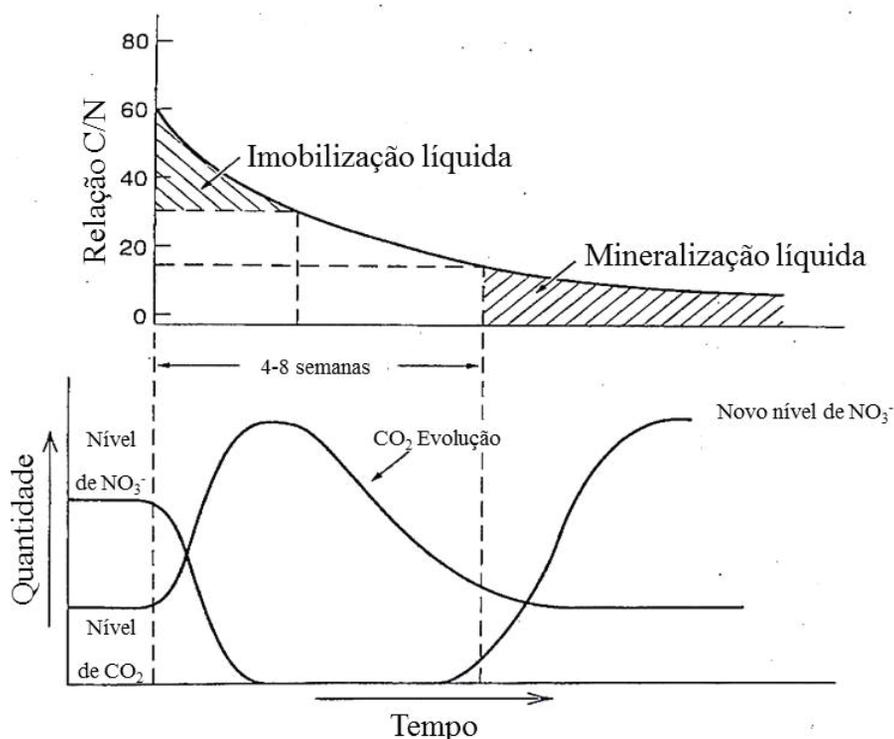


Uma vez gerado o NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; esse pode ser absorvido pelas plantas, imobilizado pelos microrganismos do solo, desnitrificado ou perdido por lixiviação, sendo este último relevante, dada a muito baixa adsorção de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ao complexo de troca e a muito baixa energia de adsorção deste íon (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> >> MoO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Cl<sup>-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), bem como a baixa CTA. As perdas de N no solo por lixiviação podem ser consideráveis, uma vez que o ânion nitrato é móvel no solo, em alguns casos chegando a ser 100 vezes maior que a movimentação vertical de P e K.

O processo inverso da mineralização é chamado de imobilização, que é uma diminuição temporária na disponibilidade de N no solo. Tal processo ocorre quando há aporte de material orgânico com alta relação C/N: normalmente em relações acima de 30:1, há predomínio de imobilização de N; em relações C/N abaixo de 30:1, há predomínio de mineralização de N.

A adição de resíduos orgânicos ao solo, com alta relação C/N, pode levar à diminuição dos teores de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no solo (Figura 6). Em condições padrões (inalteradas de manejo), ou de equilíbrio, os teores de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> do solo e a liberação de CO<sub>2</sub> no solo encontram-se em níveis estáveis. Com a adição de novos materiais orgânicos ao solo, a população de microrganismos decompositores aumenta, resultando em aumento na liberação de CO<sub>2</sub> pelo solo devido à maior respiração dos microrganismos. Quando o material orgânico adicionado tem relação C/N alta (relação > 30/1), haverá imobilização de nitrogênio pelos microrganismos do solo, causando um “período de depressão de nitrato” (balanço líquido negativo), que pode influenciar na produtividade das culturas que ali estiverem instaladas, caso os teores de nitrato no solo fiquem aquém das necessidades das plantas. Esse período é variável

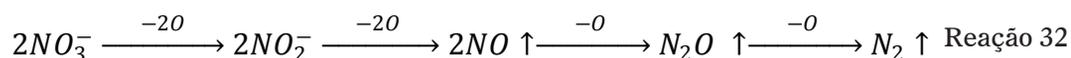
dependendo da relação C/N do material adicionado e do teor de  $\text{NO}_3^-$  do solo. A relação C/N do material orgânico adicionado diminui com o passar do tempo, em decorrência da incorporação do N nos microrganismos e a liberação de  $\text{CO}_2$  do sistema. Com a diminuição do substrato orgânico que serve como fonte de alimento para os microrganismos, há menor atividade deles e a liberação de  $\text{CO}_2$  do solo diminui. A partir de valores de relação C/N menor que 18:1, há balanço líquido positivo do  $\text{NO}_3^-$  no solo. Quando a relação C/N do material atingir 12:1, o material orgânico se encontra estabilizado no solo, os níveis de  $\text{NO}_3^-$  se estabilizam novamente, porém em patamar superior à condição inicial, assim como a respiração do solo retorna à condição inicial ou alcança um novo equilíbrio.



**Figura 6** - Efeito da adição de novos resíduos orgânicos ao solo com relação C/N de 60:1 na imobilização e na mineralização, na evolução de  $\text{CO}_2$  e nos níveis de  $\text{NO}_3^-$  do solo

Fonte: Havlin et al. (2005).

A desnitrificação do  $\text{NO}_3^-$  (Reação 32) ocorre com maior frequência em solos estagnados com água (ambiente anaeróbico). Nessas condições, microrganismos anaeróbicos e/ou facultativos utilizam o O combinado do  $\text{NO}_3^-$  (NOX do N=5), ocorrendo reações de redução do  $\text{NO}_3^-$ , produzindo formas gasosas (g) que podem ser perdas, com destaque para o  $\text{N}_2\text{O}$ , um dos principais gases de efeito estufa.



|              |              |                   |                  |                 |
|--------------|--------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Íons nitrato | Íons nitrito | Óxido nítrico (g) | Óxido nitroso(g) | Dinitrogênio(g) |
| (+5)         | (+3)         | (+2)              | (+1)             | (0)             |

A lixiviação de  $\text{NO}_3^-$  é o fenômeno de perda do  $\text{NO}_3^-$  devido à movimentação desse ânion a uma profundidade superior à do alcance das raízes das plantas. Esse processo é importante em

ambientes com adubações excessivas de fertilizante nitrogenado, associado a solos de textura média ou arenosa e em ambientes com precipitação e/ou irrigação excessiva. A perda desse elemento nas camadas mais superficiais do solo se deve ao fato de que, em tais camadas, há maiores valores de CTC, fazendo que o ânion permaneça mais tempo na solução do solo, o que facilita o movimento do mesmo com a água de drenagem. Essa movimentação para camadas mais profundas pode causar a contaminação de mananciais, trazendo riscos ambientais.

A fixação industrial de nitrogênio (Reação 33), em que se forma a amônia, é a base para síntese de todos os adubos nitrogenados. Essa forma de produção de fertilizante nitrogenado é uma alternativa muito onerosa do ponto de vista econômico, porque o custo energético de formação é muito alto (16.800 kcal kg<sup>-1</sup>), fato que torna importante o uso racional desses adubos.



Os fertilizantes nitrogenados podem ser classificados como fontes amídicas, nítricas ou amoniacais ou até mesmo nítrica amoniacal, como é o caso do nitrato de amônia (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>). As concentrações dessas fontes podem variar desde menos 1% de N (fontes orgânicas) até 82% de N (amônia anidra), sendo que as fontes mais utilizadas na horticultura são ureia (45% N), sulfato de amônio (21% N e 23% S), nitrato de amônia (33,5% N), nitrocálcio (27% N, 3% Ca e 1,5% Mg) e fosfato monoamônico ou MAP (10% N e 48% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

No contexto da produção de hortaliças, uma das mais importantes fontes nitrogenadas são as orgânicas, embora a maioria das fontes não chegue a conter 1% de N, como os esterco bovinos, borras de café, torta de filtro e cama de aviário, com exceção do esterco de galinha, que em alguns casos, pode chegar a 2% de N. Via de regra, os fertilizantes nitrogenados orgânicos são insolúveis em água, não estando o nitrogênio imediatamente disponível para as plantas, ocorrendo o aproveitamento após a mineralização do fertilizante orgânico (Reações 25 e 26), a qual, primariamente, é influenciada pela relação C/N.

### 3.2 Fósforo (P)

O P, de forma geral, é o macronutriente acumulado em quantidades menores, semelhante ao S, atrás de N, de K, de Ca e de Mg, embora, no que diz respeito à adubação, as quantidades recomendadas são semelhantes ou até maiores do que a de N e de K, dada à especificidade de sua dinâmica, especialmente em solos tropicais. Na planta, o elemento é integrante de vários compostos importantes, como os intermediários de açúcares, fosfolipídeos e fosfoproteínas, que são responsáveis pela integridade das membranas celulares, e ácidos nucleicos, além de desempenhar papel importante nas transferências de energia na respiração e na fotossíntese. As plantas absorvem o P na forma de H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> e HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> após a absorção do elemento, rapidamente ocorre a incorporação do mesmo a compostos orgânicos. O P atinge as raízes das plantas, na sua maioria, por difusão, portanto é importante que a aplicação dos adubos fosfatados seja realizada próximo às raízes. Alguns autores relatam que a movimentação do P no solo é de apenas 1 mm a 2 mm, o que limita/inviabiliza aplicações superficiais.

No caso de alta disponibilidade de P, as plantas o armazenam no vacúolo das células na forma de ortofosfato (Pi) que, em sua maioria, é inativo, chegando a mais de 90% do P total da planta. Por outro lado, quando há deficiência moderada de P, as plantas são assintomáticas, mas quando a disponibilidade no solo é muito baixa, podem aparecer sintomas nas folhas mais velhas que oscilam de verde-escuro a roxo, além de diminuir as taxas fotossintéticas, os teores de proteínas e de lipídeos e causar má fecundação e maturação tardia de frutos.

Várias espécies químicas podem ser encontradas na solução do solo, dependendo do pH em que o mesmo se encontrar. No pH  $\approx 7,2$ , a concentração de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  é semelhante à de  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Abaixo desse pH, a concentração de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  é maior que a concentração de  $\text{HPO}_4^{2-}$  e, acima desse pH, a concentração de  $\text{HPO}_4^{2-}$  é maior. A absorção de  $\text{HPO}_4^{2-}$  pelas raízes das plantas é mais lenta que a absorção de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . A concentração de P na solução do solo pode variar de 0,003 a 0,3 mg L<sup>-1</sup>, com concentração média de 0,05 mg L<sup>-1</sup>.

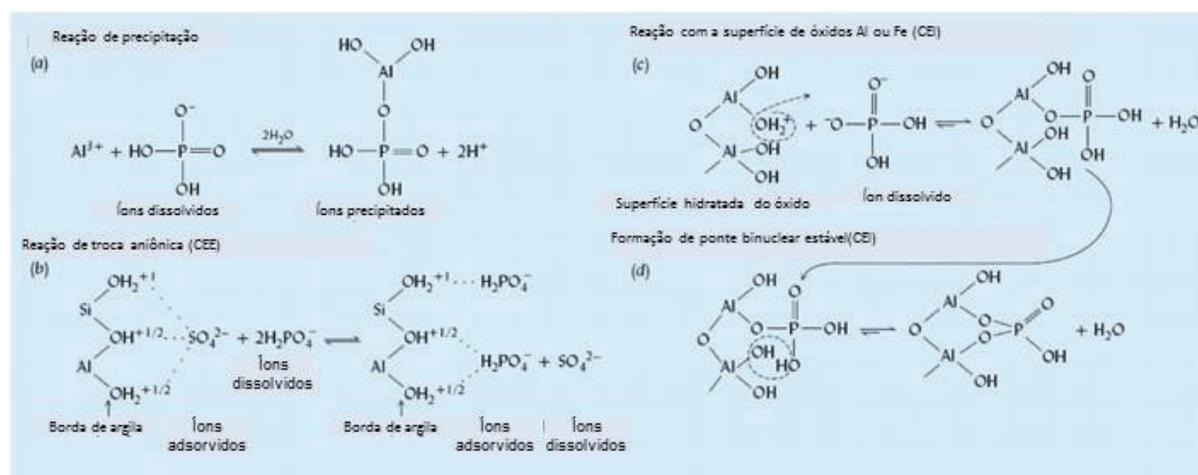
Naturalmente, os solos de regiões tropicais apresentam baixos níveis de P, devido ao elevado intemperismo sofrido ao longo dos anos. No solo, uma das principais fontes do elemento é a matéria orgânica, podendo variar de 20% a 80% do total do P no solo. Semelhantemente ao nitrogênio, a disponibilidade de P desta fração está ligada à atividade biológica e à mineralização da matéria orgânica. A maior eficiência de utilização de P está ligada a transformações biológicas e químicas que ocorrem no solo e que podem aumentar a disponibilidade do elemento no solo. As frações prontamente decomponíveis ou facilmente solúveis de P orgânico do solo são, muitas vezes, o fator mais importante no fornecimento de P para as plantas em solos altamente intemperizados. São conhecidos três grupos de fósforo orgânico no solo, como seguem: a) fosfatos de inositol; b) ácidos nucleicos; c) fosfolipídios. Porém a grande maioria das fontes orgânicas de P no solo não é conhecida e nem por isso são menos importantes.

Fatores que influenciam na mineralização da matéria orgânica são determinantes na viabilização do uso de fertilizantes orgânicos. Da mesma forma que o N, porém em menor intensidade, a imobilização de P também pode ocorrer, sendo que a tendência de imobilização de P pelos microrganismos irá ocorrer quando adicionado ao solo material orgânico com relação C/P > 300:1, e a mineralização irá ocorrer quando o material orgânico adicionado tiver relação C/P < 200:1.

A formação de precipitados com  $\text{Ca}^{2+}$  (acentuada em solos alcalinos),  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  (em solos ácidos) e a alta afinidade dos íons fosfato pelas superfícies dos colóides do solo formando CEI (Figura 7), diminuem as quantidades de P disponíveis na solução do solo (Figura 7a, 7c e 7d). Genericamente, o P pode ser dividido em duas porções no solo: uma lábil (disponível) e outra não lábil, sendo, que em condições tropicais, a quantidade do P-não lábil é bem maior. O P-lábil está relacionado ao P adsorvido que guarda uma relação de estreito equilíbrio com o P da solução do solo, portanto, conforme o P pertencente à solução do solo é absorvido pela planta, o P-lábil é desorvido dos colóides (Figura 7b e 7c) do solo e repõe o P recém-absorvido da solução, estabelecendo um novo equilíbrio. Por outro lado, o P-não lábil (Figura 7d) não faz parte desse equilíbrio, pois esse corresponde ao P fixado no solo, ou seja, indisponível para as plantas. Estudos realizados em mais variadas condições têm mostrado ter essa forma muito baixa reversibilidade, com a maioria dos autores considerando ser uma forma irreversível de P no solo. A maior tendência de formação de P-não lábil explica a necessidade de aplicações bem mais altas de P que as quantidades requeridas pelas plantas.

A retenção de P no solo (P-lábil + P-não lábil) aumenta com o teor de argila, com o grau de intemperismo do solo, por exemplo. Para um mesmo teor de argila, o solo mais intemperizado apresenta maior retenção de P, maior fração de P-lábil e de P-não lábil. Essa capacidade de retenção de P no solo pode ser estimada pela capacidade máxima de adsorção de P (CMAP). Seja um solo A que apresenta CMAP de 0,350 mg g<sup>-1</sup> de P no solo e um solo B de 0,800 mg g<sup>-1</sup> de P. Para atingir o nível de saturação, seriam necessários adicionar 700 e 1600 kg ha<sup>-1</sup> de P, que seriam redistribuídos na fração lábil e não lábil. O solo B vai apresentar maior quantidade de P na fração lábil e não lábil que o solo A, ou seja, para um mesmo nível de extração em ambos os solos, o solo B possibilitará maior número de cultivos que o solo A. O solo B tem maior capacidade tampão de fosfato (fator capacidade) que o solo A, de repor fósforo em solução (fator intensidade) por maior tempo (maior número de cultivos), quando a reserva lábil no solo (fator quantidade) está no seu nível adequado. Em termos práticos, se há dois solos com níveis insuficientes de P, o solo com maior capacidade tampão vai necessitar de maiores quantidades de P para atingir o nível adequado, contudo, uma vez alcançado esse nível, ele propiciará maior número de cultivos.

Considerando os aspectos da forte interação P-solo, o fertilizante deve ser introduzido no solo, junto com a instalação do cultivo, posicionado o mais próximo possível às raízes (de forma localizada no sulco) para evitar fixação no solo e maximizar a absorção pelas plantas.



**Figura 7** - Reações demonstrando a formação de P lábil e P-não lábil na superfície de óxidos de Al e Fe.

Fonte: Brady e Weil (2013).

Por outro lado, as principais maneiras de perdas de P no solo são por escoamento superficial de água e perda de partículas (erosão). A lixiviação de P é muito pouco expressiva, haja vista a forte interação P-solo. Contudo, em solos que recebem grandes quantidades de fertilizantes orgânicos, geralmente de origem animal, como o caso das hortaliças, o fósforo da solução do solo e de seus lixiviados está presente na forma de fósforo orgânico dissolvido (POD). A mobilidade do POD no solo é maior que a mobilidade do fósforo inorgânico solúvel. Isso é possível pela menor afinidade do POD ao Fe, Al, Mn, argilas e  $\text{CaCO}_3$  do solo.

Algumas plantas têm estratégias que permitem maior aproveitamento do P no solo, como associar-se com micorrizas arbusculares, que, em alguns casos, pode aumentar até 5 vezes a absorção devido ao aumento promovido pela área superficial específica das raízes. Além disso, estratégias de manejo devem ser adotadas para aumentar o desenvolvimento das raízes e conseqüentemente aumentar a absorção de P. São exemplos dessas estratégias, a adoção de práticas que propiciem melhoria do ambiente químico em profundidade, tal como o uso de gesso agrícola, e a eliminação de impedimentos físicos ao crescimento das raízes em profundidade.

Dentro desse contexto, a adubação fosfatada é fundamental para a manutenção do elemento no solo e a absorção pelas plantas. Os adubos fosfatados são oriundos de dois grupos de rochas fosfatadas, as apatitas ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}$ , podendo X ser  $2\text{F}^-$ ,  $2\text{OH}^-$  ou  $\text{CO}_3^{2-}$ ) e as fosforitas; as primeiras têm origem ígnea e a segunda, metamórfica ou sedimentar. No Brasil, há predomínio de fluorapatitas. Essas rochas são insolúveis e podem ser utilizadas moídas e concentradas, são chamadas de fosfatos naturais que apresentam baixa reatividade.

Outra alternativa é acidular estas rochas para a produção de fosfatos solúveis como MAP (48%  $\text{P}_2\text{O}_5$  e 9% N), DAP (45%  $\text{P}_2\text{O}_5$  e 16% N), superfosfato simples (18%  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 18% Ca e 10% S) e superfosfato triplo (41%  $\text{P}_2\text{O}_5$  e 12% Ca). No processo de fabricação desses fosfatos solúveis, produz-se como resíduo o gesso agrícola, exceto no superfosfato simples onde o gesso é seu constituinte.

Os termofosfatos (17%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) são oriundos do tratamento térmico das rochas fosfáticas ( $1000^\circ\text{C}$ – $1450^\circ\text{C}$ ), apresentam solubilidade lenta e presença de outros macronutrientes, como magnésio (9%), cálcio (20%) e também micronutrientes em concentrações menores.

Os resultados alcançados após a aplicação de P no solo pelas diferentes culturas são dependentes de uma série de condições que estão relacionadas à própria cultura, como as características do sistema radicular, o espaçamento, a cinética de absorção, o hábito de crescimento; relacionadas ao adubo, como o tipo e a dose utilizada, e relacionadas às próprias características do solo, como textura, mineralogia, manejo e fertilidade. Não raro são observados altos teores de P em áreas de hortaliças em decorrência do manejo caracterizado por altas doses de fertilizantes orgânicos e inorgânicos.

Os principais problemas do manejo do P nos solos tropicais são o baixo conteúdo natural de P no solo, a formação de compostos altamente insolúveis, e a adição de fontes altamente solúveis, que leva à fixação do P rapidamente. O P não é perdido por volatilização como o N e perde-se muito pouco, ou quase nada, por lixiviação, exceção feita aos solos adubados com elevadas doses de fertilizante orgânico. Com isso, para culturas de ciclo curto, altamente exigentes do ponto de vista nutricional, deve-se manter o pH do solo entre valores de 6,0 a 7,0, colocar o fertilizante fosfatado próximos às raízes das plantas cultivadas, distribuir o fertilizante fosfatado em profundidade e usar fontes solúveis. Adubação a lanço, em superfície, sem incorporação, tem muito pouca eficiência, haja vista a muito baixa mobilidade do elemento, além de se constituir em maior risco ambiental por possibilidade de perda por escoamento superficial ou erosão.

### 3.3 Potássio (K)

O K é o segundo elemento requerido em quantidade pelas plantas e o cátion mais abundante no tecido vegetal. Diferentemente do N e do P, o K não tem função estrutural (constituente de metabólito) nas plantas, embora o elemento desempenhe papel fundamental de participar e ativar vários fenômenos fisiológicos no interior da planta, chegando a acionar mais de oitenta enzimas. Além disso, o K é o elemento mais importante envolvido na regulação osmótica e essa função permite ao K atuar em outros eventos fisiológicos fundamentais da planta, como absorção de água, manutenção do turgor das células, regulação da abertura e fechamento estomático, crescimento vegetal, favorecimento do transporte, redistribuição e armazenamento de carboidratos e nutrientes no interior da planta.

O potássio é absorvido como íon  $K^+$ , atinge as raízes das plantas em sua maioria por difusão, mas também uma parcela considerável pode ser por fluxo de massa. O teor de K nos tecidos vegetais pode variar de 4 a 43 g  $kg^{-1}$ , porém a concentração do K no citoplasma das células tende a ser mais estável. Em condições com de alta disponibilidade de K, as plantas podem absorver o elemento em quantias superiores às exigidas e acumulá-lo no vacúolo, para que essa porção armazenada seja utilizada em outros momentos. Essa acumulação extra não é uma exclusividade do K, podendo isso ser observado também para o P e o N, sendo denominado de consumo de luxo. Não obstante, em condições de pouca disponibilidade do elemento, há inicialmente redução no desenvolvimento das plantas, que posteriormente apresentam manchas cloróticas as quais avançam de maneira centrípeta. Plantas bem nutridas com K apresentam hastes mais fortes (evitando tombamentos), toleram mais seca, frio, ataques de pragas e algumas doenças e melhoram a qualidade de flores e de frutos, conferindo sabor e cor mais apurados. Além disso, podem ser diminuídos alguns efeitos deletérios do excesso de fertilizantes nitrogenados.

No solo, o K encontra-se em 4 compartimentos, sendo sua importância dependente do material de origem do solo e do seu grau de intemperismo. O 'K estrutural' é aquele que faz parte da estrutura de minerais primários e este compartimento é considerado *indisponível* às plantas. Somente a ação do intemperismo poderia disponibilizar este K. O 'K não trocável' é aquele associado a minerais secundários e está 'lentamente disponível' às plantas. Já o 'K trocável' (adsorvido aos colóides) e o K solúvel (solução do solo) estão 'prontamente disponíveis'.

A quantidade total de K no solo pode variar de 0,9 a 19 g  $kg^{-1}$ . Essa grande abrangência está relacionada à rocha que origina os solos e o grau de intemperismo. A maioria dos solos brasileiros

apresenta baixos teores de K total, em decorrência de os teores de minerais primários mais ricos em K (biotita, muscovita, microclima e ortoclásio) e secundários (vermiculita, ilita e esmectita) serem baixos e de predominarem minerais pobres neste elemento como a caulinita e os óxidos de Fe e de Al. O K da solução é chamado de fator 'intensidade', porque determina a velocidade de absorção pela planta. À medida que o K vai sendo absorvido pelas plantas ou lixiviado, o K da solução é repostado pelo K trocável da superfície dos coloides, o qual, por sua vez, pode ser reabastecido pelo K não trocável ou fixado nos minerais de argila do tipo 2:1 (pouco comum nos solos tropicais, ou seja, nossas condições). O K na solução do solo, prontamente disponível para as plantas, encontra-se em concentrações muito baixas, normalmente, por isso esta fração está intimamente relacionada ao potássio trocável e, quando este é insuficiente, às adubações.

Enquanto as plantas estão absorvendo K, o equilíbrio entre as formas de K-solo e K-solução tende a ser mantido, em função do poder tampão de potássio (PTK) que é definido como a relação entre o K que está em imediato equilíbrio com a solução do solo e suas quantidades adsorvidas no complexo de troca. Dependendo da espécie vegetal, a exaustão de K no solo pode acontecer rapidamente se o elemento não for repostado via adubação.

A lixiviação de potássio pode se tornar um evento importante em algumas condições. A perda de K por lixiviação será mais pronunciada quando o solo tiver baixa CTC – geralmente associada, em nossas condições, a ambientes de baixa quantidade de argila (solos de textura média a arenosa) – e/ou baixa quantidade de matéria orgânica, quando houver aplicação de elevadas doses desse nutriente no solo, em épocas de alta precipitação ou irrigação e em solos ácidos.

O cloreto de potássio (KCl) é a principal fonte de K utilizado nas adubações. Mais de 90% do K comercializado no Brasil é na forma de KCl. Esse fertilizante é solúvel em água e contém, em média, 58% de  $K_2O$ . Apresenta ainda de 45% a 48% de Cl. O sulfato de potássio ( $K_2SO_4$ ) também é uma fonte comum, apresentando 48% de  $K_2O$  e 15% de S. Em decorrência do seu teor de cloro ser menor que 2,5%, esse fertilizante é usado para culturas sensíveis ao Cl, como o fumo e a batata, e também fornece S, que é um macronutriente. O Sulfato de Potássio e Magnésio ( $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$ ) é uma fonte importante de alguns nutrientes, contendo 18% de  $K_2O$ , 4,5% de Mg e 22% a 24% de S. É uma fonte de potássio e magnésio solúveis em água e é importante para os casos em que magnésio e/ou enxofre são deficientes. O nitrato de potássio ( $KNO_3$ ) também é fonte de K. Esse fertilizante pode fornecer tanto o nitrogênio quanto o potássio às culturas sensíveis ao Cl. Apresenta cerca de 44% de  $K_2O$  e 13% de N. O nitrato de potássio é amplamente utilizado em aplicações foliares em fruteiras, hortaliças e algodão.

O posicionamento da adubação potássica tem sido realizado tanto na linha de semeadura quanto a lanço superficialmente, pois, diferentemente do P, a resposta das plantas é pouco influenciada pelo modo de aplicação, uma vez que a mobilidade do K é maior do que a de P. Apesar disso, em casos de teores muito baixos, faz-se necessária a aplicação incorporada ao solo, já a adubação de manutenção pode ser realizada tanto a lanço quanto na linha de semeadura, embora deva ser tomada a devida precaução em doses altas na linha de semeadura, principalmente em solos com baixa CTC, devido ao alto índice salino, principalmente do KCl. Embora a aplicação da dose total de K em uma única aplicação seja conveniente, o parcelamento das aplicações de K é vantajoso, pois diminui perdas por lixiviação e evita consumo de luxo dando oportunidade de as plantas absorverem o K aplicado.

### 3.4 Cálcio (Ca)

O Ca é um elemento importante como componente estrutural, pois atua como agente cimentante na forma de pectatos de Ca na lamela média entre as paredes celulares e estabiliza a membrana celular, promovendo a ligação entre os grupos fosfatos e carboxílicos dos fosfolipídios. Além dessas funções, o Ca também é modulador enzimático ligado a formações de celulose, lignina e compostos fenólicos que, por sua vez, são importantes substâncias ligadas a estresses bióticos e abióticos.

Os teores de Ca na planta podem variar de 4 a 40 g kg<sup>-1</sup>, o nutriente desloca-se para as raízes das plantas, principalmente, pelo fluxo de massa juntamente com o movimento da água no solo. Nesse processo, é importante que o Ca esteja em equilíbrio com os demais cátions, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>, pois o Ca compete pelo mesmo sítio ativo do carreador ligado à membrana, causando inibição competitiva<sup>1</sup> entre os elementos.

Após a absorção, o Ca é transportado ascendentemente via xilema, acumulando-se nos órgãos superiores. Em contrapartida, a redistribuição via floema é baixa por causa de sua principal função de formar compostos de baixa solubilidade e interações eletrostáticas. Até 90% do Ca no tecido vegetal pode estar como componente estrutural na parede celular. Dessa forma, o elemento é tido como pouco móvel na planta e, em casos de deficiência, os primeiros sintomas acontecem nas folhas mais novas, com clorose ao longo dos bordos, que avançam em direção à nervura; além disso, há redução no crescimento dos tecidos meristemáticos. Em algumas culturas, como o tomate, a deficiência de Ca causa desintegração das células e, por consequência, um distúrbio fisiológico chamado de podridão apical (fundo preto). A podridão das extremidades dos botões em melões se deve à deficiência de Ca. Em batata, a deficiência de Ca provoca a podridão mole; em maçã, causa a podridão amarga (*bitter pit*), diminuindo a firmeza do fruto e o tempo de estocagem.

No solo, a adição do Ca acontece inicialmente pelo intemperismo do material de origem. O nutriente pode ser perdido por lixiviação ou erosão, permanecer na solução, ser adsorvido nas cargas dos colóides do solo ou absorvido pelas plantas. O Ca disponível para as plantas compreende a porção trocável somada ao teor na solução do solo. Aumento dos teores de Ca juntamente com o Mg diminuem a atividade do Al, melhoram o crescimento das raízes e aumentam a atividade microbiana. Os minerais com maiores concentrações de Ca são dolomita (CaMg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), calcita (CaCO<sub>3</sub>), apatita e feldspatos cálcicos (Ca(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>8</sub>). Normalmente, solos com menores graus de intemperização e com maiores CTC possuem maiores teores de Ca disponível. Por outro lado, solos tropicais (maior grau de intemperismo) tendem a ter menores teores de Ca em decorrência da lixiviação, com pH menores e maiores teores de Al<sup>3+</sup>. Em solos de ambientes áridos, em que a evapotranspiração é maior que a precipitação, a permanência do Ca é favorecida no sistema, com solos apresentando mais altos teores do elemento.

Caso os teores sejam insuficientes, faz-se correção por meio da calagem e de adubação. A principal fonte/aporte de Ca na agricultura são as aplicações de calcário em solos ácidos (dolomita e calcita, principalmente) e de gesso agrícola (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O). A aplicação de gesso agrícola, pelo fato de ser mais solúvel que o calcário, favorece o aumento dos teores de Ca em profundidade, tendo em vista que o gesso favorece a formação de pares iônicos (CaSO<sub>4</sub>)<sup>0</sup> que apresentam maior mobilidade que Ca<sup>2+</sup> sozinho, descendo no perfil do solo, enriquecendo-o, com seus efeitos dependentes da dose aplicada. Alguns adubos fosfatados, como superfosfato simples e superfosfato triplo, também são fontes de Ca, contudo a aplicação desses fertilizantes deve ser feita com o objetivo de correção ou reposição de P e não de Ca.

Como essas práticas são realizadas periodicamente, espera-se que a deficiência de Ca raramente aconteça, visto que outros fatores, como a acidez, acabam limitando a produção antes mesmo do próprio Ca.

### 3.5 Magnésio (Mg)

O Mg tem como função principal ser o átomo central da molécula de clorofila que confere a cor verde às plantas. De maneira geral, cerca de 20% do Mg da planta faz parte do pigmento. Além

1 A inibição competitiva ocorre quando íons disputam pelo mesmo local (sítio) de absorção, diminuindo a absorção do elemento que estiver em menor concentração na solução do solo. Geralmente isso ocorre com íons com carga similar e/ou de mesma valência (Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>; Fe<sup>2+</sup> e Mn<sup>2+</sup>; K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup>).

disso, o elemento é constituinte de algumas proteínas, cofator de algumas enzimas, como o Ca, também é constituinte de pectinas das paredes celulares.

O processo de carboxilação na fotossíntese está diretamente ligado ao conteúdo de Mg, o elemento é coenzima na fixação de CO<sub>2</sub>. Assim, em casos de baixa disponibilidade de Mg nas folhas, a fixação de CO<sub>2</sub> é limitada.

O Mg atinge as raízes das plantas via fluxo de massa, semelhantemente ao Ca. O Mg é móvel tanto no xilema quanto no floema, podendo ser redistribuído para locais com maior requerimento metabólico. Por isso, em situações de deficiência do elemento, os sintomas se manifestam nas folhas mais velhas, normalmente por clorose internerval nas folhas próximas aos drenos de nutrientes. Entretanto, nesses casos, a severidade é muito alta, já comprometendo a qualidade e a produção das plantas. Os teores considerados adequados nas plantas estão entre 1,5 e 3,5 g kg<sup>-1</sup>.

No solo, o Mg é originado do intemperismo de rochas contendo minerais primários, como a dolomita, a biotita, a hornblenda e a serpentina, ou ainda, de alguns minerais secundários, como a vermiculita e a montmorilonita. Uma vez na solução do solo, o elemento pode ser lixiviado no perfil do solo, adsorvido no complexo de troca, precipitado na forma de algum mineral, perdido por erosão ou também ser absorvido pelas plantas. Normalmente, solos com textura argilosa e com altos teores de MOS apresentam maiores conteúdos de Mg devido à maior capacidade de retenção (CTC).

A disponibilidade de Mg não está somente ligada às suas quantidades isoladas no solo, mas também às interações com outros cátions. O Mg é o elemento que mais sofre com a presença em excesso de outros cátions, como o Ca e o K. Isso acontece, pois o raio iônico hidratado do Mg é maior que o raio iônico do Ca, fazendo que o átomo de Mg fique mais distante do complexo de troca e a atração eletrostática seja menor, promovendo maiores quantidades de Mg na solução, que poder ser lixiviado mais facilmente. Adubações pesadas com Ca e K também pode provocar a deficiência induzida de Mg por efeito de inibição competitiva. Além disso, a membrana plasmática das células tem maior afinidade ao Ca.

Os teores de Mg no solo podem ser baixos devido à baixa disponibilidade natural dos solos (solos tropicais), à aplicação de gesso agrícola fornecendo Ca ao sistema, a altas doses de K, aos solos estarem ácidos (baixos teores do elemento) e à própria absorção pelas plantas. Contudo, muitas vezes, a adubação magnésiana é negligenciada e afeta diretamente as respostas das plantas. Para suprir essa demanda, existem algumas fontes de Mg, principalmente os sulfatos, os carbonatos e os óxidos. Essas fontes apresentam diferentes teores de elementos acompanhantes e também solubilidade, que determinarão os diferentes manejos desses fertilizantes. Os sulfatos são fontes mais solúveis, ou seja, o Mg se tornará disponível mais rapidamente às plantas. Dependendo da situação em que esteja o elemento no solo, esta fonte deve ser priorizada ao invés de fontes de menor solubilidade, a fim de garantir suprimento adequado de Mg durante as fases de alta demanda e em condições climáticas desfavoráveis. O uso de calcários dolomíticos na correção da acidez do solo constitui um meio eficaz de se prevenir a deficiência do elemento.

### 3.6 Relação Ca:Mg

A energia de adsorção do Mg é menor que a do Ca, com solos apresentando teores de Ca > Mg uma necessidade, com o inverso indicativo de desequilíbrio. Com isso, a participação relativa adequada de Mg na CTC pode variar de 12% a 25%. Já a participação relativa de Ca pode variar de 30% a 50%. Alguns técnicos e agricultores acreditam que relações Ca:Mg de 4:1 a 6:1 seriam valores ideais para o desenvolvimento adequado das culturas e eles têm gastado muita energia e dinheiro para atingir esses valores. Ter relação nessa faixa é adequado, mas não é fundamental e nem sempre suficiente. Vários trabalhos têm demonstrado que as plantas têm se desenvolvido bem em relações Ca:Mg de 1:1 a 15:1, desde que os teores de Mg estejam em níveis mínimos satisfatórios. Para se ter um bom desenvolvimento de plantas, devem-se levar em consideração três informações: a) o pH adequado para o desenvolvimento da cultura (geralmente entre 6,0 a 7,0); b) os teores de Ca, de Mg e de K

que devem estar obrigatoriamente na seguinte ordem decrescente  $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$ ; c) os teores de Ca e de Mg do solo que devem ser altos, valores maiores que  $2,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para o Ca e  $1,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para o Mg.

### 3.7 Enxofre (S)

Dentre as funções do S nas plantas, destacam-se de o fato do mesmo ser componente estrutural de aminoácidos como a metionina e a cisteína e também de ser estabilizante de proteínas por meio das ligações dissulfeto (S-S), que mantêm a estabilidade das ligações terciárias das proteínas. O S está presente em membranas (sulfolipídeos) e como grupo prostético de enzimas e coenzimas (nitrogenase, ferredoxina, biotina e tiamina). Essas funções são imprescindíveis para os processos de fotossíntese, a resistência ao déficit hídrico, a fixação biológica de nitrogênio, o desenvolvimento radicular, entre outras funções.

O teor de S na planta pode variar de 2 a  $5 \text{ g kg}^{-1}$  de acordo com a espécie. A absorção do elemento é na forma de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), podendo sofrer inibição competitiva com outros ânions, como fosfatos, cloreto, selenato e aspartato. Outra forma de absorção pode ser via foliar, na forma de sulfito ou de S elementar.

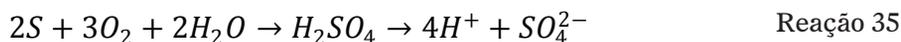
A redistribuição do S na planta é considerada de média a baixa, isso porque apenas 20% do S é redistribuído para outros órgãos da planta; normalmente quando isso ocorre, o S está presente na forma de glutatona. Devido a essa baixa mobilidade, os sintomas de deficiência de S aparecem nas folhas mais novas, que ficam com coloração amarelo-esverdeada; além disso, pode haver crescimento raquítico das plantas, já as folhas mais velhas tendem a permanecer sem manchas amareladas. Em casos severos de deficiência, as folhas tornam-se cloróticas. Na falta de nitrogênio e de enxofre, a planta pode tomar uma coloração verde-amarelada uniforme, com folhas velhas e novas amareladas. A deficiência de enxofre assemelha-se muito à deficiência de nitrogênio, com a diferença de que a clorose da deficiência do N se manifesta nas folhas mais velhas, inicialmente.

No solo de regiões tropicais, os teores de S encontram-se entre 5 e  $10 \text{ mg dm}^{-3}$ , sendo que cerca de 90% do S encontra-se na forma orgânica que é gradualmente mineralizado a  $\text{SO}_4^{2-}$  e chega às raízes por meio do fluxo de massa. Pelo fato de a fração orgânica desse nutriente ser a principal fonte para as plantas, a mineralização e a imobilização da matéria orgânica por bactérias e fungos do solo controlam a disponibilidade de S para as plantas. Quando o material orgânico é adicionado e tem relação C/S < 200:1, ocorrerá mineralização e o S irá para o solo. Se a relação C/S do material orgânico adicionado ao solo for > 400:1, ocorrerá imobilização do S pelos microrganismos do solo, podendo haver até consumo do S do solo pelos microrganismos durante o processo de decomposição.

Após o S ser liberado na solução na forma de  $\text{SO}_4^{2-}$ , que é relativamente móvel no solo, pode ser perdido por lixiviação, com perdas na ordem de 20 a  $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de S. Em casos de precipitações extremas, pode ocorrer deficiência temporária, principalmente em solos arenosos.

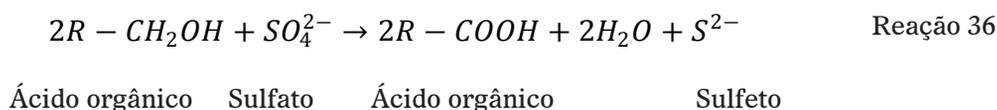
O ciclo do enxofre é dinâmico, apresentando diferentes formas e estados de oxidação, dentre eles, o sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$  – nox -2), o enxofre elementar (S – nox 0), o tiosulfato ( $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  – nox +2), o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$  – nox +4) e o sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$  – nox +6).

A oxidação do S pode ser descrita da seguinte forma tomando, como exemplo o sulfeto de hidrogênio (Reação 34) e enxofre elementar (Reação 35):



As reações de oxidação do S são realizadas por bactérias que atuam em ampla faixa de pH. O produto dessa oxidação gera  $H_2SO_4$  que leva acidificação do solo e liberação de  $SO_4^{2-}$  que está prontamente disponível para as plantas. Essas reações dependem de uma série de fatores ambientais (disponibilidade de água, temperatura do solo etc.).

As reações de redução do S ocorrem geralmente em ambientes saturados com água por longos períodos, e dois gêneros específicos de bactérias anaeróbicas (*Desulfovibrio* e *Desulfotomaculum*) controlam estas reações (Reação 36).



Nessas condições, o íon sulfeto pode reagir com  $Fe^{2+}$  e  $Mn^{2+}$  (livres na solução), formando sulfetos de Fe e Mn (insolúveis) ou sofrer hidrólise e formar sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), que é um gás fétido, com cheiro característico de ovo podre.

O  $SO_4^{2-}$  no solo pode permanecer solúvel e ser absorvido pelas plantas, ser adsorvido ou mesmo fixado na CTA do solo; pode sofrer algumas reações com íons não ácidos ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $K^+$ ), formando pares iônicos ( $CaSO_4^0$ ,  $MgSO_4^0$ ,  $K_2SO_4^0$ ), os quais podem se movimentar, com mais facilidade que os respectivos íons, para camadas mais profundas do solo. Essa mobilidade do S associada à menor participação da MOS nas camadas mais profundas do solo, à formação residual de minerais do tipo 1:1 e óxidos e hidróxidos de Fe e Al, em solos tropicais, proporcionando CTA dependendo do pH em que se encontram os solos, explicam as maiores concentrações de  $S-SO_4^{2-}$  nas camadas mais profundas do solo.

As principais fontes de S são gesso agrícola (16% de S), sulfato de amônia (12% de S), superfosfato simples (12% de S) e S elementar (de 95% a 100% de S), porém o S elementar é uma fonte insolúvel e precisa ser oxidada no solo pelas tiobactérias a sulfato para estar disponível às plantas (Reação 35). As chuvas podem fornecer de 5 a 30 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> por meio dos gases como  $SO_2$  que são dissolvidos na água especialmente em regiões industrializadas.

## 4 Micronutrientes

A disponibilidade de nutrientes no solo pode proporcionar três condições que determinarão o estado nutricional da planta com base nos teores de nutrientes contidos na mesma: a) insuficiente; b) suficiente; c) tóxico. Quando o teor de um nutriente no solo está muito baixo, o crescimento da planta pode ser restringido (nível de deficiência) e, com o aumento da disponibilidade do nutriente (p.e. adubação), há uma resposta positiva de crescimento pela planta. A disponibilidade suficiente de um nutriente proporciona crescimento adequado da planta (nível de suficiência). Nessa faixa de disponibilidade, aumentos na disponibilidade do nutriente proporcionarão aumento na absorção do mesmo, sem propiciar aumento no crescimento da planta. Aumentando ainda mais a disponibilidade de nutrientes às plantas, essas quantias poderão se tornar excessivas, levando as plantas a um estado de toxidez (nível de toxidez ou intervalo de toxidez) em que começarão a sofrer alguns distúrbios fisiológicos.

Para os macronutrientes, a faixa de suficiência é larga, sendo muito raros os casos de toxidez. Por outro lado, para os micronutrientes, a faixa de suficiência é mais estreita, sendo possível facilmente passar de condição de deficiência para toxidez por meio de adubações.

Vários fatores influenciam a disponibilidade dos micronutrientes, cabendo ressaltar em áreas de produção de hortaliças-fruto o uso de adubações pesadas de P, de adubação orgânica e de calcário.

As reações dos micronutrientes metálicos com o P é uma reação que diminui a disponibilidade dos micronutrientes e do P. Quando altas doses de P são aplicadas ao solo, reações de precipitação poderão ocorrer entre o P e o micronutriente, diminuindo a solubilidade e a disponibilidade dos mesmos. Essa reação é importante para todos os micronutrientes metálicos (Co<sup>2+</sup>, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn), mas especial atenção tem sido dada ao Zn. A adubação orgânica, dependendo da sua composição (origem), pode ser fonte de vários macro e micronutrientes. Em alguns casos, elementos nutrientes em excesso e elementos não considerados nutrientes podem causar toxidez em várias plantas ou mesmo levar à deficiência induzida pela inibição competitiva de um elemento (nutriente ou não) em excesso sobre outro. Além disso, a MOS é componente controlador da disponibilidade dos nutrientes no solo. Isso pode acontecer pelo processo de mineralização e liberação desses nutrientes no solo ou por meio da formação de complexos organometálicos (solúveis ou insolúveis), que impedem que o micronutriente interaja com os minerais do solo ou outros íons dissolvidos. Esse efeito pode ser benéfico em vários casos pela formação de quelatos entre compostos orgânicos e micronutrientes que manterão os mesmos mais disponíveis (p.e. Fe, Mn). Porém, para outros micronutrientes, a presença de altos valores de MOS diminui a disponibilidade, por exemplo, de Cu.

O pH do solo influencia a disponibilidade dos nutrientes (Figura 3). Os micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn diminuem a disponibilidade com o aumento do pH. Cloro e Mo aumentam sua disponibilidade com o aumento do pH. O B apresenta sua máxima disponibilidade entre pH 6,0 e 7,0; em pHs superiores ou inferiores a esses, a disponibilidade de B é diminuída. O aumento e a diminuição da disponibilidade desses micronutrientes são controlados por algumas alterações que ocorrem no solo com a mudança do pH, como alteração na CTC e na CTA do solo, alteração das espécies químicas dos elementos, alteração na solubilidade dos minerais que contêm micronutrientes, mineralização da MOS e/ou imobilização pelos microrganismos.

O estado de oxidação de alguns nutrientes influencia a disponibilidade dos mesmos para as plantas. Dentre os micronutrientes, Cu, Fe, Mn e Ni ocorrem no solo em mais de um estado de valência. A mudança de valência desses elementos, geralmente, ocorre por meio de microrganismos ou pela matéria orgânica. Em condições aeróbicas e nos pHs dos solos agrícolas, tendem a prevalecer formas menos solúveis de Cu, Fe e Mn. Condições de má drenagem no solo podem levar ao aumento de formas solúveis desses elementos pela alteração deles a formas reduzidas.

A quantidade natural de micronutrientes no solo apresenta estreita relação com o material de origem do solo e com o grau de intemperismo do mesmo.

## 4.1 Boro (B)

O B pode ser absorvido nas formas de  $H_3BO_3$ ,  $H_2BO_3^-$  e  $H_4BO_4^-$ . O processo de entrada nas membranas é passivo, possuindo alta permeabilidade. Para a maioria das culturas, o elemento é pouco móvel, com exceção para algumas espécies que contêm polióis no floema que aumentam a mobilidade de B. Na maioria das culturas, a deficiência ocorre em folhas novas, com encarquilhamento, seguido de morte das regiões meristemáticas e abortamento de flores e de frutos. Em tomate, a deficiência de B pode promover a rachadura do caule.

O B está diretamente associado ao crescimento e ao desenvolvimento celular e à integridade de membranas, pois, assim como o Ca e o Mg, também faz parte de compostos na parede celular, como as pectinas. Além disso, tem participação na síntese da base nitrogenada uracila, importante na formação de proteínas e tolerância ao Al.

O transporte de fotoassimilados também é muito importante, uma vez que há formação do complexo açúcar-borato que tem maior solubilidade nas membranas. O desenvolvimento de tubo polínico também é outra função fundamental do elemento.

---

2 Não é considerado micronutriente, mas sim nutriente benéfico para plantas leguminosas.

No solo, a principal fonte de B é a matéria orgânica; uma vez na solução do solo, o B pode ser imediatamente absorvido pelas plantas ou estar sujeito a lixiviação, visto que não é facilmente adsorvido aos colóides do solo pela ausência de cargas da forma predominante que é  $H_3BO_3$ .

Os teores totais de B em solos brasileiros podem variar de 31 a 54  $mg\ kg^{-1}$  e estar disponíveis de 0,06 a 0,32  $mg\ dm^{-3}$  (MALAVOLTA; BOARETO; PAULINO, 1991). Na planta, os valores são bastante amplos, porém se esse nutriente é mais exigido pelas plantas dicotiledôneas do que pelas monocotiledôneas. Os valores na matéria seca das folhas variam entre 10 e 100  $mg\ kg^{-1}$  (DECHEN; HAAG; CARMELLO, 1991), entretanto os valores adequados em hortaliças pode variar de 20 a 200  $mg\ kg^{-1}$  (MESQUITA FILHO; SOUZA; FURLANI, 2001).

As principais fontes de B são Bórax (11% de B), Solubor (20% de B), ácido bórico (17% de B) e Ulexita (8% de B). As adubações de correção via solo são as mais comuns, sendo utilizado fritas ou bórax com doses variando de 0,5 a 2  $kg\ ha^{-1}$ . Em solos arenosos, o uso de colemanita (15% de B) tem-se mostrado mais eficiente que o uso de Bórax. Devido à baixa mobilidade do B na planta, as aplicações foliares podem se tornar mais onerosas, sendo necessárias várias aplicações (VOLKWEISS, 1991).

## 4.2 Cloro (Cl)

O Cl é absorvido, transportado e redistribuído na forma de ânion  $Cl^-$ , não forma nenhum complexo na planta. As funções do cloro estão ligadas à fotólise da água em conjunto com o Mn, fazendo parte do complexo enzimático no fotossistema II. Juntamente com K, é responsável pela regulação do potencial osmótico, sendo o principal exemplo a abertura e o fechamento estomático. Além disso, o  $Cl^-$  é o íon que neutraliza as cargas nos compartimentos intracelulares devido à sua alta mobilidade. Nos raros casos de deficiência do elemento, os sintomas ocorrem nas folhas mais velhas. Por outro lado, quando em excesso, o elemento pode inibir a absorção de nitrato, de sulfato e de fosfato.

No solo, é um elemento de alta disponibilidade, uma vez que o aporte via fornecimento de KCl é muito alto para a maioria das culturas. Apesar disso, é um elemento de alta mobilidade no perfil do solo. Os teores disponíveis de Cl no solo variam entre 0,4 a 34  $mg\ dm^{-3}$  (MALAVOLTA; BOARETO; PAULINO, 1991). Os valores na matéria seca das plantas variam entre 2 a 20  $g\ kg^{-1}$  (DECHEN; HAAG; CARMELLO, 1991).

## 4.3 Cobre (Cu)

O Cu é absorvido na forma de  $Cu^{2+}$  pelas plantas e é transportado ascendentemente complexado com aminoácidos e proteínas, principalmente as que têm S em sua composição, como a cisteína. No floema, o elemento é pouco móvel, tendo seus sintomas de deficiência como o amarelecimento e o murchamento visíveis nas folhas e nos ramos mais jovens.

Assim como o Mn, o Cu também atua no processo da fotossíntese. Ele é um dos constituintes da plastocianina que é importante no transporte de elétrons entre os fotossistemas II e I. Cerca de 70% do Cu está ligado a esse composto. Além disso, é importante para a formação da citocromo oxidase que catalisa as reações de oxidação terminal da cadeia transportadora de elétrons e também a superóxido dismutase que atua como enzima detoxificadora na presença de espécies reativas de oxigênio. O Cu favorece a formação do grão de pólen e, em sua deficiência, haverá má formação e menor reserva de amido nas anteras. Nas plantas, de maneira geral, o teor adequado do elemento está entre 5 e 20  $mg\ kg^{-1}$ .

No solo, sua dinâmica é semelhante à do Fe e do Mn. Ele também tem seu estado de oxidação alterado de ( $Cu^{2+} \leftrightarrow Cu^+$ ). A maioria do Cu no solo encontra-se na fração mineral ou complexado

na matéria orgânica, nos compostos fenólicos, ácidos húmicos e fúlvicos. No complexo de troca, o elemento é adsorvido aos colóides como cátion divalente. A deficiência é mais evidente em solos alagados, de turfa, várzeas e com solos com altos teores de matéria orgânica, dada a alta estabilidade dos quelatos formados entre o Cu e a matéria orgânica. Em solos de textura mais arenosa e com elevado pH, observa-se baixa disponibilidade de cobre para as plantas. A interação negativa entre altos níveis de nitrogênio, excesso de fósforo, ferro, zinco e alumínio também podem reduzir a disponibilidade do cobre.

Os teores totais de Cu em solos brasileiros podem variar de 2 a 335 mg kg<sup>-1</sup> e estar disponíveis de 0,1 a 6,0 mg dm<sup>-3</sup> (MALAVOLTA; BOARETO; PAULINO, 1991). Os valores na matéria seca das plantas variam de 1 a 10 mg kg<sup>-1</sup> (DECHEN; HAAG; CARMELLO, 1991), contudo os valores adequados para hortaliças pode variar de 4 a 60 mg kg<sup>-1</sup> (MESQUITA FILHO; SOUZA; FURLANI, 2001).

As principais fontes de Cu são sulfato de cobre (25% de Cu), óxido de cobre (75% de Cu - insolúvel), fontes quelatizadas (oxalato, EDTA, HEDTA e poliflavonóide) com concentrações variáveis de Cu (de 5% a 40%). As adubações via solo variam de 1 a 7 kg ha<sup>-1</sup>. As aplicações via foliar podem ser realizadas desde que usadas fontes solúveis ou quelatizadas (VOLKWEISS, 1991).

#### 4.4 Ferro (Fe)

O Fe é absorvido na forma de Fe<sup>2+</sup>, portanto a absorção das plantas está diretamente ligada à sua capacidade em reduzir o Fe<sup>3+</sup> na rizosfera por meio da redução do pH e da excreção de fitossideróforos. A presença de outros micronutrientes catiônicos, como o Mn, pode causar inibição competitiva. Uma vez absorvido o Fe, o transporte na planta é feito de maneira complexada por moléculas orgânicas, principalmente o citrato; já o movimento via floema pouco ocorre, sendo então o elemento considerado pouco móvel e os sintomas de deficiência inicialmente acontecem em folhas mais jovens. Algumas vezes, plantas deficientes apresentam teores totais de Fe mais elevado que plantas com níveis adequados. Isso ocorre devido à precipitação do elemento no apoplasto ou sua ligação com P formando complexos insolúveis. Por outro lado, em casos de alta disponibilidade, o armazenamento de Fe no vacúolo é feito na forma de fitoferritina.

A principal função do Fe está relacionada aos processos de oxirredução ligado a enzimas, também é constituinte das leghemoglobinas e nitrogenase. Além disso, o elemento faz parte da síntese da molécula da clorofila e atua no metabolismo de ácidos nucleicos.

No solo, normalmente não há problemas de disponibilidade de Fe, pois naturalmente tende a ser o micronutriente em maiores quantidades. Apesar disso, alguns fatores, como supercalagem (pH na faixa alcalina), umidade excessiva (favorecendo redução do Mn), altos teores de matéria orgânica e excesso de P, podem induzir a indisponibilidade de Fe, embora o mais frequente seja o Fe reduzindo a disponibilidade de P (ver fixação de P), haja vista os altos teores do elemento em solos minerais.

Os teores totais de Fe em solos brasileiros podem variar de 10 a 100 mg kg<sup>-1</sup> (BORKERT; PAVAN; BATAGLIA, 2001). Os valores na matéria seca das plantas são da ordem de 100 mg kg<sup>-1</sup> (DECHEN; HAAG; CARMELLO, 1991), já os valores adequados para hortaliças variam de 30 a 550 mg kg<sup>-1</sup> (MESQUITA FILHO; SOUZA; FURLANI, 2001).

Não tem sido comum adubações com Fe em plantas cultivadas em solos ácidos, mas é comum em hidroponia e em solos calcários. As principais fontes de Fe são sulfato ferroso (19% de Fe), sulfato férrico (19% de Fe), fontes quelatizadas (EDTA, HEDTA, EDDHA, DTPA, MPP, lignossulfonato e poliflavonoide) com concentrações variáveis de Fe (de 5% a 14%) (VOLKWEISS, 1991).

## 4.5 Manganês (Mn)

O Mn é absorvido pelas raízes das plantas na forma de  $Mn^{2+}$ . O seu transporte é via xilema e complexado com ácidos orgânicos (citrato) ou precipitado com o P. Semelhantemente ao Fe, o elemento é pouco móvel no floema e os sintomas de deficiência acontecem nos órgãos mais novos. A característica da deficiência é muito semelhante ao Mg, que é a clorose internerval, mas, enquanto o Mn ocorre em folhas novas, o Mg ocorre em folhas mais velhas.

O Mn está envolvido no fluxo de elétrons do fotossistema II para o fotossistema I e na quebra da molécula da água (fotólise da água) – fase fotoquímica da fotossíntese. A ausência de Mn causa diminuição da fixação de  $CO_2$  na fotossíntese. Além disso, o elemento participa como grupo prostético de várias enzimas, como superóxido dismutase, que é produzida em situações de estresse, malato desidrogenase e isocitrato desidrogenase, além de ser requerido no metabolismo de fenóis que é importante para síntese de lignina e importante fator na resistência da planta aos agentes patogênicos.

No solo, depois do Fe, é o micronutriente em maiores teores. Uma das suas principais características é de oxirredução ( $Mn^{4+} \leftrightarrow Mn^{3+} \leftrightarrow Mn^{2+}$ ), que ocorre em condições de potencial redox 401 mV, com probabilidade de excesso em solos com algum grau de compactação. Os teores de Mn em solução podem variar de 0,1 a 100  $mg\ dm^{-3}$  dependendo das características do solo. O Mn é atraído eletrostaticamente no complexo de troca do solo, esta fração encontra-se em equilíbrio com a solução. Cerca de 10% do Mn total podem ocorrer nos solos na forma de óxidos e de hidróxidos de solubilidade variável, sendo essa quantidade de pouca ou nenhuma disponibilidade para as plantas. A deficiência de manganês, comumente, ocorre em solos orgânicos, alagados (excesso de Fe) e muito alcalinos.

Os teores totais de Mn em solos podem variar de 10 a 2.200  $mg\ kg^{-1}$  e ser disponíveis de 0,1 a 140  $mg\ dm^{-3}$  (MALAVOLTA; BOARETO; PAULINO, 1991). Os valores adequados para hortaliças podem variar de 20 a 500  $mg\ kg^{-1}$  (MESQUITA FILHO; SOUZA; FURLANI, 2001).

As principais fontes de Mn são sulfato manganoso (de 26% a 28% de Mn), óxido manganoso (de 41% a 68% de Mn) e fontes quelatizadas (EDTA, MPP e poliflavonóide) com concentrações variáveis de Mn (de 8,5% a 12%) (VOLKWEISS, 1991).

## 4.6 Molibdênio (Mo)

O Mo é um dos micronutrientes menos exigido em quantidade pelas plantas, é absorvido, transportado e redistribuído na forma de  $MoO_4^{2-}$  e, em alguns casos, pode ser transportado complexado com carboidratos. Apesar de apresentar pouca mobilidade no floema, os sintomas de deficiência de Mo são muito semelhantes ao do nitrogênio.

A principal função do Mo é ser cofator enzimático de rotas ligadas ao metabolismo do nitrogênio como a nitrogenase e a redutase do nitrato, justificando assim os sintomas parecidos com nitrogênio.

Na solução do solo, pode ser encontrado nas formas  $MoO_4^{2-}$  ou  $HMoO_4^-$ , conforme o pH, com sua disponibilidade aumentada à medida que o pH do solo aumenta. Além disso, pode sofrer processos de oxirredução ( $Mo^{4+} \leftrightarrow Mo^{6+}$ ).

Os teores totais de Mo em solos brasileiros podem variar de 0,06 a 6,0  $mg\ kg^{-1}$  e ser disponíveis de 0,01 a 1,4  $mg\ dm^{-3}$  (MALAVOLTA; BOARETO; PAULINO, 1991). Os valores adequados para hortaliças podem variar de 0,4 a 3,3  $mg\ kg^{-1}$  (MESQUITA FILHO; SOUZA; FURLANI, 2001).

A adubação com o Mo, devido serem necessárias baixas doses, tem sido realizada em tratamento de sementes e aplicações foliares. As principais fontes de Mo são molibdato de sódio (39% de Mo), paramolibdato de amônio (54% de Mo) e óxido de molibdênio (66% de Mo) (VOLKWEISS, 1991).

## 4.7 Níquel (Ni)

O Ni foi o último dos micronutrientes a ser considerado um elemento essencial, em 1975. É absorvido na forma de  $\text{Ni}^{2+}$  ou na forma quelatizada com compostos orgânicos; nessas mesmas formas, são transportados via xilema. O Ni é considerado um elemento móvel no floema e tende a acumular-se nos órgãos em desenvolvimento. De maneira geral, os teores do elemento são muito baixos no tecido vegetal (de 0,05 a 5  $\text{mg kg}^{-1}$ ) e a grande amplitude está relacionada às diferentes espécies vegetais. O sintoma de deficiência é conhecido como “orelha de rato”, embora outros sintomas possam acontecer, mas ainda são desconhecidos. Por outro lado, o excesso de Ni pode causar toxidez às plantas, alguns trabalhos mostram que o excesso pode causar menor desenvolvimento das raízes.

O Ni apresenta participação na síntese de etileno e na germinação de sementes e é componente estrutural da enzima hidrogenase.

No solo, os teores do elemento são muito variáveis e dependentes do material de origem. Solos mais jovens tendem a apresentar teores mais altos desse nutriente. A concentração total pode variar de 4 a 2000  $\text{mg dm}^{-3}$ , mas, apesar disso, somente 0,001% desses valores são considerados disponíveis e, na maioria das vezes, esse teor é menor que 1  $\text{mg dm}^{-3}$ . Os teores de Ni apresentam relação diretamente proporcional ao teor de argila, CTC e inversamente proporcional ao pH. Além disso, pode haver competição com outros cátions pelos sítios de adsorção no complexo de troca, principalmente com Fe, Zn e Cu, por causa de semelhanças como valência e raio iônico hidratado.

## 4.8 Zinco (Zn)

O Zn é absorvido na forma de  $\text{Zn}^{2+}$  e sofre inibição competitiva com  $\text{Cu}^{2+}$  e não competitiva com P. O transporte via xilema acontece complexado com ácidos orgânicos como o malato e o citrato, já a redistribuição do elemento é dependente do estado nutricional da planta quanto ao elemento, normalmente quanto maior for o conteúdo, maior será a redistribuição. O Zn é considerado um elemento pouco móvel, sendo redistribuído também em formas complexadas. Em situações de deficiência, os sintomas de verde pálido em folhas mais novas aparecem, as plantas restringem o crescimento e encurtam os entrenós.

O Zn é importante para formação de complexos com N, O e S, dando caráter funcional às enzimas, como rubisco, anidrase-carbônica e superóxido dismutase. Também é importante na manutenção e na integridade dos ribossomos e na ativação de RNAses e polimerases, além de ser um dos precursores do triptofano, importante aminoácido ligado à produção do hormônio auxina, responsável pelo crescimento das plantas.

No solo, diferentemente dos outros micronutrientes catiônicos, o Zn não sofre reações de oxirredução. É um dos micronutrientes que mais limita a produção. Em solos com textura mais arenosa, o Zn pode sofrer lixiviação para camadas subsuperficiais do solo. Solos neutros e alcalinos, ou ainda, que receberam pesadas adubações com P, podem sofrer indisponibilidade de Zn devido à interação negativa P x Zn. Altos teores de matéria orgânica podem complexar o Zn de modo que processos que resultam em perda da camada superficial do solo mais rica em MOS (erosão) podem intensificar a deficiência do mesmo.

Os teores totais de Zn em solos brasileiros podem variar de 4 a 263  $\text{mg kg}^{-1}$  e disponíveis de 0,1 a 45  $\text{mg dm}^{-3}$  (MALAVOLTA; BOARETO; PAULINO, 1991). Os valores nas folhas das hortaliças podem variar de 5 a 250  $\text{mg kg}^{-1}$  (MESQUITA FILHO; SOUZA; FURLANI, 2001).

As principais fontes de Zn são sulfato de zinco (23% de Zn), óxido de zinco (78% de Zn) e fontes quelatizadas (EDTA, NTA, HEDTA, lignossulfonato e poliflavonoide) com concentrações variáveis de Fe (de 5 a 14%) (VOLKWEISS, 1991).

## 5 Fontes de Nutrientes

Para que as culturas expressem seu potencial produtivo, é necessário que apresentem a melhor condição nutricional possível, alcançada quando o solo se apresenta equilibrado com relação aos teores dos nutrientes disponíveis para as plantas.

A melhoria das características químicas do solo, com vistas à busca desse equilíbrio, pode ser realizada por meio do manejo da adubação. São exemplos a realização da calagem e a gessagem, que possibilitam ajuste do pH, diminuição da atividade do Al tóxico no solo e fornecimento de Ca, Mg e S para as plantas. O fornecimento dos demais nutrientes é realizado por meio de adubações que podem ser divididas em orgânica, organomineral e mineral.

Independentemente do manejo químico adotado, sua recomendação deve considerar dois princípios básicos: a) os atributos do solo anterior à adoção do manejo, que deve ser mensurada por meio da análise química do solo, e b) a necessidade da cultura.

### 5.1 Adubação Orgânica

A adubação orgânica consiste da aplicação no solo de resíduos orgânicos tanto de origem animal quanto vegetal. A aplicação desses resíduos é importante, pois contribui para a melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

### 5.2 Adubos Verdes

A adubação verde é o uso de plantas especificamente para fornecer biomassa e nutrientes, geralmente, antes de uma cultura importante economicamente. Na adubação verde, ocorre o cultivo de determinadas espécies de plantas com fins não comerciais. Essas plantas podem ou não ser incorporadas ao solo. As principais alterações observadas são as na estrutura do solo, por meio do aumento da matéria orgânica do solo e de sua atividade biológica, aumento de nutrientes no solo pelo fornecimento de nitrogênio e reciclagem de outros nutrientes.

Um exemplo de emprego de plantas na adubação verde é o uso de leguminosas que têm capacidade de associar-se com bactérias diazotróficas, em uma associação simbiótica (geralmente formando nódulos nas raízes) capaz de converter o  $N_2$  do ar do solo em  $NH_4^+$  e fornecê-lo para a planta, o que possibilita que essas plantas sejam mais ricas em nitrogênio. As leguminosas geralmente apresentam relação C/N baixa (< 25:1), não acontecendo a imobilização do N do solo pelos microrganismos decompositores, que acontece no caso dos materiais de relação C/N > 30. Isso possibilita que a decomposição/mineralização do adubo verde seja rápida, fornecendo os nutrientes nele contido para a próxima cultura.

Além desse aspecto, o uso de plantas no manejo das culturas excede as questões nutricionais. Em áreas com presença de patógenos fitopatogênicos de solo, como os nematoides, as crotalárias beneficiam o crescimento radicular das plantas da cultura sequencial pela ação inibitória na população de nematoides fitopatogênicos no solo. Um aspecto relevante é que, no processo de fixação simbiótica, permite-se incorporar N ao solo naturalmente (temperatura e pressão ambiente), com baixo custo energético, ao contrário do que acontece na fixação industrial do N (Reação 33), para a produção de fertilizantes nitrogenados.

No geral, as plantas utilizadas na adubação verde apresentam baixo teor de nutrientes em sua composição (Tabelas 6 e 7). O uso exclusivo dessas na adubação é insuficiente para suprir a necessidade nutricional das culturas comerciais, ou seja, na maior parte dos casos, para obtenção de produtividades maiores, haverá necessidade de complementação nutricional com fertilizantes

#### 4 PRINCÍPIOS DE FERTILIDADE DO SOLO, ADUBAÇÃO E NUTRIÇÃO MINERAL

(mineral ou organomineral). Dessa maneira, os maiores benefícios da adubação verde serão como condicionador de solo, pois os resíduos das plantas podem ser utilizados para a cobertura da superfície do solo, aumentando a eficiência no uso da água, pela redução da evapotranspiração, ajudando no controle de plantas daninhas, na redução de perdas do solo por erosão e inibindo pragas e doenças.

**Tabela 6 - Composição química de diferentes espécies de inverno**

| Espécie            | N    | P    | K    | Ca   | Mg   | C     | Zn                  | Cu | Mn  | Relação C/N |
|--------------------|------|------|------|------|------|-------|---------------------|----|-----|-------------|
|                    | %    |      |      |      |      |       | mg kg <sup>-1</sup> |    |     |             |
| Chicharo           | 2,23 | 0,10 | 2,90 | 0,39 | 0,19 | 41,91 | 22                  | 11 | 52  | 18,79       |
| Aveia preta        | 1,65 | 0,10 | 1,60 | 0,25 | 0,17 | 59,81 | 11                  | 7  | 102 | 36,25       |
| Aveia branca       | 0,81 | 0,05 | 2,40 | 0,24 | 0,17 | 38,52 | 9                   | 6  | 138 | 47,56       |
| Azevém             | 1,34 | 0,07 | 2,60 | 0,41 | 0,22 | 59,22 | 23                  | 9  | 214 | 44,19       |
| Centeio            | 1,22 | 0,08 | 1,40 | 0,18 | 0,14 | 44,59 | 15                  | 6  | 53  | 36,55       |
| Girassol           | 1,80 | 0,15 | 2,40 | 1,55 | 0,62 | 39,95 | 31                  | 18 | 96  | 22,19       |
| Espérgula          | 1,61 | 0,15 | 3,35 | 0,31 | 0,93 | 40,49 | 44                  | 11 | 136 | 25,15       |
| Ervilhaca peluda   | 1,88 | 0,10 | 2,30 | 0,44 | 0,20 | 35,06 | 26                  | 9  | 61  | 18,65       |
| Ervilhaca comum    | 2,02 | 0,13 | 2,10 | 0,86 | 0,27 | 37,61 | 24                  | 9  | 87  | 18,62       |
| Serradela          | 1,79 | 0,14 | 3,55 | 1,10 | 0,45 | 40,14 | 59                  | 13 | 97  | 22,42       |
| Nabo forrageiro    | 2,96 | 0,19 | 3,90 | 2,15 | 0,95 | 34,42 | 49                  | 8  | 84  | 11,63       |
| Tremoço branco     | 1,68 | 0,09 | 2,66 | 0,46 | 0,38 | 24,93 | 57                  | 12 | 330 | 14,84       |
| Tremoço amarelo    | 1,91 | 0,16 | 2,50 | 0,59 | 0,39 | 27,45 | 66                  | 14 | 359 | 14,37       |
| Tremoço azul       | 1,39 | 0,06 | 2,40 | 0,46 | 0,35 | 26,96 | 24                  | 13 | 230 | 19,40       |
| Ervilha forrageira | 2,09 | 0,12 | 1,50 | 0,70 | 0,20 | 39,77 | 8                   | 22 | 102 | 19,03       |

Fonte: Calegari (1993).

**Tabela 7 - Composição química de diferentes espécies de verão**

| Espécie                | MS                 | N    | P    | K    | Ca   | Mg   | Relação C/N |
|------------------------|--------------------|------|------|------|------|------|-------------|
|                        | t ha <sup>-1</sup> | %    |      |      |      |      |             |
| Crotalaria juncea      | 13,30              | 1,42 | 0,10 | 1,08 | 0,69 | 0,33 | 19          |
| Crotalaria retusa      | 5,00               | 2,27 | 0,17 | 1,94 | 1,38 | 0,53 | 15          |
| Crotalaria spectabilis | 10,00              | 2,07 | 0,14 | 2,36 | 1,02 | 0,32 | 18          |
| Crotalaria lanceolata  | 6,40               | 2,78 | 0,14 | 2,15 | 0,57 | 0,35 | -           |
| Crotalaria grantiana   | 7,70               | 1,96 | 0,11 | 1,52 | 0,73 | 0,18 | -           |
| Feijão de porco        | 7,10               | 2,49 | 0,20 | 1,90 | 1,48 | 0,39 | 11          |
| Gunadu anão            | 7,70               | 1,94 | 0,13 | 1,17 | 0,60 | 0,22 | 15          |

|               |      |      |      |      |      |      |    |
|---------------|------|------|------|------|------|------|----|
| Mucuna anã    | 3,50 | 2,72 | 0,19 | 1,97 | 1,51 | 0,34 | 15 |
| Mucuna rajada | 7,70 | 2,76 | 0,18 | 1,71 | 1,42 | 0,37 | 15 |
| Mucuna cinza  | 6,50 | 2,63 | 0,24 | 1,36 | 1,02 | 0,38 | 14 |
| Mucuna preta  | 6,00 | 3,10 | 0,23 | 1,62 | 1,09 | 0,30 | 12 |

Fonte: Calegari (1993).

### 5.3 Fertilizante Orgânico

Os fertilizantes orgânicos são aqueles constituídos de compostos orgânicos de origem natural, vegetal ou animal. Diferentes resíduos orgânicos podem ser utilizados para esse fim, entre eles, têm destaque o esterco animal, as sobras de alimentos, os resíduos da produção animal em grande escala, como granjas de suínos e de aves, os resíduos da indústria de alimentos, como abatedouros, frigoríficos etc.

A composição de alguns dos principais fertilizantes orgânicos utilizados na agricultura está apresentada nas Tabelas 8 e 9. O teor dos nutrientes nos fertilizantes orgânicos é considerado baixo. No entanto, alguns fertilizantes, como a cama de frango, podem apresentar 668 kg t<sup>-1</sup> de matéria seca (MS) em sua composição, podendo, a médio prazo, beneficiar alguns atributos químicos e físicos do solo, como o aumento da CTC, a agregação, a porosidade e a retenção de água do solo. Para que os fertilizantes orgânicos possam proporcionar tais benefícios, é necessário que, antes da sua aplicação, passem por um processo de estabilização dos compostos pelo processo de compostagem, que possibilita a transformação do material orgânico em húmus.

A compostagem é necessária para a diminuição da relação C/N do material, facilitando sua mineralização, que irá levar a disponibilização dos nutrientes contidos nos mesmos. Além disso, esse processo também reduz o risco da contaminação das áreas cultivadas por microrganismos fitopatogênicos, principalmente fungos, bactérias e vírus presentes nos fertilizantes orgânicos, que são mortos pelo aquecimento do composto durante o período da compostagem.

**Tabela 8 - Valores médios de alguns atributos e de nutrientes dos principais fertilizantes orgânicos**

| Fertilizante                           | Umidade | Densidade          | MS                 | RM  | N    | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO  | MgO  | S    |
|--|---------|--------------------|--------------------|-----|------|-------------------------------|------------------|------|------|------|
|  | %       | kg m <sup>-3</sup> | kg t <sup>-1</sup> |     |      |                               |                  |      |      |      |
| Cama de frango                         | 33      | 294                | 668                | 64  | 17,0 | 13,0                          | 8,4              | 14,0 | -    | -    |
| Esterco de poedeira                    | 68      | 885                | 323                | 62  | 7,0  | 11,0                          | 4,0              | 28,0 | -    | -    |
| Cama de peru                           | 45      | 474                | 561                | 134 | 18,0 | 21,9                          | 14,0             | 25,0 | -    | -    |
| Cama de frango (média)                 | -       | -                  | 728                |     | 27,4 | 30,1                          | 30,0             | 34,5 | 9,1  | 1,9  |
| Cama de frango (2-5 lotes)             | -       | -                  | 714                |     | 25,7 | 25,8                          | 27,2             | 33,8 | 9,4  | 4,4  |
| Cama de frango (6-9 lotes)             | -       | -                  | 801                |     | 32,1 | 36,4                          | 31,5             | 50,9 | 12,9 | 5,3  |
| Esterco sólido de bovino               | -       | -                  | 280                |     | 14,5 | 11,2                          | 13,2             | 19,7 | 10,1 | 3,0  |
| Esterco líquido de bovino <sup>1</sup> | -       | -                  | 69                 |     | 1,59 | 1,26                          | 3,36             | 2,11 | 1,21 | 0,53 |

<sup>1</sup>kg m<sup>-3</sup>. Para a transformação dos teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para P, divide-se por 2,29; de K<sub>2</sub>O para K, divide-se por 1,20; de CaO para Ca, divide-se por 1,40; de MgO para Mg, divide-se por 1,66. Para transformar kg t<sup>-1</sup> para %, divide-se por 10.

Fonte: Pauletti e Motta (2017).

**Tabela 9** - Valores médios de alguns atributos e de nutrientes de vinhaça e lodo de esgoto

| Fertilizante   | Sólidos totais     | pH   | Poder de Neutralização | N                  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO   | MgO  |
|----------------|--------------------|------|------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------|-------|------|
|                | kg t <sup>-1</sup> |      | %                      | kg m <sup>-3</sup> |                               |                  |       |      |
| Vinhaça        | 25                 | 4,15 | -                      | 0,35               | 0,06                          | 2,03             | 0,51  | 0,22 |
|                | kg t <sup>-1</sup> |      | %                      | kg t <sup>-1</sup> |                               |                  |       |      |
| Lodo de esgoto | 630                | 12,5 | 43                     | 13,8               | 16                            | 0,7              | 197,1 | 28,7 |

Para a transformação dos teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para P, divide-se por 2,29; de K<sub>2</sub>O para K, divide-se por 1,20; de CO para Ca divide-se por 1,40; de MgO para Mg, divide-se por 1,66. Para transformar kg t<sup>-1</sup> para %, divide-se por 10.

Fonte: Pauletti e Motta (2017).

A aplicação dos fertilizantes orgânicos deve ser realizada entre 30 e 40 dias anteriormente à implantação da cultura, espalhada superficialmente por toda a área cultivada e incorporada ou não ao solo, a depender do sistema de manejo. A quantidade a ser aplicada depende diretamente da fertilidade atual do solo, da disponibilidade local, do custo de transporte e da aplicação dos fertilizantes orgânicos, que podem impactar diretamente no custo de produção das hortaliças em geral.

## 5.4 Fertilizante Organomineral

A associação de fertilizantes minerais com orgânicos é classificada como fertilizantes organominerais. São produtos resultantes da mistura física ou combinação desses componentes, sendo comercializados em formulações em pó, farelada e granulada.

O teor final dos nutrientes presentes nos adubos organominerais dependerá de quais fontes serão utilizadas na sua produção, sendo no mercado encontradas diferentes formulações, visando atender as diferentes necessidades nutricionais das culturas. As principais características dos fertilizantes organominerais é ter mínimo de 8% de carbono orgânico total, umidade máxima de 25%, CTC mínima de 80 mmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, mínimo de 10% de macronutrientes primários (N, P e K), ou 5% de macronutrientes secundário ou 4% de micronutrientes (BRASIL, 2007).

A mistura de fontes minerais e orgânicas é realizada com o objetivo de obter o somatório do benefício que cada uma delas apresenta separadamente. Dessa maneira, as fontes minerais são importantes no aumento do teor dos nutrientes presentes na mistura e para balancear as formulações e as fontes orgânicas que atuarão principalmente como condicionadoras do solo, ajudando na sua melhoria química, física e biológica.

## 5.5 Fertilizante Mineral

Os fertilizantes minerais são aqueles constituídos de compostos inorgânicos. Exceções são a uréia e os fertilizantes quelatizados que, apesar de terem C em sua composição, são considerados fertilizantes minerais. O fornecimento dos nutrientes pode ser realizado a partir do uso de fertilizantes minerais simples, mistos e complexos.

Os ‘fertilizantes minerais simples’ são aqueles constituídos de um composto químico, contendo um ou mais nutrientes em sua composição (p.e., KCl). Os ‘fertilizantes minerais mistos’ são o produto resultante da mistura física de dois ou mais fertilizantes simples, complexos ou ambos (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> + NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> + KCl). Estão neste grupo o conjunto de formulações de adubos minerais que pode conter os nutrientes NPK, NP, NK e PK. Já os ‘fertilizantes minerais complexos’ são

o produto resultante da reação química de dois ou mais compostos químicos, contendo dois ou mais nutrientes. São obtidos pela reação entre matérias-primas (p.e.,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) que resulta em produção de fosfato monoamônio (MAP), fosfato diamônio (DAP), entre outros.

Quanto à natureza do nutriente contido, os fertilizantes minerais são classificados em nitrogenados (Tabela 10), fosfatados (Tabela 11), potássicos (Tabela 12), cálcicos (Tabela 13) magnesianos (Tabela 14), sulfurados (Tabela 15) e fertilizantes minerais com micronutrientes (Tabela 16).

**Tabela 10 - Fertilizantes minerais nitrogenados**

| Fertilizante  | Obtenção   | Característica  | Teor  |
|---|--|---|---|
| Amônia anidra ( $\text{NH}_3$ )   | Reação entre $\text{N}_2$ e o H de gases de petróleo                   | N- $\text{NH}_3$                                      | 82% de N                                    |
| Aquamônia ( $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ )                          | Reação de amônia anidra ( $\text{NH}_3$ ) com água                     | N- $\text{NH}_4^+$                                    | 16-21% de N                                 |
| Nitrato de sódio ( $\text{NaNO}_3$ )                                      | Reação de $\text{HNO}_3$ com NaOH                                      |   | 16% de N                                    |
| Nitrato de potássio ( $\text{KNO}_3$ )                                    | Reação de $\text{NaNO}_3$ com KCl                                      | N- $\text{NO}_3^-$                                    | 13% de N<br>44% de $\text{K}_2\text{O}$     |
| Sulfonitrato de amônio ( $(\text{NH}_4)_3\text{SO}_4 \cdot \text{NO}_3$ ) | Reação de $\text{NH}_4\text{NO}_3 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$        | 75% N- $\text{NH}_4^+$<br>e 25% N- $\text{NO}_3^-$    | 25-26% de N<br>13-15% de S                  |
| Nitrato de amônio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ )                            | Reação de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$                                   | 50% N- $\text{NH}_4^+$<br>e 50% N- $\text{NO}_3^-$    | 34% de N                                    |
| Cloreto de amônio   | Reação de HCl com amônia   | N- $\text{NH}_4^+$                                    | 25% de N<br>62-66% de Cl                    |
| Nitrato de cálcio ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ )                          | Reação do $\text{HNO}_3$ com CaO e $\text{CaCO}_3$                     | N- $\text{NO}_3^-$ com até<br>1,5% de $\text{NH}_4^+$ | 14% de N<br>18-19% de Ca                    |
| Sulfato de amônio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )                        | Reação de $\text{H}_2\text{SO}_4$ com aquamônia                        | N- $\text{NH}_4^+$                                    | 20% de N e<br>24% de S                      |
| Ureia ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ )                                      | $\text{NH}_3 + \text{CO}_2$ sob pressão                                | N-amídico   | 45% <sup>(1)</sup>                          |
| Cálcio-cianamida ( $\text{CaCN}_2$ )                                      | Fixação de $\text{N}_2$ em carbureto de Ca ( $\text{CaC}_2$ ) a 1000°C | $\text{CN}_2^{2-}$ e até 3% de<br>N- $\text{NO}_3^-$  | 21% de N e<br>27% de Ca                     |
| Nitrocálcio   | Reação de $\text{HNO}_3$ com calcário                                  | N- $\text{NO}_3^-$                                    | 22-27% de N,<br>4-15% de Ca e 0-4%<br>de Mg |

Fonte: Brasil (2007).

**Tabela 11 - Fertilizante mineral fosfatado.**

| Fertilizante  | Obtenção                 | Característica   | Teor   |
|---|--------------------------|--|--|
| Fosfato natural (apatitas)<br>$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6 \cdot [\text{F}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{CO}_2]$ | Beneficiamento de rochas | 4% sol. em ácido cítrico a 2% (ou 20 g L <sup>-1</sup> ) relação (1:100); < peneira 0,075 mm; rocha ígnea ou metamórfica | 24% de $\text{P}_2\text{O}_5$ total 23-27% de Ca |
| Fosfato natural reativo<br>$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6 \cdot [\text{F}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{CO}_2]$    | Beneficiamento de rochas | 10% sol. em ácido cítrico a 2% (ou 20 g L <sup>-1</sup> ) relação (1:100); farelado; rocha sedimentar                    | 27% de $\text{P}_2\text{O}_5$ total 30-34% de Ca |

#### 4 PRINCÍPIOS DE FERTILIDADE DO SOLO, ADUBAÇÃO E NUTRIÇÃO MINERAL

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
| Ácido fosfórico $H_3PO_4$  | Fosfato natural + $H_2SO_4$                      | Fluida   | 54% de $P_2O_5$                                |
| Superfosfato simples [ $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O + CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ] | Fosfato natural + $H_2SO_4$                      | $P_2O_5$ solúvel em CNA+ $H_2O$ =16% sol. em $H_2O$        | 18% de $P_2O_5$<br>18-20% de Ca<br>11-12% de S |
| Superfosfato triplo  | Fosfato natural+ $H_3PO_4$                       | $P_2O_5$ solúvel em CNA+ $H_2O$ =37% sol. em $H_2O$        | 44% de $P_2O_5$<br>14% de Ca                   |
| Fosfato monoamônico -MAP ( $NH_4H_2PO_4$ )                               | $H_3PO_4 + NH_4$                                 | $P_2O_5$ solúvel em CNA+ $H_2O$ =44% sol. em $H_2O$        | 9% de N<br>48% de $P_2O_5$                     |
| Fosfato diamônico -DAP [ $(NH_4)_2HPO_4$ ]                               | $H_3PO_4 + NH_4$                                 | $P_2O_5$ solúvel em CNA+ $H_2O$ =38% sol. em $H_2O$        | 16% de N<br>45% de $P_2O_5$                    |
| Fosfato monopotássico ( $KH_2PO_4$ )                                     | $H_3PO_4 + KOH$                                  | $P_2O_5$ e $K_2O$ solúveis em $H_2O$                       | 51% de $P_2O_5$<br>33% de $K_2O$               |
| Fosfato decantado  | Tratamento de efluentes do $H_3PO_4$             | $P_2O_5$ total=9% $P_2O_5$ solúvel em CNA+ $H_2O$          | 14% de $P_2O_5$                                |
| Termofosfato magnésiano  | Fusão de fosfato natural + compostos magnésianos | $P_2O_5$ total=14% sol. ácido cítrico a 2% (relação 1:100) | 17% de $P_2O_5$<br>7% de Mg<br>18-20% de Ca    |

Fonte: Brasil (2007).

**Tabela 12 - Fertilizantes minerais potássicos.**

| Fertilizante                      | Obtenção                                | Característica         | Teor                          |
|-----------------------------------|---|------------------------|-------------------------------|
| Cloreto de potássio (KCl)         | Jazidas, obtida por dissolução seletiva | $K_2O$ solúvel em água | 58% de $K_2O$ e 45-48 % de Cl |
| Sulfato de potássio ( $K_2SO_4$ ) | KCl + $H_2SO_4$                         | $K_2O$ solúvel em água | 48% de $K_2O$ e 15% de S      |
| Nitrato de potássio ( $KNO_3$ )   | KCl + $HNO_3$                           | $K_2O$ solúvel em água | 44% de $K_2O$ e 12% de N      |

Fonte: Brasil (2007).

**Tabela 13 - Fertilizantes minerais cálcicos.**

| Fertilizante                               | Obtenção                              | Característica                 | Teor                     |
|--|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ )           | Rocha calcária calcítica              | Ca total (Corretivo de acidez) | 36% de Ca                |
| Óxido de cálcio (CaO)                      | Calcinação de calcita                 | Ca total (Corretivo de acidez) | 64% de Ca                |
| Hidróxido de cálcio ( $CaOH_2$ )           | Hidrólise CaO                         | Ca total (Corretivo de acidez) | 48% de Ca                |
| Cloreto de cálcio ( $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ ) | HCl+CaO                               | Ca solúvel em $H_2O$           | 24% de Ca<br>43% de Cl   |
| Nitrato de cálcio [ $Ca(NO_3)_2$ ]         | $HNO_3 + CaO$                         | Ca solúvel em $H_2O$           | 14% de N<br>18-19% de Ca |
| Sulfato de cálcio [ $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ] | Subproduto da fabricação de $H_3PO_4$ | Ca e S totais                  | 18-19% de Ca 14-17% de S |

Fonte: Brasil (2007).

**Tabela 14 - Fertilizantes minerais magnesianos.**

| Fertilizante   | Obtenção                             | Característica                 | Teor                    |
|--|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Carbonato de magnésio (MgCO <sub>3</sub> )                 | Mineral magnesita                    | Mg total (corretivo da acidez) | 25-27% de Mg            |
| Óxido de magnésio (MgO)                                    | Calcinação de magnesita              | Mg total (Corretivo de acidez) | 45-54 % de Mg           |
| Sulfato de magnésio [MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O] | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + MgO | Mg solúvel em H <sub>2</sub> O | 9% de Mg<br>12-14% de S |
| Cloreto de magnésio [MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O] | HCl + MgO                            | Mg solúvel em H <sub>2</sub> O | 10% de Mg<br>34% de Cl  |

Fonte: Brasil (2007).

**Tabela 15 - Fertilizantes minerais que contêm enxofre.**

| Fertilizante                        | Obtenção  | Característica | Teor     |
|-------------------------------------|---|----------------|----------|
| Enxofre elementar (S <sup>o</sup> ) | Extração da pirita; subproduto de gás natural e do carvão mineral | S total        | 95% de S |

Fonte: Brasil (2007).

**Tabela 16 - Fertilizantes minerais que contêm micronutrientes e de cobalto.**

| Fonte             | Fórmula  | Concentração aproximada | Solubilidade em água |
|-------------------|--|-------------------------|----------------------|
|                   |  | %                       | g L <sup>-1</sup>    |
| <b>Boro</b>       |  |                         |                      |
| Bórax             | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O  | 11                      | 20                   |
| Borato 46         | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .5H <sub>2</sub> O   | 14                      | 226                  |
| Borato 65         | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>  | 20                      | 10                   |
| Solubor           | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .5H <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> B <sub>10</sub> O <sub>16</sub> .10H <sub>2</sub> O | 20                      |                      |
| Ácido bórico      | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>   | 17                      |                      |
| Ulexita           | NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> .8H <sub>2</sub> O   | 17                      | 63                   |
|                   |  |                         |                      |
| <b>Cobre</b>      |  |                         |                      |
| Sulfato de cobre  | CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O   | 25                      | 316                  |
| Óxido de cobre    | CuO  | 75                      | Insolúvel            |
|                   |  |                         |                      |
| <b>Ferro</b>      |  |                         |                      |
| Sulfato ferroso   | FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O   | 19                      | 156                  |
| Sulfato férrico   | Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ).9H <sub>2</sub> O   | 23                      | 4400                 |
|                   |  |                         |                      |
| <b>Manganês</b>   |  |                         |                      |
| Sulfato manganoso | MnSO <sub>4</sub> .3H <sub>2</sub> O   | 26-28                   | 742                  |
| Óxido manganoso   | MnO  | 41-68                   | Insolúvel            |

|                     |   |    |           |
|---------------------|---|----|-----------|
| Molibênio           |   |    |           |
| Molibdato de sódio  | $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                 | 39 | 562       |
| Molibdato de amônio | $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | 54 | 430       |
| Óxido de molibdênio | $\text{MoO}_3$  | 66 | 1         |
| Zinco               |   |    |           |
| Sulfato de zinco    | $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$                           | 23 | 965       |
| Óxido de zinco      | $\text{ZnO}$  | 78 | Insolúvel |
| Cobalto             |   |    |           |
| Cloreto de cobalto  | $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$                           | 25 | 760       |
| Nitrato de cobalto  | $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$                | 20 | 1338      |
| Sulfato de cobalto  | $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$                           | 22 | 600       |

Fonte: Abreu, Lopes e Gabrielli (2007).

## 6 Principais características dos fertilizantes

### 6.1 Solubilidade

Quanto à característica de solubilidade, tem-se como principais categorias os fertilizantes solúveis e insolúveis em água, e para os fertilizantes fosfatados, além dessas, tem-se a solubilidade em citrato neutro de amônio (CNA +  $\text{H}_2\text{O}$ ) e a solubilidade em ácido cítrico a 2%. A solubilidade em água exprime o quanto de um fertilizante está disponível às plantas. Os fertilizantes solúveis em água caracterizam-se pela disponibilidade imediata, quando adicionado ao solo, porém mais susceptíveis de perdas por lixiviação (nitrogenados e potássicos), por volatilização (nitrogenados) ou por insolubilização (caso dos fertilizantes fosfatados). Para diminuir perdas por volatilização e/ou lixiviação, há propostas de fertilizantes com liberação controlada, com eficácia obtida em algumas situações. Exemplo disso é o revestimento da ureia com inibidores da urease.

### 6.2 Índice Salino (IS)

Nos sistemas de produção de hortaliças, são utilizadas altas doses de fertilizantes, tornando relevantes as características do IS e o poder de acidificação e de alcalinização dos fertilizantes minerais. O IS refere-se sobre a capacidade do fertilizante de aumentar a pressão osmótica da solução do solo, tomando como referência o Nitrato de sódio ( $\text{NaNO}_3$ ), que tem IS de 100. Nitratos e cloretos têm IS altos, enquanto fosfatos têm IS mais baixos (Tabela 17). Assim, sistemas em que se faz uso de adubações em altas doses de nitratos e cloretos, há riscos de estresse denominado de seca fisiológica, caracterizado pela migração das raízes para a solução do solo, que ocorre quando a pressão osmótica da solução do solo torna-se superior à da solução celular das raízes, com graves conseqüências, tais como: não emergência ou morte das plântulas.

**Tabela 17 - Índice salinidade de fertilizantes minerais**

| Fertilizantes  | Índice Salino (IS) <sup>1</sup> |
|--|---------------------------------|
| Nitrato de amônio                                    | 105                             |
| Ureia  | 75                              |
| Sulfato de amônio                                    | 69                              |
| Nitrato de cálcio                                    | 52                              |
| Nitrato de sódio                                     | 100                             |
| Uran   | -                               |
| Fosfato monoamônico (MAP)                            | 30                              |
| Fosfato diamônico (DAP)                              | 34                              |
| Fosfato de ureia                                     | -                               |
| Ácido fosfórico (54% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | -                               |
| Cloreto de potássio                                  | 116                             |
| Sulfato de potássio                                  | 46                              |
| Nitrato de potássio                                  | 74                              |
| Sulfato de potássio e magnésio                       | 43                              |
| Salitre potássico                                    | 92                              |
| Fosfato monopotássico (MKP)                          | 8                               |

<sup>1</sup> Índice relativo ao nitrato de sódio (valor 100).

Fonte: Os autores.

### 6.3 Acidificação e alcalinização

Os fertilizantes podem apresentar residual de reação ácida ou alcalina (Tabela 17). Fertilizantes que possuem, em sua constituição, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>), (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, ou que têm como produto final NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, como é o caso da ureia ((NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO), apresentam como resultante uma reação ácida em decorrência da produção de íons H<sup>+</sup> nas reações de nitrificação (Reações 30 e 31). Por outro lado, alguns fertilizantes têm reação residual alcalina. Estão neste grupo o salitre do Chile (NaNO<sub>3</sub>), o nitrato de potássio (KNO<sub>3</sub>) e os termofosfatos.

A reação ácida ou alcalina do fertilizante é medida em equivalente CaCO<sub>3</sub>. Na tabela 17, tem se que o equivalente de CaCO<sub>3</sub> da ureia é 840 e do termofosfato magnésiano é -8, o que significa que a cada 1 tonelada de ureia são necessários 840 kg de CaCO<sub>3</sub> para corrigir a acidez residual por ela gerada. Do contrário, para cada 1 tonelada de termofosfato adicionado, é gerada uma ação corretiva equivalente a 8 kg de CaCO<sub>3</sub>.

**Tabela 18** - Poder acidificante e alcalinizante (B)<sup>1</sup> de alguns fertilizantes

| Fertilizante                          | Equivalente CaCO <sub>3</sub> |
|---------------------------------------|-------------------------------|
|                                       | kg t <sup>-1</sup>            |
| Amônia anidra                         | 1.480                         |
| Sulfato de amônio                     | 1.100                         |
| Fosfato monoamônico (MAP)             | 880                           |
| Fosfato diamônico (DAP)               | 600                           |
| Nitrato de amônio                     | 600                           |
| Nitrocálcio                           | 280                           |
| Sulfonitrato de amônio                | 840                           |
| Ureia                                 | 840                           |
| Salitre do Chile (NaNO <sub>3</sub> ) | - 290 (B)                     |
| Salitre potássico (KNO <sub>3</sub> ) | - 260 (B)                     |
| Sulfato de potássio                   | 0                             |
| Cloreto de potássio                   | 0                             |
| Sulfato de potássio e magnésio        | 0                             |
| Superfosfato simples                  | 0                             |
| Superfosfato triplo                   | 0                             |
| Termofosfato magnésiano               | - 8 (B)                       |
| Farelo de algodão                     | 90                            |
| Composto de lixo                      | - 70 (B)                      |
| Caule de planta de fumo               | -250 (B)                      |

<sup>1</sup> kg de CaCO<sub>3</sub> equivalente, em excesso. Adaptado de Tisdale, Nelson e Beaton (1985).

Fonte: Os autores.

## 6.4 Higroscopicidade

A higroscopicidade dos adubos é uma propriedade que reflete a tendência do produto em absorver água do ar atmosférico. É delimitada pela umidade relativa crítica (URc) que se refere à umidade relativa do ar máxima a que um produto é exposto sem que ele absorva umidade. A importância da URc está em dar informações úteis para orientar sobre o armazenamento: tempo, embalagem, local (ambiente aberto ou fechado). Na Figura 8, exibem-se valores de URc de alguns fertilizantes e de suas misturas binárias. O nitrato de cálcio tem URc de 46,7% e o KCl de 84,0% de umidade relativa do ar. Observa-se que, quando se misturam dois fertilizantes, a URc diminui. Na mistura de nitrato de cálcio e KCl, a URc cai para 22,0%, o que torna essa mistura incompatível.

|      |                           |                          |                   |                           |                           |                           |                             |                             |                             |                             |                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------|---------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|      | Nitrato de Cálcio<br>46,7 |                          |                   |                           |                           |                           |                             |                             |                             |                             |                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 23,6 | Nitrato de Amônio<br>59,4 |                          |                   |                           |                           |                           |                             |                             |                             |                             |                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 37,7 | 46,3                      | Nitrato de Sódio<br>75,3 |                   |                           |                           |                           |                             |                             |                             |                             |                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| -    | 18,1                      | 46,6                     | Ureia<br>75,2     |                           |                           |                           |                             |                             |                             |                             |                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| -    | 61,4                      | 61,9                     | 67,9              | Cloreto de Amônio<br>71,2 |                           |                           |                             |                             |                             |                             |                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| -    | 62,3                      | -                        | 68,4              | 71,3                      | Sulfato de Amônio<br>79,2 |                           |                             |                             |                             |                             |                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| -    | 69 <sup>(1)</sup>         | -                        | 62 <sup>(1)</sup> | -                         | 72 <sup>(1)</sup>         | Fosfato Diamônico<br>82,9 |                             |                             |                             |                             |                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 22,0 | 67,9                      | 66,9                     | 60,3              | 73,6                      | 71,3                      | 70 <sup>(1)</sup>         | Cloreto de Potássio<br>84,0 |                             |                             |                             |                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 31,4 | 69,9                      | 64,6                     | 66,2              | 67,9                      | 69,2                      | -                         | 78,6                        | Nitrato de Potássio<br>90,5 |                             |                             |                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 62,8 | 62,0                      | 63,8                     | 66,2              | -                         | 76,7                      | 78 <sup>(1)</sup>         | 72,8                        | 87,8                        | Fosfato Monocálcico<br>91,6 |                             |                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 46,2 | 62,8                      | 68,1                     | 66,1              | 73,9                      | 67,7                      | 79 <sup>(1)</sup>         | -                           | 87,8                        | 88,8                        | Fosfato Monocálcico<br>93,7 |                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 76,1 | 69,2                      | 73,3                     | 71,6              | 71,3                      | 81,4                      | 77 <sup>(1)</sup>         | -                           | 87,8                        | 79,0                        | -                           | Sulfato de Potássio<br>96,3 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Figura 8 - Umidade relativa crítica de sais fertilizantes e misturas a 30°C. Os valores são em percentagem de umidade relativa.

Fonte: Hoffmeister (1973).

## 7 Estratégias de Adubação

Para suprir a exigência nutricional das culturas, os nutrientes podem ser fornecidos via solo, por meio de adubações em área total (lanço, incorporada ou não) e localizadas (sulcos ou covas), via fertirrigação ou via foliar.

### 7.1 Adubação em área total (Lanço)

A adubação a lanço é uma prática muito utilizada quando se deseja distribuir e/ou corrigir uniformemente o teor dos nutrientes no solo. Ela pode ser incorporada ou não, dependente do tipo e do grau de solubilidade dos fertilizantes, das facilidades de volatilização, da mobilidade do elemento, do sistema de manejo adotado.

#### 7.1.1 Incorporação

Fertilizante com elemento de muito baixa mobilidade no solo, como o P, precisa ser incorporado. Quando se tem fontes insolúveis em água, como no caso dos fosfatos naturais reativos, há tendência de melhorar a eficiência com a incorporação do adubo, de modo a aumentar o contato das partículas com o solo e ter maior ação solubilizadora. Contudo essa estratégia é viável em um contexto de altas doses, de solos com moderada acidez, que possibilita maior solubilização do fosfato e plantas com certo grau de adaptação à acidez do solo. Em solos com pH superior a 6,0 ou alcalinos, a eficiência dos fosfatos naturais é baixa, ainda que a lanço e incorporado.

No caso de fosfatos solúveis, a incorporação diminui a eficiência por causa do favorecimento da fixação, o que resulta em necessidade de maior dose. A aplicação superficial de fontes fosfatadas solúveis é pouco recomendável, haja vista a muito baixa mobilidade do nutriente fósforo, como já discutido anteriormente.

### 7.1.2 Não incorporação (lanço superficial)

A aplicação superficial, a lanço, sem incorporação é viável para os fertilizantes solúveis, fontes de nutrientes móveis no solo, tais como N e K, em situações de pré-plantio ou adubação parcelada em cobertura.

Os fertilizantes utilizados para essa prática devem ser cuidadosamente escolhidos, necessitando sempre levar em consideração o tempo de resposta desejado e os riscos de perdas de alguns nutrientes por volatilização, por lixiviação, escoamento superficial e/ou por adsorção pelos colóides do solo. Desta maneira, em solos com alta capacidade de drenagem, principalmente os de textura arenosa, baixa CTC e MOS, bem como em áreas com relevo suave a ondulado, com possibilidade de escoamento superficial, não é recomendada a aplicação de fontes altamente solúveis de elementos móveis, em condições de pré-plantio (p.e., SA e KCl).

É preciso destacar que há especificidades de alguns fertilizantes, como a ureia. A aplicação de uréia em superfície sem incorporação pode resultar em perdas por volatilização consideráveis de  $\text{NH}_3$  (Reações 28 e 29), especialmente se o ambiente estiver alcalino, palhana superfície e umidade do solo alta. Essas perdas são diminuídas quando ocorre a incorporação da ureia, que pode ser feita por meio da irrigação, por exemplo.

Em trabalho realizado por Viero et al. (2012) estudando a época de irrigação em relação à adubação com ureia, os autores observaram que as perdas de  $\text{NH}_3$  foram mínimas quando se irrigou imediatamente após a aplicação da ureia e que as perdas de  $\text{NH}_3$  foram máximas quando a ureia foi aplicada sobre solo úmido. O processo de incorporação de ureia por meio de irrigação é uma alternativa viável em sistema de produção de hortaliças.

## 7.2 Adubação Localizada (Sulco ou Covas)

A adubação localizada é uma prática utilizada quando se quer concentrar os nutrientes junto ao local onde a planta irá se desenvolver. Normalmente, está associada a manejo com vistas à economia de adubação (principal vantagem) em culturas com espaçamento largo, ou nas situações que se quer diminuir a influência do solo na eficiência da adubação. Quase sempre, adubações a lanço demandam doses maiores, especialmente dos elementos que apresentam forte interação com o solo, como o P. Comparada à adubação em área total, a adubação em sulco apresenta algumas desvantagens, como a concentração dos nutrientes em uma pequena faixa de solo, fazendo que haja menor área de exploração do solo pelas raízes, que, em casos de veranicos, podem levar a redução no seu crescimento e no desenvolvimento, afetando sua produtividade final. Exemplo disso é o uso de alguns adubos como o KCl que apresentam elevado IS e, quando aplicados em altas doses no sulco prejudicam o desenvolvimento radicular. Por outro lado, a adubação localizada de P tem-se mostrado vantajosa, pois proporciona redução da adsorção de P pelos colóides do solo, aumentando a eficiência da adubação fosfatada.

## 7.3 Adubação Líquida (Fertirrigação e Foliar)

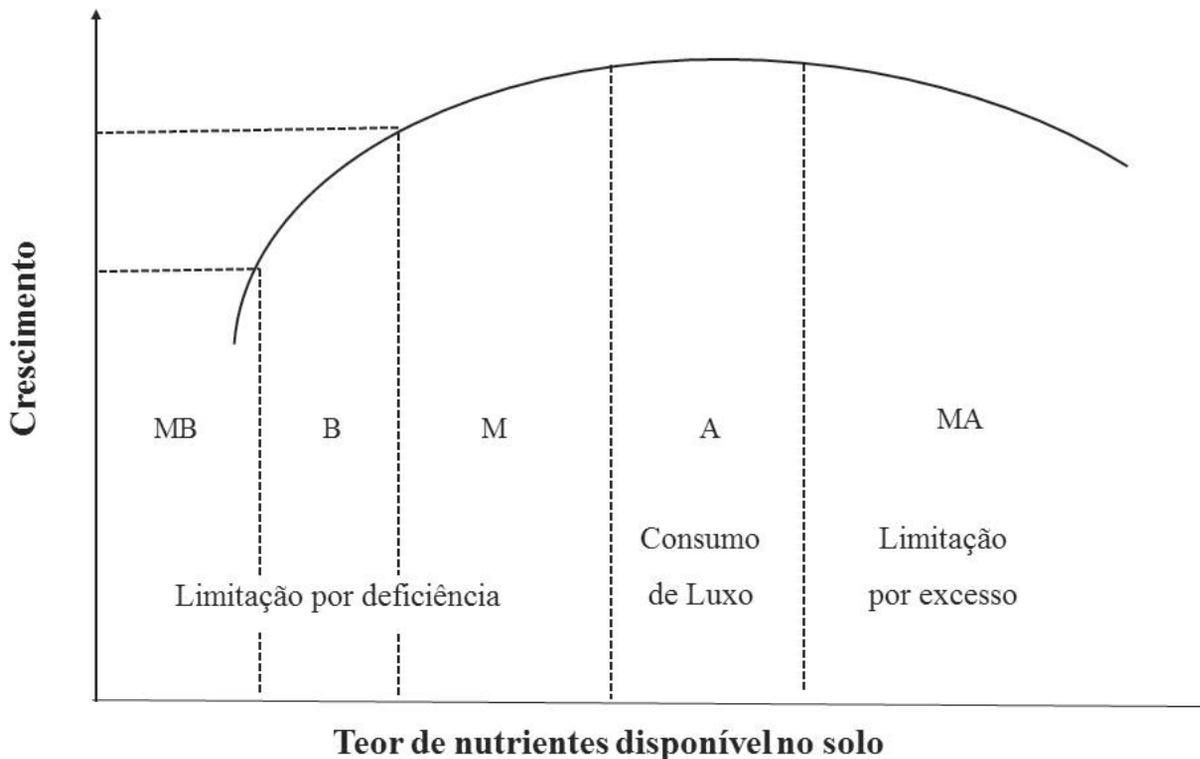
O fornecimento de nutrientes via soluções líquidas, contendo os diferentes nutrientes, é uma prática comum em grande parte das culturas, principalmente aquelas conduzidas em ambiente protegido (estufas). Na fertirrigação, o sistema de irrigação mais frequentemente usado para o fornecimento dos nutrientes é sistema de gotejamento. Para que não ocorram problemas com o fornecimento das soluções nutritivas ao longo das linhas de distribuição de gotas, o maior cuidado a se tomar é a utilização de matérias-primas de boa qualidade, com alta pureza, garantia das concentrações dos nutrientes e elevada solubilidade.

As quantidades dos nutrientes a serem aplicadas devem obedecer às exigências nutricionais e hídricas da cultura, sendo preparadas as soluções que garantam o fornecimento dos nutrientes nas quantidades necessárias para atender a demanda determinada pelo estágio fenológico em que a cultura se encontra.

A adubação foliar tal qual a fertirrigação é uma ferramenta de manejo nutricional das culturas que deve ser utilizada com objetivo de complementar a necessidade nutricional da planta quando o solo não é capaz de suprir essa necessidade ou a planta apresenta alta demanda em algum estágio fenológico de seu desenvolvimento. No entanto a aplicação foliar nunca deve ser utilizada como uma ferramenta de substituição do manejo nutricional via solo.

### 7.4 A decisão de adubar

A resposta em crescimento da planta ao aumento de teores de nutriente no solo pode ser representada pela Figura 9.



**Figura 9** - Curva de crescimento hipotética de uma planta em função de teores crescentes de nutrientes no solo.

Fonte: Os autores.

Em uma situação hipotética de teor nulo de um nutriente no solo, não haveria crescimento da planta. Com a presença do nutriente no solo, há uma resposta positiva com acréscimos decrescentes até atingir o máximo crescimento, com o teor no solo que possibilita essa condição sendo definido como nível crítico, que pode corresponder a uma faixa, antes que um ponto específico. Essa faixa corresponde ao teor alto. Nel observa-se que há aumento do teor do nutriente no solo sem variação significativa, ou estabilidade, de crescimento. Contudo, se continuar aumentando o fornecimento de nutriente no solo (teor muito alto), ou de outro fator de produção, a planta pode passar por uma

situação de estresse e ter redução no crescimento. Isso ocorre por excesso do nutriente, gerando desequilíbrios que quase sempre induzem a deficiência de outro.

A observância de teores na classe ‘muito alto’ constitui-se em um alerta para a hipótese de limitação de produção, que poderá estar ocorrendo ou não, cabendo a aceitação dessa possibilidade a observações *in loco*, considerando-se, sempre, aspectos do rendimento efetivo que está sendo obtido e de histórico de manejo da área. Não esquecer os outros fatores físicos e/ou biológicos que podem ser determinantes para o sucesso do manejo químico do solo.

No processo de decisão sobre adubar, os dois primeiros aspectos cruciais para a decisão são a planta a ser cultivada e as condições de fertilidade do solo. Uma vez decidida a cultura, o próximo passo é avaliar se as condições de solo são favoráveis ou desfavoráveis. No caso de ser desfavorável, verificar se a limitação está ligada a condições de deficiência (teor médio, baixo ou muito baixo) ou de excesso (teor muito alto) de um fator de produção químico.

Por exemplo: excesso de Mg pode induzir a deficiência de K e vice-versa. Elevar o pH do solo de 5,5 para 6,5 é um fator positivo para aumento de produção, uma vez que garante o equilíbrio ótimo na disponibilidade de macro e micronutrientes. No entanto, adição de mais calcário aumenta a disponibilidade de Ca e de Mg, mas pode levar o pH do solo para a faixa alcalina e diminuir a disponibilidade de micronutrientes catiônicos, constituindo-se em fator de queda de produção.

Pode-se ter crescimento limitado por deficiência ou por excesso de um ou mais nutrientes. Em caso de limitação por deficiência (teor muito baixo, baixo, médio), faz-se o fornecimento do nutriente. Quando há limitação por excesso, suspende-se o fornecimento do mesmo. Se o excesso de um nutriente implica a deficiência de outro, proceder ao fornecimento do elemento que está sendo limitado. Se um elemento (Zn, por exemplo) tem sua disponibilidade limitada por excesso de pH, a adição via solo pode não ser a solução mais adequada, porque, ao adicionar o nutriente no solo, ele encontra condições desfavoráveis à sua disponibilidade. Ou seja, há que se observarem as interações solo-nutriente-planta e escolher as fontes e as estratégias mais úteis, no contexto do sistema de manejo adotado.

Teores de nutriente na faixa alta requerem estratégias de manejo de manutenção da capacidade produtiva, com adição de nutrientes ao solo visando à reposição do que foi extraído e exportado pelas plantas, do que foi perdido por lixiviação ou indisponibilizado por meio da interação nutriente-solo. Uma vez decidido sobre o que precisa ser feito para correção de condições desfavoráveis e/ou manutenção da capacidade produtiva do solo, vem a decisão das estratégias de adubação a utilizar, atreladas a fontes, características do solo, planta, relação solo-planta, questões ambientais e aspectos econômicos, no contexto do economicamente viável, ambientalmente sustentável e socialmente justo.

## 8 Referências

ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; GABRIELLI, G. C. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 645-736.

BORKERT, C. M.; PAVAN, M. A.; BATAGLIA, O. C. Disponibilidade e avaliação de elementos catiônicos: ferro e manganês. In: FERREIRA, M. E. et al. **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/Fapesp/Potafos, 2001. p. 151-185.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa nº 5, de 2007. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 01 mar. 2007.

- CALEGARI, A. Manejo de adubação verde. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROTAÇÃO DE CULTURAS, 2., 1992, Campo Mourão. **Anais...** Campo Mourão: Associação dos Engenheiros Agrônomos de Campo Mourão, 1993. p.104-116.
- DECHEN, A. R.; HAAG, H. P.; CARMELLO, Q. A. C. Diagnose visual. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (Org.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Potafos, 1991. p. 273-308.
- HAVLIN, J. L. et al. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005.
- HOFFMEISTER G. Quality control in a bulk-blending plant. In: TVA FERTILIZER BULK-BLENDING CONFERENCE, 1973, Alabama. **Proceedings...** Alabama: Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, 1973. p. 59-70.
- MALAVOLTA, E.; BOARETO, A. E.; PAULINO, V. T. Micronutrientes: uma visão geral. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. da (Org.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Potafos, 1991. p. 1-33.
- MESQUITA FILHO, M. V.; SOUZA, A. F.; FURLANI, P. R. Hortaliças de bulbo, tubérculo, raiz e fruto. In: FERREIRA, M. E. et al. (Org.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal, 2001. p. 511-525.
- PARFITT, R. L. Chemical properties of variable charge soils In: THENG, B. K. G. (Ed.). **Soil with variable charges**. New Zealand: New Zealand Soil Science Society, 1980. p. 167-194.
- PAULETTI, V.; MOTTA A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Estadual Paraná, 2017.
- RAIJ, B. Van; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983.
- TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. 4th ed. New York: Macmillan Publishing Co., 1985.
- VAN LIER, Q. J. **Física do solo**. Viçosa: SBCS, 2010.
- VIERO, F. et al. Redução de perdas de nitrogênio por volatilização pelo uso de inibidor de urease e manejo da irrigação em milho. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 139, p. 18-20, 2012.
- VOLKWEISS, S. J. Fontes e métodos de aplicação. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. da (Ed.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Potafos, 1991. p. 391-412, 734.
- WILDNER, L. P. Utilização de espécies de verão para adubação verde, cobertura e recuperação do solo em Santa Catarina. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROTAÇÃO DE CULTURAS, 2., 1992, Campo Mourão. **Anais...** Campo Mourão, 1993. p. 144-160.