

UNIDADE IV - NUTRIÇÃO MINERAL

- 1. Histórico da nutrição vegetal**
- 2. Fontes de nutriente para as plantas: O solo e fertilizantes; Nutrição foliar**
- 3. Raiz e absorção de nutrientes: Sistema radicular, micorrizas, conceitos de simplasto, apoplasto e espaço livre; caminho percorrido pelos íons**
- 4. Estudo da nutrição mineral: Metodologia, conceito de elemento essencial, funções dos elementos essenciais e desordens nutricionais.**

HISTÓRICO DA NUTRIÇÃO VEGETAL

- Sabe-se há vários séculos que as raízes das plantas superiores retiram do solo os "alimentos" necessários para seu crescimento.**
- A aplicação de substâncias ao solo, com o objetivo de melhorar o crescimento das plantas, é tão antiga quanto a própria agricultura.**

- Já na Grécia antiga, os agricultores adicionavam ao solo esterco, restos de tecidos vegetais, cinzas, pó de osso e outros materiais orgânicos com o objetivo de melhorar a produtividade agrícola.
- De acordo com a ciência grega o solo era o meio em que o "suco nutritivo" era preparado. E este "suco" seria constituído de "alimentos pré-digeridos" que após de serem absorvidos pelas raízes, seriam incorporados nas suas substâncias.
- No final do século XV, o teólogo alemão de CUSA propôs uma teoria que afirmava ser a água a fonte de alimento para o crescimento das plantas. De acordo com ele a água era transmutada em material vegetal.
- Somente no século XVII esta teoria foi testada experimentalmente pelo alquimista belga van Helmont. Concluindo que, realmente a água era transmutada em material vegetal, sendo a fonte de alimento para as plantas.

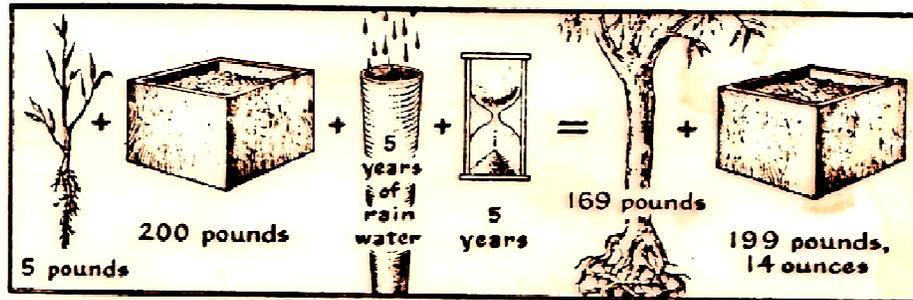


Figure 3-1. Van Helmont's experiment on the growth of a willow tree in soil supplied with water. (1648) (Salgueiro)

1 libra (pound) = 453 g = 16 onças (1 ounce = 28,31 g)

- Somente na 1ª metade do século XIX foi que os fisiologistas vegetais começaram a entender melhor a **nutrição vegetal**: o crescimento das plantas depende, não só da água, mas também de luz, CO₂, O₂ e de certos elementos minerais, **hoje denominados de elementos essenciais**.
- Estes elementos essenciais são absorvidos pelas raízes sob a forma de íons inorgânicos, denominados de **nutrientes minerais**.
- O estudo do modo como as plantas obtêm e utilizam os nutrientes minerais denomina-se **nutrição mineral**.

FONTES DE NUTRIENTES PARA AS PLANTAS

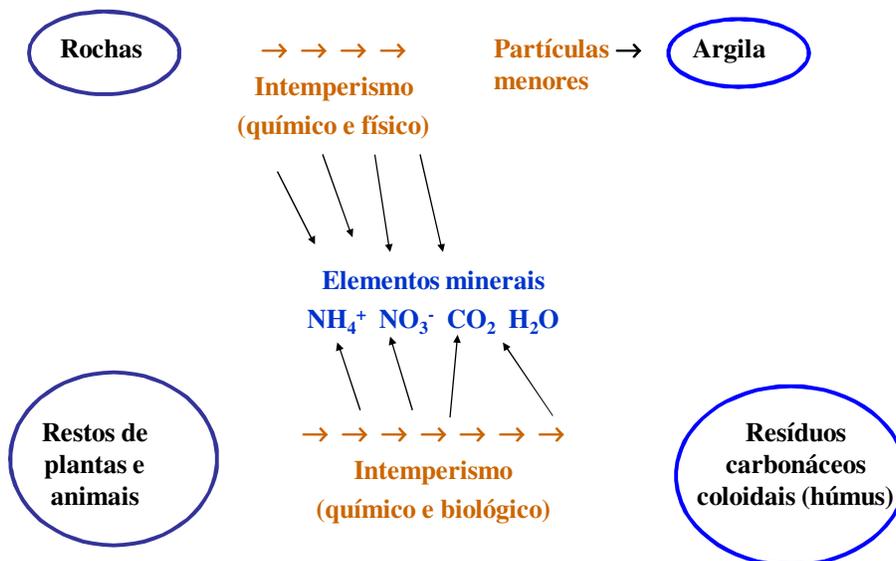
Atmosfera	<p>CO_2 → Fotossíntese;</p> <p>O_2 → Respiração;</p> <p style="padding-left: 20px;">→ Incorporação em compostos orgânicos;</p> <p>N_2 → Fixação simbiótica;</p> <p>NH_3 → Assimilados por algumas plantas</p> <p>SO_2 →</p>			
H₂O	<p>➤ Turgescência celular;</p> <p>➤ Solvente;</p> <p>➤ Reagente nas reações metabólicas.</p>			
Solo	<table border="0" style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;"> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Rochas ❖ Tecidos de plantas e animais </td> <td style="font-size: 3em; padding: 0 10px;">}</td> <td> <p>Nutrientes e as Frações coloidais (orgânica e mineral)</p> </td> </tr> </table>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Rochas ❖ Tecidos de plantas e animais 	}	<p>Nutrientes e as Frações coloidais (orgânica e mineral)</p>
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Rochas ❖ Tecidos de plantas e animais 	}	<p>Nutrientes e as Frações coloidais (orgânica e mineral)</p>		

CONSTITUIÇÃO DO SOLO

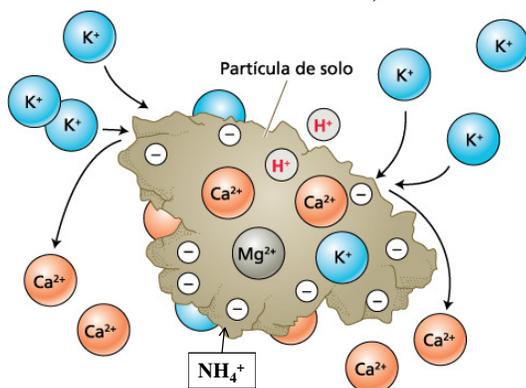
O solo é um substrato físico, químico e biológico complexo

MATRIZ	<p>➤ Matéria mineral → material inorgânico que vai de fragmentos de rochas a partículas diminutas (argila);</p> <p>➤ Matéria orgânica → produto da decomposição de animais e de plantas (húmus);</p>
POROS	<p>➤ Água → meio no qual se encontram dissolvidas várias substâncias orgânicas e inorgânicas;</p> <p>➤ Gases → O_2, CO_2, N_2, etc.;</p> <p>➤ Organismos vivos → raízes de plantas, bactérias, fungos, protozoários, vermes, insetos, etc.</p>

Durante a formação do solo, têm-se:



Estas frações coloidais (carregadas negativamente) são importantes para as propriedades físicas e químicas do solo, melhorando a drenagem e aumentando a retenção de água e de bases trocáveis. Aumentando, desta forma, a fertilidade do solo.



A fertilidade do solo é função de uma alta CTC associada a uma elevada percentagem de saturação das bases Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e NH_4^+ .

FIGURA 5.6 O princípio da troca catiônica sobre a superfície de uma partícula de solo. Cátions são adsorvidos sobre a superfície de uma partícula de solo porque esta superfície é carregada negativamente. A adição de um cátion, como o potássio (K^+), ao solo pode deslocar outro cátion, como o cálcio (Ca^{2+}), da superfície da partícula de solo e torná-lo disponível para a absorção pelas raízes.

Comparação das propriedades dos três principais tipos de argilo-silicatos encontrados no solo.

Propriedades	Tipo de argila		
	Montmorilonita	Ilita	Caulinita
Tamanho (μm)	0,01 – 1,0	0,1 – 2,0	0,1 – 5,0
Forma	Flocos irregulares	Flocos irregulares	Cristais hexagonais
Coessão	Alta	Média	Baixa
Capacidade de embebição	Alta	Média	Baixa
Capacidade de troca de cátions ($\text{meq } 100 \text{ g}^{-1}$)	80 - 100	15 - 40	3 - 15

Estrutura tetraédrica de silício: Si;

Estrutura octaédrica de alumínio: Al;

Caulinita: lâmina com arranjo 1:1 (Si:Al);

Montmorilonita e ilita: lâmina com arranjo 2:1 (Si:Al:Si).

Pode ocorrer substituição isomórfica:

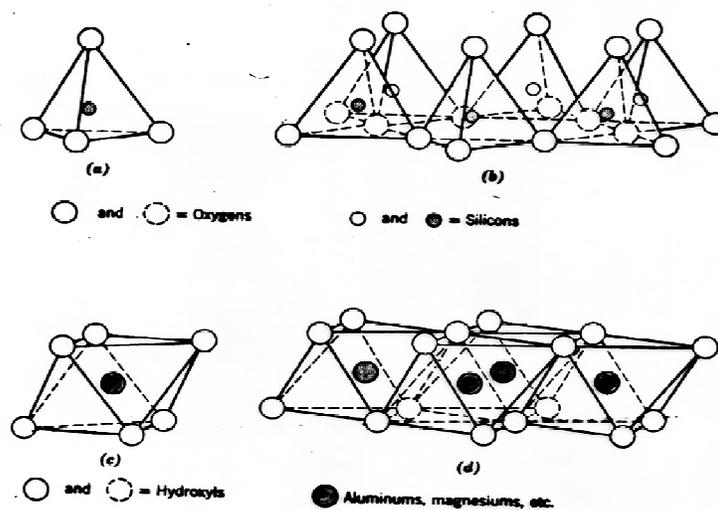


Figure 4.1. Diagrammatic sketch of basic structural units in clays. (a) Single silica tetrahedron. (b) Sheet structure of silica tetrahedrons arranged in a hexagonal network. (c) Single octahedral unit. (d) Sheet structure of octahedral units. (After Grim, 1953)

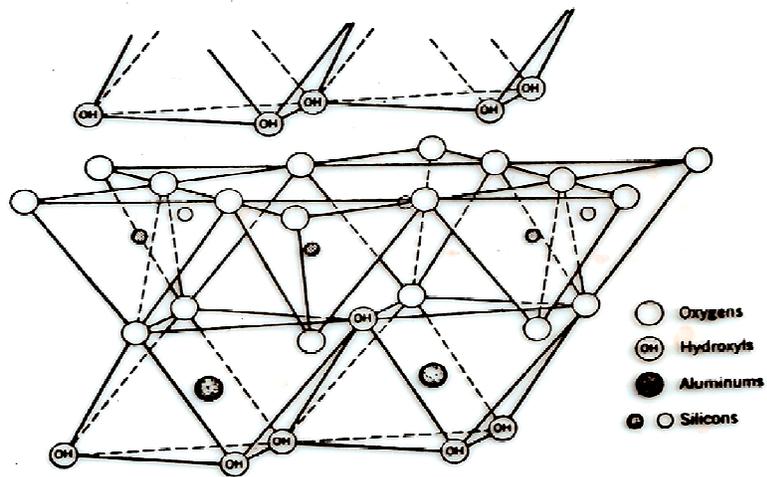


Figure 4.2. Structure of kaolinite. The linked silica tetrahedra in this structure are inverted from their orientation in Fig. 4.1. (After Grim, 1953)

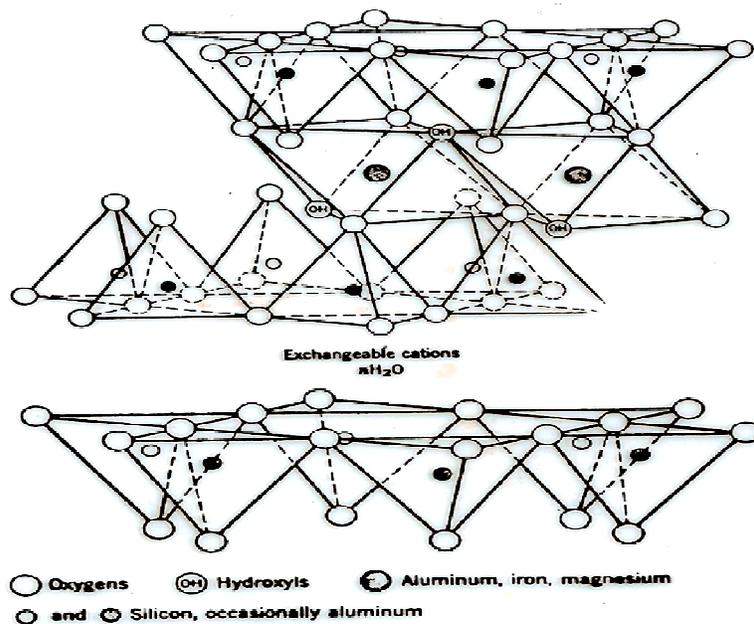
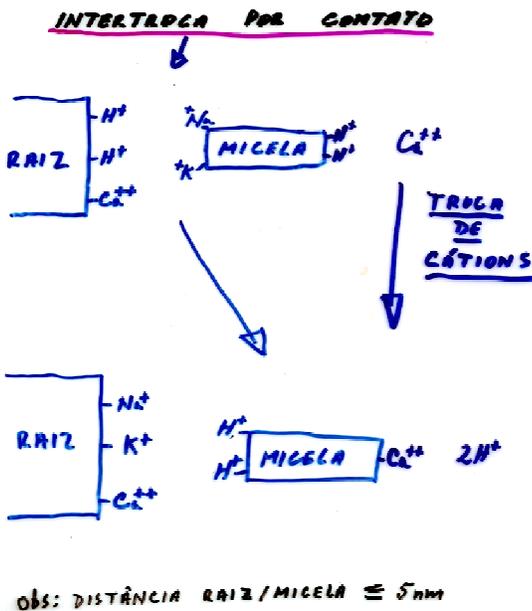


Figure 4.5. Structure of montmorillonite. (After Grim, 1953)



A troca de cátions é importante para que se possa entender como ocorre a elevação do pH de um solo quando este é tratado com calcário (CaCO_3 , principalmente, e um pouco de MgCO_3).

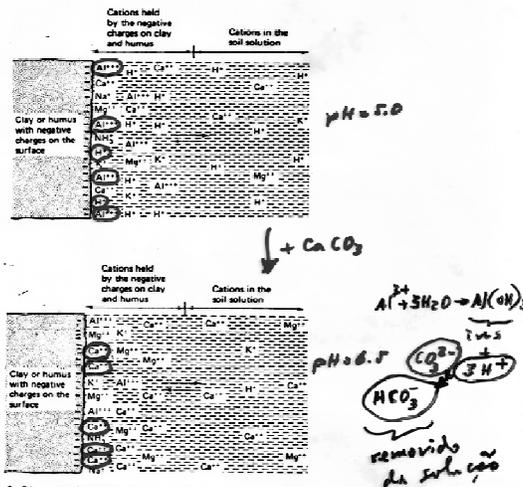
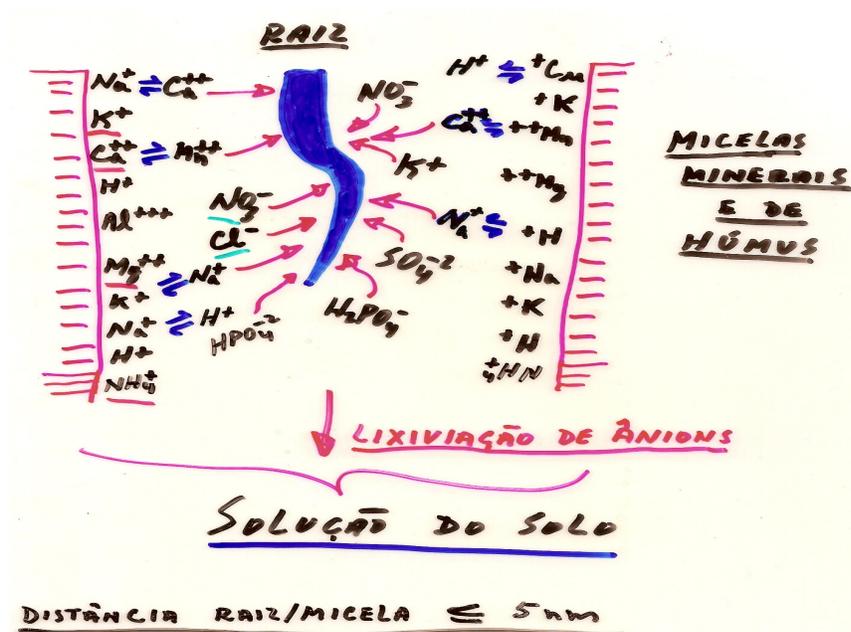


Figure 6. Diagrammatic representation of the role of cation exchange in the conversion of an acid soil to a near-neutral soil. Initially the soil pH was 5.0 (upper diagram). The soil pH was raised to 6.5 (lower diagram) by the addition of finely ground limestone (which consists largely of carbonates of calcium, and to a lesser extent, magnesium). Note that the acid soil (upper diagram) has a larger number of adsorbed aluminum ions than adsorbed hydrogen ions. The preponderance of adsorbed aluminum ions arises from the fact that insoluble aluminum hydroxide in clay micelles reacts with hydrogen ions, as follows: $\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$. Aluminum ions released by this reaction are strongly adsorbed to soil colloidal micelles and displace other cations. When an acid soil is limed with calcium carbonate (lower diagram), calcium ions displace many of the adsorbed aluminum ions and hydroxyl ions. Desorbed aluminum ions are converted to insoluble aluminum hydroxide (by reversal of the above reaction). Desorbed hydrogen ions (as well as hydrogen ions produced by reversal of the above reaction) react with carbonate ions (from calcium carbonate). Since the resulting bicarbonate ions (not shown in the above diagram) are weakly dissociated, hydrogen ions are effectively removed. Thus the pH of the soil increases. After Worthen and Alrich, 1966 (Figs. 110 and 111).



Disponibilidade de ânions no solo

- Ânions como NO_3^- e Cl^- são repelidos pelas cargas negativas das partículas coloidais do solo e permanecem dissolvidos na solução diluída do solo, ficando sujeitos à lixiviação;
- Os fosfatos (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}) podem permanecer no solo, contendo Al^{3+} e Fe^{3+} , em uma forma “fixada” como sais insolúveis (AlPO_4 e FePO_4);
- O sulfato (SO_4^{2-}), na presença de Ca^{2+} forma o gesso (CaSO_4), o que limita a mobilidade deste ânion.

USO DE FERTILIZANTES QUÍMICOS

❖ ANTES DO SÉCULO XIX

- A produção agrícola era aumentada pela aplicação de compostos orgânicos: esterco, pó de osso, sangue, etc.
- Usava-se também a rotação cultural com leguminosas, mas não se sabia a razão do aumento na produção agrícola.

❖ NA 1ª METADE DO SÉCULO XIX

- Liebig na Alemanha, Boussingault na França e Lawes & Gilbert na Inglaterra: Encontraram que a produtividade agrícola poderia ser aumentada se fossem adicionados sais ao solo.

❖ NO SÉCULO XX

- Passou-se a aplicar quase que obrigatoriamente N-P-K em toda exploração agrícola.

❖ NOS ÚLTIMOS 50 ANOS

- Passou-se a utilizar a aplicação de micronutrientes.

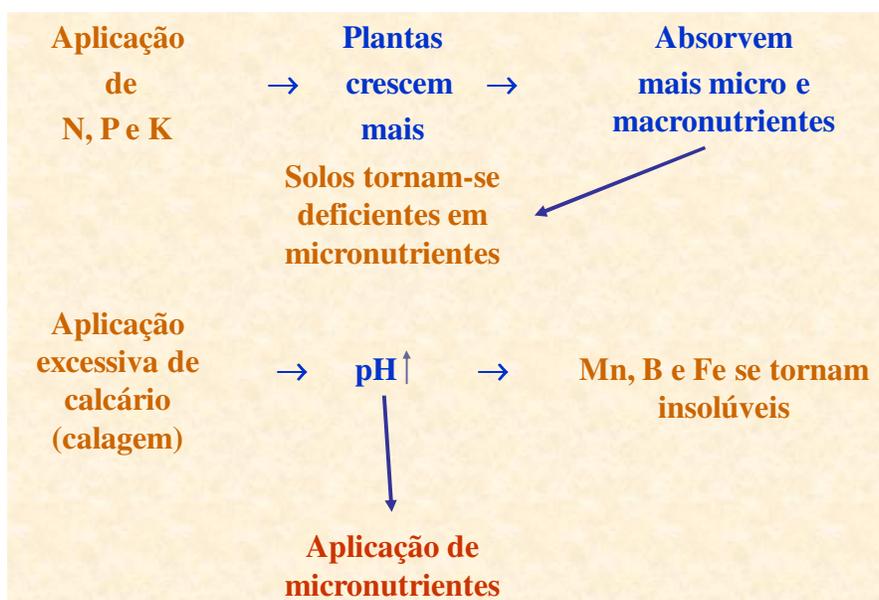
A maioria dos fertilizantes químicos possuem sais de N, P e K.

- **Fertilizantes simples** são aqueles que possuem apenas um desses três nutrientes. P. ex.: Superfosfato [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$], nitrato de amônio (NH_4NO_3) e cloridrato (muriato) de potássio (KCl).

- **Fertilizantes compostos ou mistos** são aqueles que contém dois ou mais fertilizantes.

P. ex.: 10:14:10 (em % de N, P como P_2O_5 e K como K_2O , respectivamente).

Causas da falta de micronutrientes



Outro ponto importante que se deve considerar, a fim de se ter ideia da fertilidade do solo é a influência do pH na disponibilidade de nutrientes minerais.

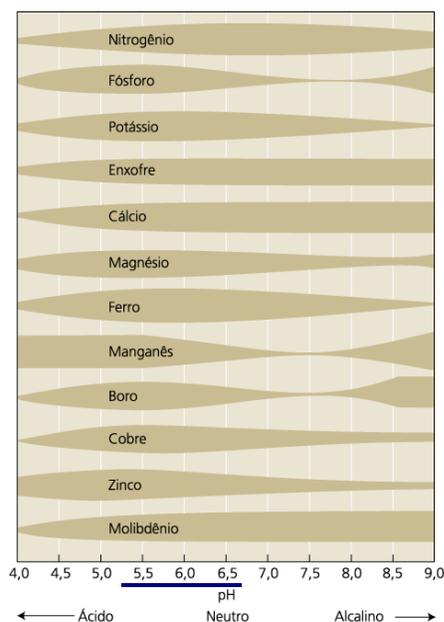


FIGURA 5.5 Influência do pH do solo na disponibilidade de nutrientes em solos orgânicos. A espessura das áreas sombreadas indica o grau de disponibilidade do nutriente para as raízes das plantas. Todos esses nutrientes estão disponíveis na faixa de pH de 5,5 a 6,5 (Lucas e Davis, 1961).

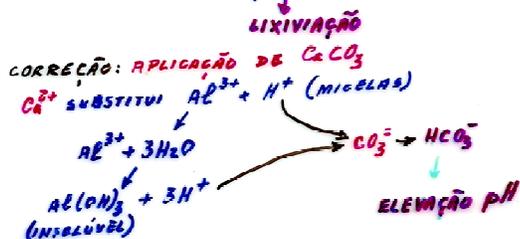
- Os solos ácidos ocorrem em regiões que têm alto teor de chuva e são, de modo geral, ricos em matéria orgânica. Os fungos predominam nestes solos ácidos.
- A decomposição da matéria orgânica produz:
 - $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ ↓pH
 - $\text{NH}_3 \rightarrow \text{oxidado a HNO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{NO}_3^-$ ↓pH
 - $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{oxidado a H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$ ↓pH

SOLOS ÁCIDOS (pH < 6.5)



CONSEQUÊNCIAS: - TOXICIDADE DE Al, Fe e Mn
 - DEFICIÊNCIA DE P

$[Al^{3+}]$ ALTA → FORMA-SE $AlPO_4$ (INSOLÚVEL)
 - DEFICIÊNCIA DE Ca^{2+} e Mg^{2+}
 Ca^{2+} e Mg^{2+} SUBSTITUÍDOS POR Al^{3+} e H^+ (MICELAS)



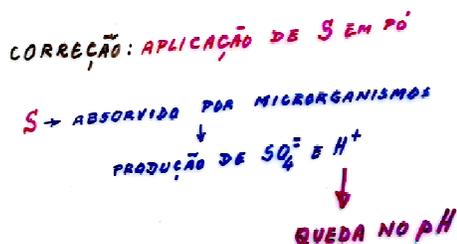
Os solos alcalinos ocorrem, usualmente, nas zonas áridas e semiáridas. E são pobres em Al^{+3} e ricos em Ca^{+2} e Mg^{+2} . As bactérias estão mais presentes nestes solos.

SOLOS ALCALINOS (pH > 7.5)



CONSEQUÊNCIAS: - DEFICIÊNCIA DE Cu, Fe, Mn e Zn
 - DEFICIÊNCIA DE P

$[Ca^{2+}]$ ALTA → FORMA-SE $Ca_3(PO_4)_2$ (INSOLÚVEL)



Minerais em excesso no solo limitam o crescimento das plantas

- Quando minerais em excesso estão presentes no solo, diz-se que o mesmo é **salino (cloreto e sulfato de sódio são os mais comuns)**, podendo restringir o crescimento das plantas caso tais íons atinjam níveis (**condutividade elétrica maior do que 4 mmho cm⁻¹**) que limitem a disponibilidade hídrica do solo.
- O excesso de minerais no solo pode ser um fator de grande importância em regiões áridas e semiáridas, pois a precipitação é insuficiente para lixiviar os íons minerais.
- Um outro problema importante relacionado ao excesso de minerais é o acúmulo de metais pesados no solo, que pode causar toxicidade severa em plantas.
- Os metais pesados incluem **Zn, Cu, Co, Ni, Cd, Ag e Cr**.

Além de nutrientes inorgânicos também aplica-se nutrientes orgânicos.

Vantagens desta prática:

- **Melhoria das propriedades físicas do solo;**
- **Aumenta a retenção de água durante a seca;**
- **Melhora a drenagem em períodos chuvosos;**
- **Libera nutrientes lentamente pela mineralização (que depende de muitos fatores, como temperatura, disponibilidade de água e oxigênio, além do tipo e número de microrganismos presentes no solo).**

NUTRIÇÃO FOLIAR

Na agricultura moderna aplica-se nutrientes minerais, na forma de pulverização ou aspersão sobre a folhagem das plantas.

Caso a planta tolere aplicações foliares de nutrientes, existem algumas situações em que se pode usar esta metodologia:

- **Muitas vezes, durante a estação seca se torna impraticável o uso de fertilizantes no solo, especialmente se a planta está necessitando de nutrientes a curto prazo;**

- Plantas de crescimento rápido que estão precisando de nutrientes a curto prazo;
- Plantas que precisam de micronutrientes (Fe, Mn e Cu) e que aplicações de quelatos ao solo não mostraram resultados (presença de bactérias ou sistema radicular profundo);
- Em trigo: aplicações de N para aumentar o teor de proteínas nas sementes.

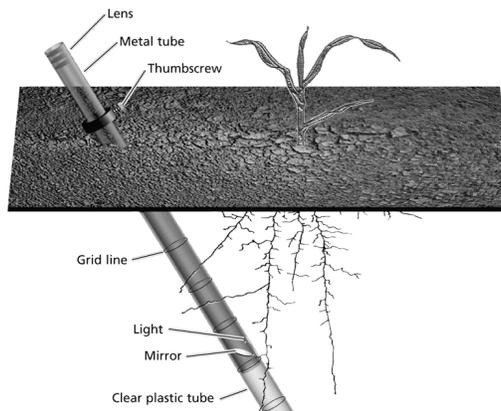
Limitações da nutrição foliar

1. **Econômicas:**
 - São mais caras;
 - Exigem várias aplicações porque têm que ser usadas em baixas concentrações;
 - Requer muita mão de obra.
2. **Técnicas:**
 - Pode acarretar acúmulo de sais na folha;
 - Deve-se aplicar o mais diluído possível, com agente surfactante (Tween 80, detergente que reduz a tensão superficial) e, de preferência em horas de baixa demanda evaporativa;
 - Nem todas as espécies toleram aplicações foliares;
 - Aplicação com calcário, porque diminui a solubilidade de muitos nutrientes, diminuindo a toxicidade.

As plantas desenvolvem extensos sistemas radiculares

- Dittmer (1937) examinou o sistema radicular de uma única planta de centeio de 16 semanas de crescimento e estimou que ela tinha 13×10^6 eixos radiculares primários e secundários, estendendo-se mais de 500 km em comprimento e proporcionando 200 m^2 de área superficial.
- Esta planta também tinha mais que 10^{10} pelos radiculares, proporcionando 300 m^2 adicionais de área superficial.
- No deserto, as raízes de plantas do gênero *Prosopis* (algaroba) podem estender-se por mais do que 50 m de profundidade, para alcançar águas subterrâneas;
- Plantas anuais cultivadas têm raízes que crescem entre 0,1 a 2,0 m em profundidade e estendem-se lateralmente a distâncias de 0,3 a 1,0 m;

- Em pomares, os sistemas de raízes principais de árvores plantadas com espaçamento de 1 m entre si, atingem um comprimento total de 12 a 18 km por árvore.
- A produção anual de raízes em ecossistemas naturais pode facilmente ultrapassar a de partes aéreas, de forma que as porções aéreas de uma planta representam apenas a “ponta de um iceberg”.
- No entanto, realizar observações de sistemas de raízes é difícil e requer técnicas especiais (minirizotron).



Desenho de um minirizotron instalado perto de uma muda de aveia. Um tubo de metal que desliza dentro de um tubo de plástico transparente é mantida no lugar por um parafuso. O tubo de metal contém o sistema óptico para as raízes que crescem entrando ao longo da superfície do tubo de plástico. Uma grade escura na superfície do tubo de plástico auxilia no posicionamento do tubo de metal. O sistema óptico inclui as lentes, espelho e luzes. Muitas configurações modernas utilizam uma câmera de televisão em miniatura, em vez de lentes, para obter a imagem.

Raiz e absorção de nutrientes

A absorção de água e nutrientes ocorre, basicamente, através das raízes.

Portanto, a distribuição do sistema radicular é de fundamental importância para a absorção de nutrientes.

Em geral, a forma das raízes é determinada geneticamente. Porém, o meio ambiente exerce grande influência.

Os sistemas radiculares diferem na forma, mas se baseiam em estruturas comuns.

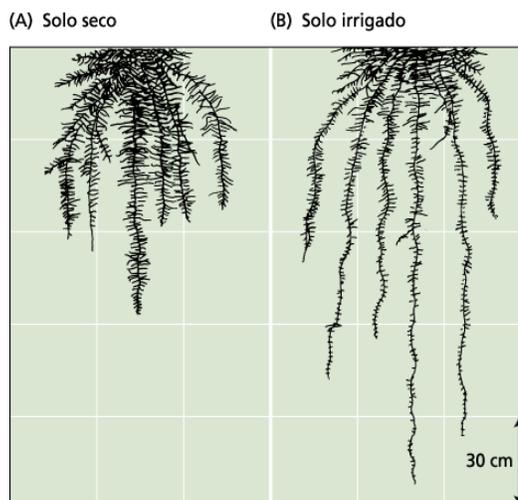
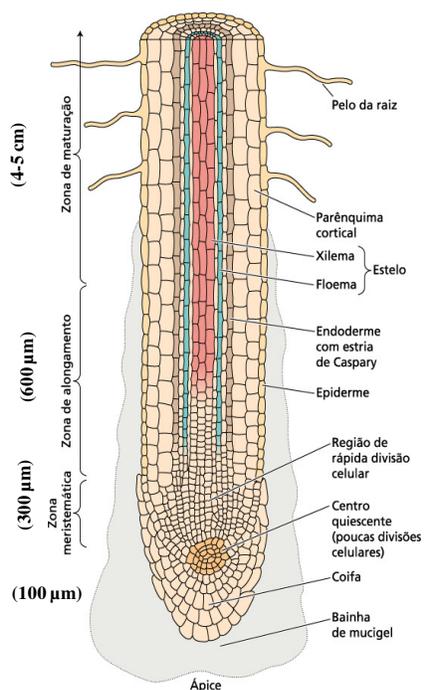
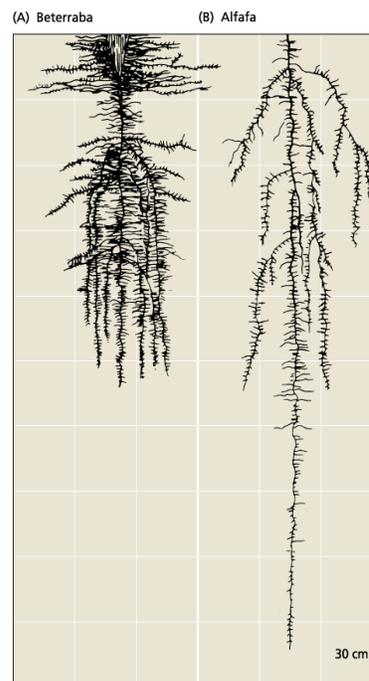


FIGURA 5.7 Sistemas de raízes fasciculados de trigo (uma monocotiledônea). (A) Sistema de raízes de uma planta madura (3 meses de idade) de trigo crescendo em solo seco. (B) Sistema de raízes de uma planta madura de trigo crescendo em solo irrigado. É visível que a morfologia do sistema de raízes é afetada pela quantidade de água presente no solo. Em um sistema de raízes fasciculado maduro, os eixos primários são indistinguíveis (segundo Weaver, 1926).

FIGURA 5.8 Sistema de raízes pivotante de duas dicotiledôneas irrigadas: beterraba (A) e alfafa (B). O sistema de raízes da beterraba é típico de cinco meses e o de alfafa é típico de dois anos de crescimento. Em ambas, o sistema de raízes mostra um eixo vertical principal. No caso da beterraba, a porção superior do sistema de raízes é engrossada devido à sua função como órgão de armazenagem (Weaver, 1926).



Secção longitudinal diagramática da região apical da raiz.

As células meristemáticas estão localizadas próximas ao ápice da raiz. Essas células geram a coifa e os tecidos superiores da raiz.

Na zona de alongamento, as células diferenciam-se para produzir xilema, floema e córtex.

Os pelos da raiz, formados a partir de células epidérmicas, aparecem na zona de maturação.

A maior parte da absorção de água e de nutrientes ocorre através das raízes capilares ou filamentosas que exploram grandes volumes de solo.

A região da raiz através da qual ocorre maior quantidade de absorção de água e de nutrientes é a dos pelos absorventes. Esta é a regra geral, porém existem exceções.

Fatores ambientais afetam o comprimento da zona de pelos absorventes (umidade, presença de bactérias e micorrizas).

DIFERENTES REGIÕES DA RAIZ ABSORVEM DIFERENTES ÍONS MINERAIS

Alguns pesquisadores afirmam que os nutrientes minerais são absorvidos pela região apical das raízes (Bar-Yosef et al., 1972). Outros dizem que eles são absorvidos por toda a superfície radicular (Nye & Tinker, 1977).

Evidências experimentais suportam as duas possibilidades, dependendo da espécie vegetal e do íon investigado:

- Absorção de cálcio parece estar restrita à região apical das raízes em cevada;

- Ferro pode ser absorvido tanto pela região apical como em cevada (Clarckson, 1985) **ou por toda a superfície radicular como em milho** (Kashirad, et al., 1973);
- Potássio, nitrato, amônio e fosfato podem ser absorvidos por toda superfície radicular (Clarckson, 1985), **mas em milho a região de alongamento tem velocidade máxima de acumulação de potássio** (Sharp et al., 1990) **e de absorção de nitrato** (Taylor & Bloom, 1998);
- Em milho e arroz, o ápice radicular absorve mais rapidamente amônio do que a região de alongamento (Colmer & Bloom, 1998);
- Em várias espécies, os pelos absorventes são mais ativos na absorção de fosfato (Fohse et al., 1991).

No solo os nutrientes minerais se movem para a superfície radicular dissolvidos tanto no fluxo de massa de água como por difusão.

Assim, a quantidade de nutriente suprida por fluxo de massa depende da transpiração e da sua concentração na solução do solo.

Na difusão, os nutrientes movem-se de uma região de maior para outra de menor concentração.

Quando o fluxo de massa e a difusão são lentas forma-se uma zona de esgotamento do nutriente próxima à superfície da raiz.

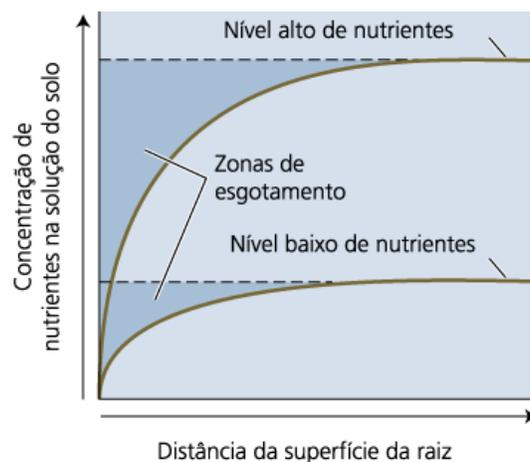


FIGURA 5.10 Formação de uma zona de esgotamento de nutrientes na região do solo adjacente à raiz da planta. Uma zona de esgotamento se forma quando a taxa de absorção de nutrientes pelas células da raiz excede a taxa de reposição de nutrientes por fluxo de massa e por difusão na solução do solo. Esse esgotamento causa um decréscimo localizado na concentração de nutrientes na área adjacente à superfície da raiz (segundo Mengel & Kirkby, 2001).

A aquisição de nutrientes pelas plantas é função:

- da disponibilidade de nutrientes no solo;
- do crescimento do sistema radicular;
- e da capacidade de absorção da raiz.

Formação de micorrizas

As raízes de mais de 80% de todas as plantas estudadas, incluindo praticamente todas as espécies de importância econômica, formam associações com fungos, denominadas de micorrizas.

Existem duas classes principais de fungos micorrízicos: micorrizas ectotróficas (presentes em angiospermas arbóreas e gimnospermas) e vesicular-arbusculares (presentes na maioria das angiospermas herbáceas).

Raiz infectada com fungos micorrízicos ectotróficos.

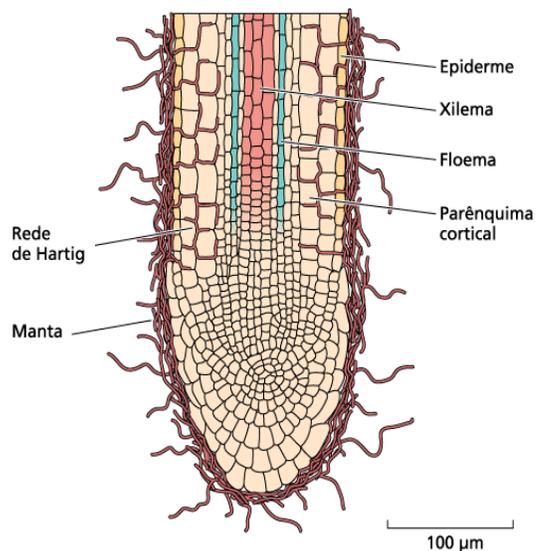


FIGURA 5.12 Raiz infectada com fungo micorrízico ectotrófico. A hifa fúngica envolve a raiz para produzir uma densa bainha ou manta fúngica e penetra os espaços intercelulares do parênquima cortical para formar a rede de Hartig. A massa total de hifas fúngicas pode ser comparável à massa da própria raiz (segundo Rovira et al., 1983).

Associação entre fungos micorrízicos arbusculares com uma secção de uma raiz vegetal.

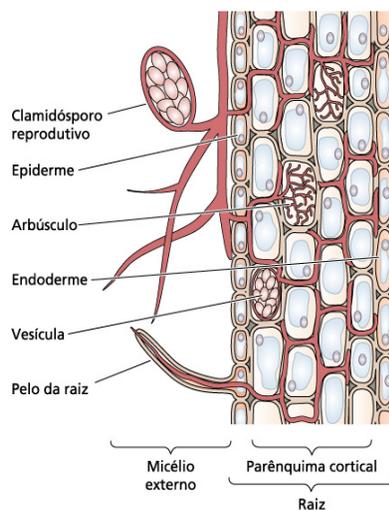


FIGURA 5.13 Associação entre fungos micorrízicos arbusculares com uma secção de uma raiz vegetal. As hifas do fungo crescem nos espaços intercelulares do parênquima cortical e penetram células corticais individuais. À medida que elas se estendem dentro da célula, não rompem a membrana plasmática ou o tonoplasto da célula hospedeira. Em vez disso, a hifa é circundada por estas membranas e forma estruturas conhecidas como arbuscúlos, que participam da troca de íons entre a planta hospedeira e o fungo (segundo Mauser, 1988).

Os fungos micorrízicos facilitam a absorção de nutrientes (P, Zn, Cu) pelas raízes.

Os nutrientes se movem dos fungos micorrízicos às células da raiz, entretanto pouco se sabe sobre o mecanismo pelo qual os nutrientes minerais absorvidos pelos fungos são transferidos às células das raízes das plantas.

- **Plantas da família das Brassicaceae (repolho), Chenopodiaceae (espinafre), Proteaceae (macadâmia), assim como plantas aquáticas, raramente ou nunca tem micorrizas;**
- **As micorrizas estão ausentes em plantas crescendo em solos muito secos, salinos, alagados e com fertilidade extrema (alta ou baixa).**
- **Plantas cultivadas em hidroponia e plantas jovens cultivadas e em rápido crescimento raramente tem micorrizas.**

Qual a trajetória percorrida pelos íons no caminho solo – xilema da raiz?

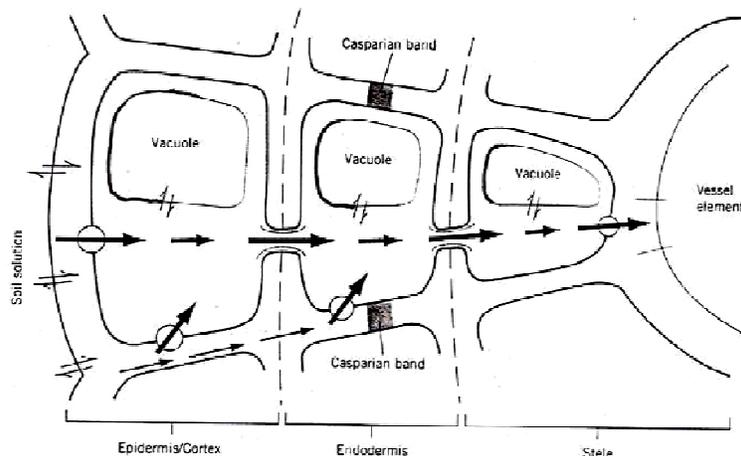


Diagrama mostrando o movimento radial de íons através da raiz (Hopkins, 2000).

O termo espaço livre ou espaço externo aplica-se ao volume de um tecido que é acessível à difusão de um soluto aplicado externamente. Logo, o limite do espaço livre é a membrana plasmática.

A figura ao lado ilustra a demonstração do espaço livre de um ânion (SO_4^{-2}) e de um cátion (Sr^{+2}) em uma raiz de cevada.

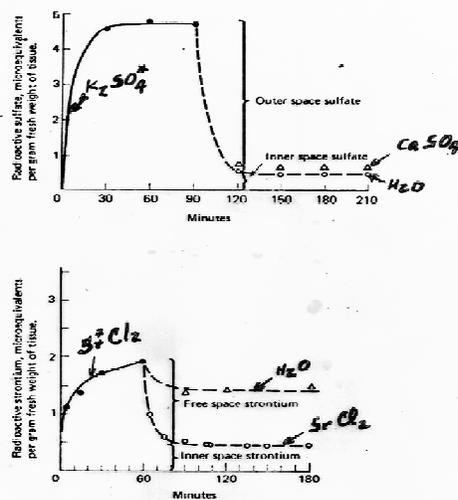
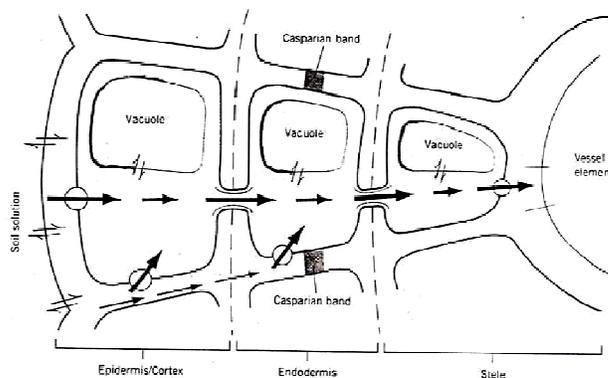


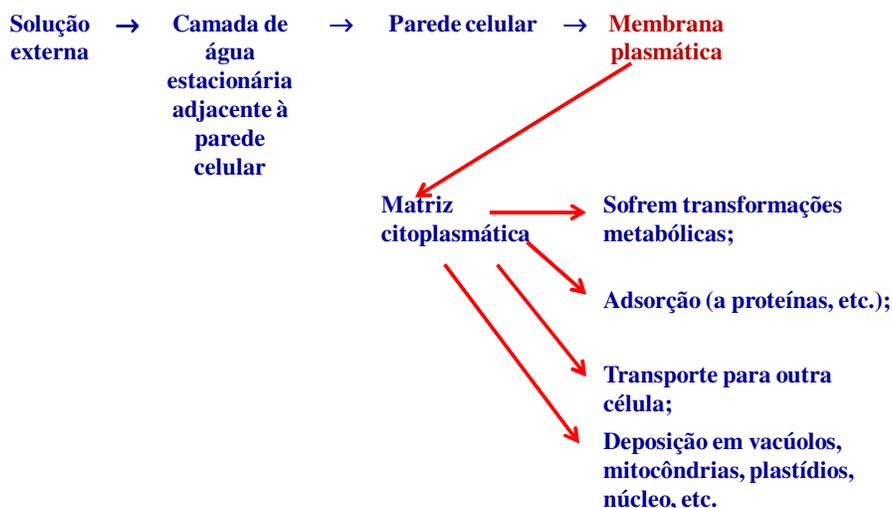
Figure 4. Time course of absorption and desorption of radioactive sulfate (SO_4^{-}) and radioactive strontium (Sr^{++}) by excised roots of barley (*Hordeum vulgare*). Top: Black circles and solid line: roots in solution of radioactive sulfate (K_2SO_4 , 20 $\mu\text{Ci/g}$ per liter). Open circles and broken line: roots in water. Open triangles and broken line: roots in solution of nonradioactive sulfate (CaSO_4 , 20 μg per liter). After Epstein, 1985 (Fig. 1). Bottom: Black circles and solid line: roots in solution of radioactive strontium (SrCl_2 , 1 μCi per liter). Open triangles and broken line: roots in water. Open circles and broken line: roots in solution of nonradioactive strontium (SrCl_2 , 1 μCi per liter). (For further details, consult the text.) After Epstein and Leggett, 1964 (Figs. 2 and 8).

Em uma raiz o limite do espaço livre é a endoderme (presença das estrias de Caspary).

O espaço livre de uma raiz varia de 5 a 20%, dependendo do soluto.



Caminho percorrido por um soluto para entrar na célula



O ESTUDO DA NUTRIÇÃO MINERAL

O cultivo de plantas com suas raízes mergulhadas em soluções de sais minerais (HIDROPONIA) têm possibilitado um grande progresso nos estudos de nutrição mineral.

- Em 1699, Woodward (Inglaterra) comparou o crescimento de estacas de menta em água de diferentes procedências (chuva, lagos, esgotos, etc.). Ele observou que as estacas se desenvolviam melhor na "água de lagos e de esgotos do que na água da chuva".
- Na década de 1860, Pfeffer, Sachs e Knop (Alemanha) cultivaram plantas em soluções de sais inorgânicos pela 1ª vez. A solução de Knop consistia de: KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, KH_2PO_4 , MgSO_4 e sal de Fe.
- As plantas não sofriam deficiência porque os sais não eram puros (contaminação com outros elementos, como boro e molibdênio, reconhecidos, hoje, como essenciais).
- Posteriormente verificou-se a necessidade de aeração da solução nutritiva.

Para atender à crescente demanda por alimento, o consumo mundial dos principais elementos minerais usados em fertilizantes, NPK, aumentou de 30 milhões de toneladas em 1960 para 143 milhões de toneladas em 1990. Nos últimos anos, o consumo aumentou para 170 milhões de toneladas.

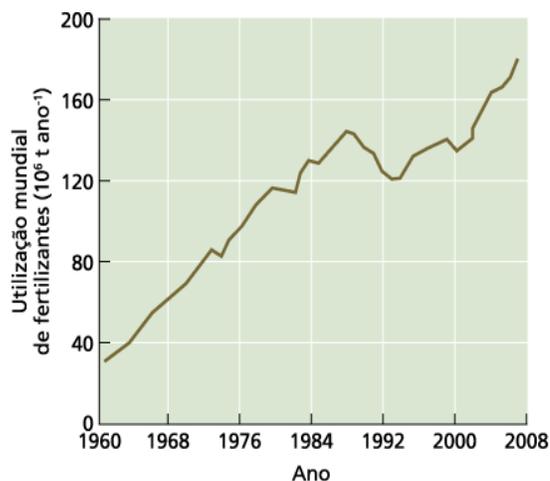
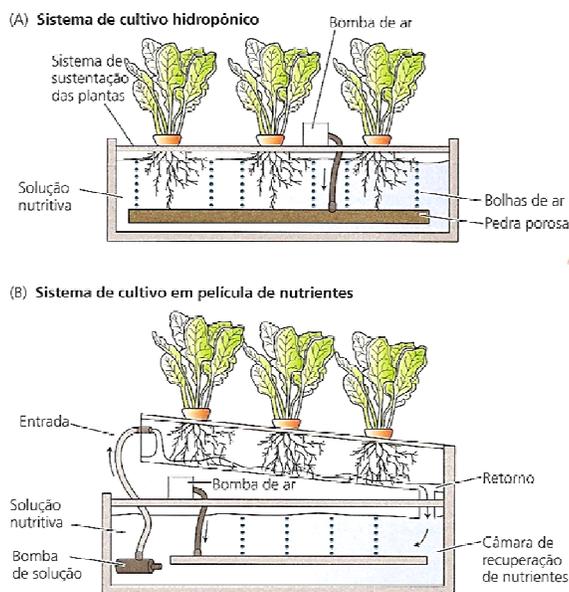
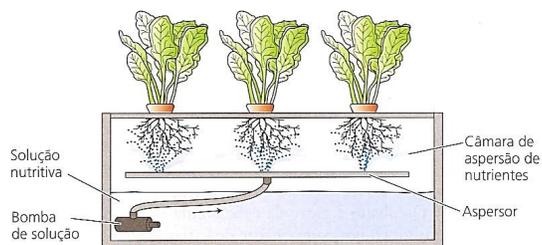


FIGURA 5.1 Consumo mundial de fertilizantes nas últimas cinco décadas (www.faostat.fao.org/site/575/default.aspx#ancor).

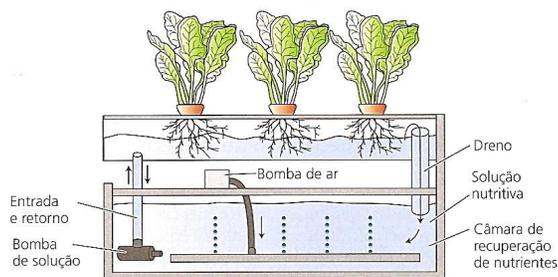
Tipos de sistemas de cultivo em solução



(C) Sistema de cultivo aeropônico



(D) Sistema de subirrigação



Ao longo dos anos, várias formulações tem sido empregadas para as soluções nutritivas, que são, modificações da solução original de Knop.

A mais popular é a solução de Hoagland modificada, que foi desenvolvida, em sua formulação original, na Universidade da Califórnia (Hoagland & Arnon, 1950).

TABLE 5.3
Composition of a modified Hoagland nutrient solution for growing plants

Compound	Molecular weight	Concentration of stock solution	Concentration of stock solution	Volume of stock solution per liter of final solution	Element	Final concentration of element	
	g mol ⁻¹	mM	g L ⁻¹	mL		μM	ppm
Macronutrients							
KNO ₃	101.10	1,000	101.10	6.0	N	16,000	224
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	236.16	1,000	236.16	4.0	K	6,000	235
NH ₄ H ₂ PO ₄	115.08	1,000	115.08	2.0	Ca	4,000	160
MgSO ₄ · 7H ₂ O	246.48	1,000	246.49	1.0	P	2,000	62
					S	1,000	32
					Mg	1,000	24
Micronutrients							
KCl	74.55	25	1.864	2.0	Cl	50	1.77
H ₃ BO ₃	61.83	12.5	0.773		B	25	0.27
MnSO ₄ · H ₂ O	169.01	1.0	0.169		Mn	2.0	0.11
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	287.54	1.0	0.288		Zn	2.0	0.13
CuSO ₄ · 5H ₂ O	249.68	0.25	0.062		Cu	0.5	0.03
H ₂ MoO ₄ (85% MoO ₃)	161.97	0.25	0.040		Mo	0.5	0.05
NaFeDTPA (10% Fe)	468.20	64	30.0	0.3–1.0	Fe	16.1–53.7	1.00–3.00
Optional^a							
NiSO ₄ · 6H ₂ O	262.86	0.25	0.066	2.0	Ni	0.5	0.03
Na ₂ SiO ₃ · 9H ₂ O	284.20	1,000	284.20	1.0	Si	1,000	28

Source: After Epstein 1972.

Note: The macronutrients are added separately from stock solutions to prevent precipitation during preparation of the nutrient solution. A combined stock solution is made up containing all micronutrients except iron. Iron is added as sodium ferric diethylenetriaminepentaacetate (NaFeDTPA, trade name Ciba-Geigy Sequestrene 330 Fe; see Figure 5.2); some plants, such as maize, require the higher level of iron shown in the table.

^aNickel is usually present as a contaminant of the other chemicals, so it may not need to be added explicitly. Silicon, if included, should be added first and the pH adjusted with HCl to prevent precipitation of the other nutrients.

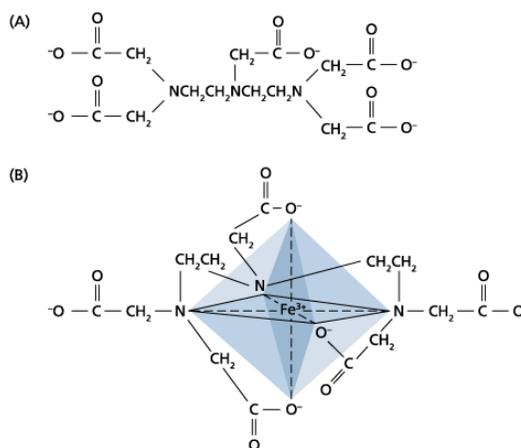
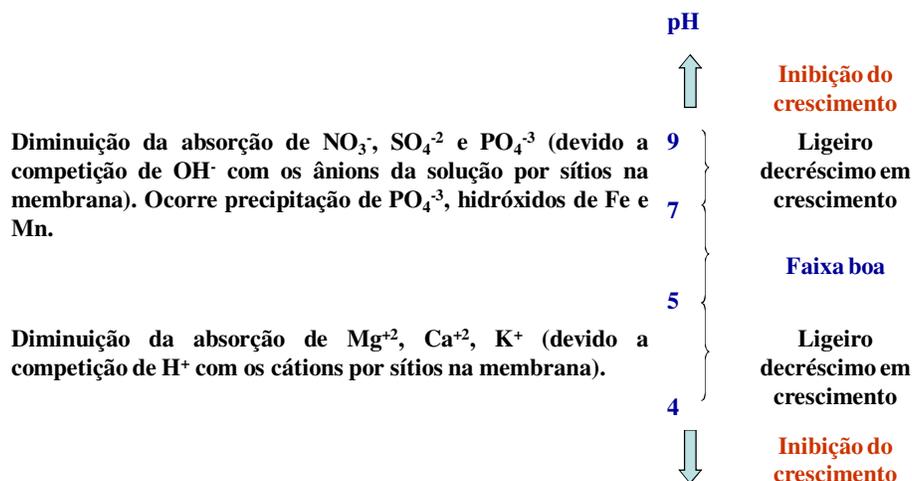
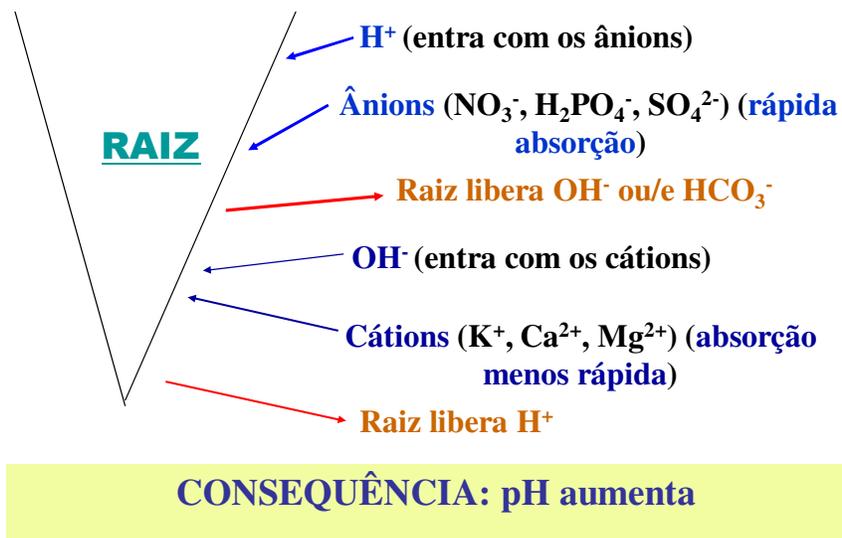


FIGURA 5.3 Quelante e cátion quelado isolado. Estrutura química do quelante ácido dietilenotriaminapentacético (DTPA) sozinho (A) e quelado com um íon Fe³⁺ (B). O ferro se liga ao DTPA por interações com três átomos de nitrogênio e os três átomos de oxigênio ionizados dos grupos carboxilato (Sievers & Bailar, 1962). A estrutura de anel resultante envolve o íon metálico e efetivamente neutraliza sua reatividade na solução. Durante a absorção de ferro na superfície das raízes, o Fe³⁺ parece ser reduzido a Fe²⁺, que é liberado do complexo DTPA-ferro. O quelante pode se ligar a outros íons Fe³⁺ disponíveis.

Varição de pH da solução nutritiva
(pH inicial de 5,0)

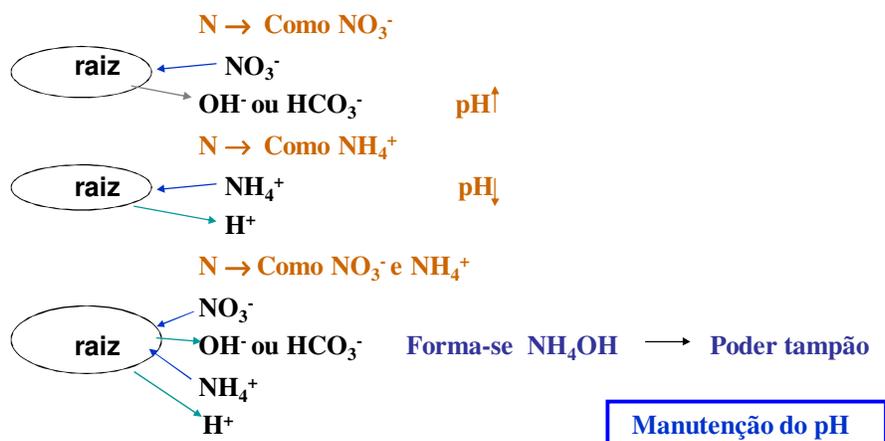


pH > 9,0 e pH < 4,0 causam:

- Injúria direta devida a excessos de OH^- ou H^+ ;
- Desnaturação das proteínas das membranas;
- Destruição dos “locais” de absorção das membranas.

Técnicas usadas para evitar variações do pH em soluções nutritivas

- Efetuar mudanças frequentes da solução;
- Ajustamento do pH com HCl ou NaOH;
- Fornecer nitrogênio na forma de NO_3^- e NH_4^+ .



Fatores que influenciam o teor de nutrientes minerais na planta

- Espécie de planta ou variedades dentro de uma mesma espécie;
- Condições ambientais nas quais a planta é cultivada;
- Composição química do meio em que a planta é cultivada;
- Idade do tecido (folhas adultas têm mais nutrientes minerais do que folhas jovens ou senescentes).

Definição de elemento essencial

Um elemento essencial é definido como aquele que é componente intrínseco na estrutura ou no metabolismo de uma planta **ou cuja ausência causa anormalidades severas no crescimento, desenvolvimento e reprodução do vegetal** (Arnon & Stout, 1939; Epstein & Bloom, 2005).

TABLE 5.1 Tissue levels of essential elements required by most plants (Part 1)			
Element	Chemical symbol	Concentration in dry matter (% or ppm) ^a	Relative number of atoms with respect to molybdenum
Obtained from water or carbon dioxide			
Hydrogen	H	6	60,000,000
Carbon	C	45	40,000,000
Oxygen	O	45	30,000,000
Obtained from the soil			
Macronutrients			
Nitrogen	N	1.5	1,000,000
Potassium	K	1.0	250,000
Calcium	Ca	0.5	125,000
Magnesium	Mg	0.2	80,000
Phosphorus	P	0.2	60,000
Sulfur	S	0.1	30,000
Silicon	Si	0.1	30,000

Source: Epstein 1972, 1999.

^aThe values for the nonmineral elements (H, C, O) and the macronutrients are percentages. The values for micronutrients are expressed in parts per million.

TABLE 5.1Tissue levels of essential elements required by most plants (*Part 2*)

Element	Chemical symbol	Concentration in dry matter (% or ppm) ^a	Relative number of atoms with respect to molybdenum
Micronutrients			
Chlorine	Cl	100	3,000
Iron	Fe	100	2,000
Boron	B	20	2,000
Manganese	Mn	50	1,000
Sodium	Na	10	400
Zinc	Zn	20	300
Copper	Cu	6	100
Nickel	Ni	0.1	2
Molybdenum	Mo	0.1	1

Source: Epstein 1972, 1999.

^aThe values for the nonmineral elements (H, C, O) and the macronutrients are percentages. The values for micronutrients are expressed in parts per million.

Observações:

1: Os nutrientes minerais são classificados como macro ou micronutrientes, de acordo com suas concentrações relativas no tecido vegetal.

- **Macronutrientes: acima de 1.000 mg/Kg de MS;**
- **Micronutrientes: abaixo de 100 mg/Kg de MS.**

Obs: Alguns tecidos, como o mesófilo, têm quase tanto ferro e manganês quanto enxofre e magnésio.

2: Mengel & Kirkby (2001) propuseram que, em vez de macro e micronutrientes, os nutrientes minerais fossem classificados de acordo com seu papel bioquímico e sua função fisiológica na planta.

TABLE 5.2 Classification of plant mineral nutrients according to biochemical function (Part 1)	
Mineral nutrient	Functions
Group 1	Nutrients that are part of carbon compounds
N	Constituent of amino acids, amides, proteins, nucleic acids, nucleotides, coenzymes, hexosamines, etc.
S	Component of cysteine, cystine, methionine. Constituent of lipoic acid, coenzyme A, thiamine pyrophosphate, glutathione, biotin, 5'-adenylylsulfate, and 3'-phosphoadenosine.
Group 2	Nutrients that are important in energy storage or structural integrity
P	Component of sugar phosphates, nucleic acids, nucleotides, coenzymes, phospholipids, phytic acid, etc. Has a key role in reactions that involve ATP.
Si	Deposited as amorphous silica in cell walls. Contributes to cell wall mechanical properties, including rigidity and elasticity.
B	Complexes with mannitol, mannan, polymannuronic acid, and other constituents of cell walls. Involved in cell elongation and nucleic acid metabolism.

Source: After Evans and Sorger 1966 and Mengel and Kirkby 2001.

TABLE 5.2 Classification of plant mineral nutrients according to biochemical function (Part 2)	
Mineral nutrient	Functions
Group 3	Nutrients that remain in ionic form
K	Required as a cofactor for more than 40 enzymes. Principal cation in establishing cell turgor and maintaining cell electroneutrality.
Ca	Constituent of the middle lamella of cell walls. Required as a cofactor by some enzymes involved in the hydrolysis of ATP and phospholipids. Acts as a second messenger in metabolic regulation.
Mg	Required by many enzymes involved in phosphate transfer. Constituent of the chlorophyll molecule.
Cl	Required for the photosynthetic reactions involved in O ₂ evolution.
Mn	Required for activity of some dehydrogenases, decarboxylases, kinases, oxidases, and peroxidases. Involved with other cation-activated enzymes and photosynthetic O ₂ evolution.
Na	Involved with the regeneration of phosphoenolpyruvate in C ₄ and CAM plants. Substitutes for potassium in some functions.

Source: After Evans and Sorger 1966 and Mengel and Kirkby 2001.

TABLE 5.2
Classification of plant mineral nutrients according to biochemical function (Part 3)

Mineral nutrient	Functions
Group 4	Nutrients that are involved in redox reactions
Fe	Constituent of cytochromes and nonheme iron proteins involved in photosynthesis, N ₂ fixation, and respiration.
Zn	Constituent of alcohol dehydrogenase, glutamic dehydrogenase, carbonic anhydrase, etc.
Cu	Component of ascorbic acid oxidase, tyrosinase, monoamine oxidase, uricase, cytochrome oxidase, phenolase, laccase, and plastocyanin.
Ni	Constituent of urease. In N ₂ -fixing bacteria, constituent of hydrogenases.
Mo	Constituent of nitrogenase, nitrate reductase, and xanthine dehydrogenase.

Source: After Evans and Sorger 1966 and Mengel and Kirkby 2001.

Elementos benéficos: Cobalto, Selênio e Alumínio

- **Cobalto** → **Essencial para a fixação simbiótica do nitrogênio** (faz parte da cobalamina, vit. B₁₂, um componente de várias enzimas em microrganismos fixadores de nitrogênio);
- **Selênio** → **Evita o excesso de fosfato e aumenta a resistência da planta contra ataque de insetos. Pode substituir o enxofre;**
- **Alumínio** → **Baixa [Al] (72 – 185 μmol L⁻¹) traz benefícios para o crescimento de plantas como beterraba, milho e algumas leguminosas tropicais;**

Observação:

- **Sódio** → **É essencial para as plantas C₄ e CAM (Regeneração do PEP)** e para as plantas C₃ o Na⁺ aumenta a expansão celular;
- **Silício** → **É essencial para a cavalinha ou junco de polimento (Pteridófito)**, para as outras plantas o Si aumenta a resistência mecânica da parede celular e a resposta contra patógenos.

<u>ELEMENTOS</u>		
C	Retirados da atmosfera e da água	CO ₂
H		H ₂ O
O		O ₂
<u>MACRONUTRIENTES</u>		
K	Absorvidos do solo como cátions	K ⁺
Ca		Ca ⁺⁺
Mg		Mg ⁺⁺
N	Absorvidos do solo como ânions	NO ₃ ⁻ (NH ₄ ⁺)
P		H ₂ PO ₄ ⁻ (HPO ₄ ²⁻)
S		SO ₄ ²⁻
Si		Si(OH) ₄
<u>ELEMENTOS</u>		
<u>MICRONUTRIENTES</u>		
B		BO ₃ ³⁻ (B ₄ O ₇ ²⁻)
Cl		Cl ⁻
Cu		Cu ⁺⁺ (Cu ⁺)
Fe		Fe ⁺⁺ (Fe ⁺⁺⁺)
Mn	Absorvidos do solo como:	Mn ⁺⁺
Mo		MoO ₄ ²⁻
Zn		Zn ⁺⁺
Na		Na ⁺
Ni		Ni ⁺⁺

Desordens nutricionais e necessidades quantitativas dos elementos essenciais

O suprimento inadequado de determinado elemento essencial será acompanhado por **mudanças metabólicas**, tais como variações:

- em velocidades de reações;
- em atividade enzimática;
- em concentrações de metabólitos.

O slide seguinte ilustra bem a afirmativa acima:

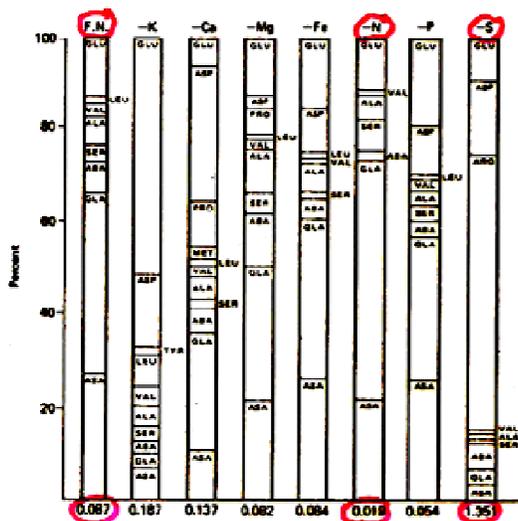


Figure 3. Relative composition of the alcohol-soluble amino acids and amides of leaves of 2400-permint grown in full nutrient (F.N.) solution and in solutions of one or another mineral deficiency. At the base of each histogram is indicated the total quantity of amino acids and amides extractable in alcohol, in milligrams per gram fresh weight of leaf tissue. Key: ASA, aspartic acid; GLA, glutamic acid; SER, serine; ASP, asparagine; ALA, alanine; GLU, glutamine; ARG, arginine; MET, methionine; PRO, proline; VAL, valine; LEU, leucine; TYR, tyrosine; ABA, β -amino butyric acid. After Crane and Steward, 1952 (Fig. 1).

- Ocorrem tanto mudanças qualitativas quanto quantitativas de metabólitos;
- Ocorre inibição do crescimento;
- Apresentam sintomas de deficiência visual nas folhas:
 1. Inicialmente nas folhas velhas quando o elemento é móvel; e,
 2. Inicialmente nas folhas jovens e gemas quando o elemento é imóvel.

MOBILIDADE DOS ELEMENTOS MINERAIS

TABLE 5.4
Mineral elements classified on the basis of their mobility within a plant and their tendency to retranslocate during deficiencies

Mobile	Immobile
Nitrogen	Calcium
Potassium	Sulfur
Magnesium	Iron
Phosphorus	Boron
Chlorine	Copper
Sodium	
Zinc	
Molybdenum	

Note: Elements are listed in the order of their abundance in the plant.

Para se detectar deficiência de determinado elemento em uma planta, com base em **sintomas visuais**, precisa-se ter grande experiência.

Além disso, os sintomas visuais só aparecem quando a deficiência é severa.

Por outro lado, nas condições de campo, de modo geral, **as deficiências são múltiplas e os sintomas visuais se complicam ainda mais.**

Portanto, o agrônomo interessado em diagnosticar deficiências minerais, deve utilizar: **A análise do solo, seguida de análise da planta e por último observação dos sintomas visuais.**

A análise do solo fornece dados sobre a quantidade total de reservas em nutrientes minerais existentes no solo.

Todavia, a potencialidade de certos elementos nem sempre é real, daí a necessidade de complementação da análise do solo com a análise de plantas.

A análise de plantas é um método utilizado para se determinar o “status” nutricional da planta, através da medida da concentração de nutrientes em amostras de tecidos.

Em plantas cultivadas, os níveis de nutrientes em determinados estádios de crescimento influenciam a produtividade de constituintes vegetais economicamente importantes.

Geralmente usa-se pecíolos de folhas maduras.

Baseia-se no estabelecimento da relação entre o crescimento da cultura e a concentração de um dado elemento mineral em amostras de tecidos.

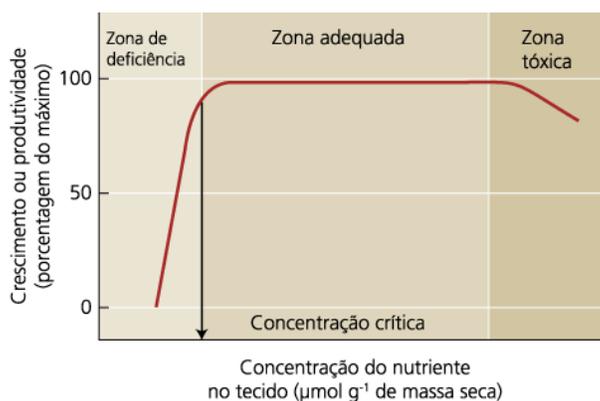
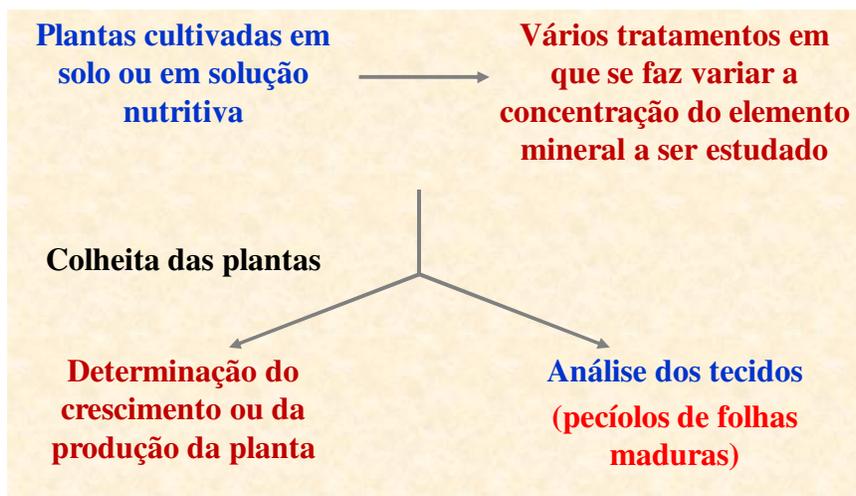


FIGURA 5.4 A relação entre produtividade (ou crescimento) e o conteúdo de nutrientes do tecido vegetal define zonas de deficiência, adequação e toxicidade. Produtividade ou crescimento podem ser expressos em termos de massa seca de parte aérea ou altura. Para obter dados deste tipo, as plantas são cultivadas sob condições nas quais a concentração de um nutriente essencial é alterada, enquanto os demais são adequadamente supridos. O efeito da variação na concentração deste nutriente durante o crescimento da planta se reflete no crescimento ou na produtividade. A concentração crítica deste nutriente é aquela abaixo da qual a produtividade ou o crescimento é reduzido.