

2023

# APOSTILA DE FERTILIDADE DO SOLO

Zootecnia

Faculdade de Zootecnia e Engenharia de  
Alimentos – FZEA/USP

Professora Dra. Fernanda de Fátima da Silva Devechio



## Sumário

1.	RELATOS SOBRE AGRICULTURA E FERTILIDADE DO SOLO .....	5
2.	EVOLUÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO NO BRASIL .....	7
3.	INTRODUÇÃO À FERTILIDADE DO SOLO .....	7
4.	DEFINIÇÕES DO SOLO .....	7
5.	TIPOS DE FERTILIDADE DE SOLO.....	12
5.1.	Conceito de Fertilidade do solo (EMBRAPA, 2007).....	13
5.2.	Fertilidade Natural.....	13
5.3.	Fertilidade Potencial.....	13
5.4.	Fertilidade Atual.....	14
6.	SOLO FÉRTIL E SOLO PRODUTIVO .....	15
7.	CAUSAS DA BAIXA FERTILIDADE NOS SOLOS .....	16
8.	INTRODUÇÃO AOS NUTRIENTES DE PLANTAS (Prado, 2018).....	18
9.	ELEMENTOS MINERAIS (Malavolta, 2006) .....	19
10.	NUTRIENTES DE PLANTAS (Malavolta, 2006) .....	19
10.1.	Definição e classificação dos nutrientes.....	19
10.2.	Composição relativa de nutrientes nas plantas.....	21
10.3.	Critérios de essencialidade .....	21
11.	FORMAS DE ABSORÇÃO DOS NUTRIENTES.....	24
11.1.	Formas absorvidas.....	24
11.2.	Formas expressas.....	24
12.	ABSORÇÃO IÔNICA RADICULAR (Malavolta, 2006) .....	25
13.	ACÚMULO E EXTRAÇÃO DE NUTRIENTES PELAS CULTURAS E A FORMAÇÃO DE COLHEITA .....	27
6.1.	Exigência nutricional.....	27
6.2.	Acúmulo e curva de extração de nutriente .....	31
14.	LEIS GERAIS DA ADUBAÇÃO.....	36
13.1.	Lei da Restituição.....	36
13.2.	Lei do Mínimo.....	37
13.3.	Lei de Mitscherlich, como Derivação da Lei do Mínimo .....	39
13.4.	Dose mais econômica de fertilizantes .....	41
13.5.	Lei da Interação.....	42
13.6.	Lei do Máximo .....	44
13.7.	Lei da Qualidade Biológica.....	45
15.	PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO SOLO .....	46

14.1.	Origem das cargas negativas do solo: .....	46
14.2.	Origem das cargas positivas do solo .....	47
14.3.	Adsorção e troca iônica .....	48
16.	AMOSTRAGEM E AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO .....	51
15.1.	Etapas de um programa integrado de recomendação da adubação .....	51
15.2.	Escolha das glebas para amostragem .....	51
15.3.	Ferramenta para amostragem .....	52
15.4.	Procedimentos para amostragem de solo .....	52
15.5.	Amostragem de solo em agricultura de precisão.....	52
15.6.	Época de amostragem.....	53
15.7.	Profundidade de amostragem .....	54
15.8.	Amostragem de solos: Etapa Crítica .....	54
15.9.	Prática de Amostragem de solo .....	54
17.	INTERPRETAÇÃO DA ANÁLISE DE SOLO (Raij, 2011) .....	55
18.	REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES (Raij, 2011).....	57
19.	ACIDEZ DO SOLO .....	58
18.1.	Introdução .....	58
18.2.	Reação do solo .....	58
18.3.	Origem da acidez do solo (Raij, 2011).....	59
18.3.1.	<i>Remoção de bases da solução do solo</i> .....	60
18.3.2.	<i>Aumento de H<sup>+</sup> na solução</i> .....	60
18.4.	Tipos de Acidez do solo: Ativa e Potencial .....	62
18.5.	Efeitos da acidez dos solos.....	62
18.6.	Alumínio em solos ácidos .....	64
20.	CORREÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO (Souza e Lobato, 2004) .....	65
19.1.	Finalidades da calagem .....	66
19.2.	Corretivos de acidez do solo (Alcarde, 2005) .....	67
19.3.	Métodos de recomendação de calagem .....	69
21.	NITROGÊNIO NO SOLO .....	71
20.1.	Introdução .....	71
20.2.	Nitrogênio no solo (Raij, 2011).....	71
20.3.	Forma de nitrogênio no solo (Raij, 2011) .....	72
20.4.	Perdas de nitrogênio no solo (Raij, 2011) .....	73
20.5.	Análise química de solo para o N.....	73

21. FÓSFORO.....	74
21.1. Fósforo no solo.....	74
21.2. Solubilidade e adsorção do P .....	75
21.3. Análise de solo para o P .....	76
21.4. Fósforo na planta.....	76
21.5. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados.....	78
22. POTÁSSIO.....	79
22.1. Potássio no solo.....	79
22.2. Análise de solo para o K, Ca e Mg.....	80
19.3. Potássio na planta .....	80
22.3. Uso eficiente de fertilizantes potássicos.....	81
23. CÁLCIO.....	82
23.1. Cálcio no solo.....	82
23.2. Cálcio na planta.....	82
23.3. Adição de Ca e Mg na forma de corretivos.....	84
24. MAGNÉSIO.....	84
24.1. Magnésio no solo .....	84
24.2. Magnésio na planta.....	84
25. ENXOFRE .....	86
25.1. Enxofre no solo .....	86
25.2. Enxofre na planta .....	87
25.3. Adição de enxofre para as plantas.....	88
26. MICRONUTRIENTES .....	89
26.1. Introdução .....	89
26.2. Boro.....	89
26.3. Cloro.....	90
26.4. Cobre.....	91
26.5. Ferro .....	92
26.6. Manganês .....	93
26.7. Molibdênio .....	93
26.8. Zinco na planta (Malavolta, 2006) .....	94
27. REFERÊNCIAS CONSULTADAS.....	95

## 1. RELATOS SOBRE AGRICULTURA E FERTILIDADE DO SOLO

O período do desenvolvimento da espécie humana, durante o qual o homem iniciou o cultivo das plantas, marca o nascimento da agricultura. A época exata em que isso aconteceu não é conhecida, mas certamente foi há milhares de anos antes de Cristo. Até então, o homem tinha hábitos nômades e vivia quase que exclusivamente da caça e coleta de frutos e sementes da mata para obtenção de seus alimentos.

Com o passar do tempo, o homem foi se tornando menos nômade e mais dependente da terra em que vivia. Famílias, clãs e vilas se desenvolveram e, com isto, o desenvolvimento da habilidade de produzir, ou seja, *surgiu a agricultura*.

O que deve ser destacado é que desde a pré-história, então, o homem deixou as atividades nômades – quando se alimentava de produtos de coleta e da caça – e passou a se estabelecer em áreas mais definidas, a fertilidade do solo e a produtividade das culturas passaram a interagir mais ou menos profundamente.

Uma das regiões do mundo onde existem evidências de civilizações muito primitivas é a *Mesopotâmia*, onde se localiza atualmente o Iraque, situada entre os rios Tigre e Eufrates, os quais foram fundamentais para que o homem, a partir do desenvolvimento da agricultura e da criação de animais, pudesse sedentarizar-se e formar cidades naquele local. Suas condições naturais, principalmente por causa da fertilidade do solo, permitiram que pequenas aldeias fossem formadas em seu território. A fertilidade do solo era garantida pelo ciclo de cheias dos dois rios que encharcavam o solo com material orgânico e permitia o desenvolvimento da agricultura e da criação de animais. A palavra “Mesopotâmia” tem origem no idioma grego e significa “terra entre rios” em uma menção direta à importância dos rios para aquela região.

Os primeiros povos que se estabeleceram na região de maneira sedentária foram os sumérios. As primeiras cidades da Mesopotâmia foram fundadas por eles e acredita-se que os sumérios tenham chegado ao local por volta de 5000 a.C. Os sumérios foram extremamente importantes para o desenvolvimento humano, pois, ali, desenvolveram técnicas para importantes construções que permitiam ao homem manter um controle sobre a natureza. Esse povo desenvolveu barragens para impedir o avanço das águas dos rios no período de cheias, além de reservatórios e canais de irrigação.

Além disso, atribui-se aos sumérios o desenvolvimento da primeira forma de escrita da humanidade: a escrita cuneiforme. Criada para manter controle sobre a

contabilidade dos palácios reais, essa escrita era feita em blocos de argila com um instrumento pontiagudo chamado cunha.



Cerca de 2000 anos mais tarde, o historiador grego Heródoto relata suas viagens para a Mesopotâmia e menciona produtividades excepcionais obtidas pelos habitantes da região.

Com o passar do tempo, o homem observou que certos solos não iriam produzir satisfatoriamente quando cultivados continuamente.



## **2. EVOLUÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO NO BRASIL**

A história do desenvolvimento da agricultura no Brasil, desde o seu descobrimento, está diretamente, mas de forma empírica, ligada à fertilidade do solo. Os grandes ciclos da cana-de-açúcar e do café alicerçaram-se, no início, na fertilidade natural dos solos das matas e na migração para novas áreas, quando essa fertilidade natural se exauria.

Passaram-se muitas décadas até que, por meio de observações práticas do início, surgiram trabalhos envolvendo a fertilidade do solo e o uso de fertilizantes orgânicos e minerais, com vistas em estabelecer as bases para a prática da adubação que permitisse a exploração contínua das propriedades rurais.

## **3. INTRODUÇÃO À FERTILIDADE DO SOLO**

Considerando os gastos da produção agrícola, os custos com fertilizantes são os que promovem os maiores investimentos do produtor, nas mais diversas culturas; podendo chegar a até 39% dos custos totais na produção de milho (Pavinato, 2005).

Além dos custos para compra dos fertilizantes, outro fator tem contribuído para o uso racional e eficiente dos corretivos e fertilizantes na agropecuária: A EXPLOÇÃO POPULACIONAL. A humanidade levou 1830 anos para atingir o 1º bilhão de habitantes, 100 anos para o 2º bilhão, 30 anos para o 3º bilhão e, no ano de 2020 a população global chegou a 7,8 bilhões. As Nações Unidas estimam que a população humana chegará até 11,2 bilhões em 2100.

Neste sentido, conhecer as condições do solo e sua fertilidade, bem como saber implementar práticas de manejo apropriadas para cada condição solo-planta, é fundamental para o incremento de produtividade na agropecuária, como sustentabilidade econômica, ambiental e social.

## **4. DEFINIÇÕES DO SOLO**

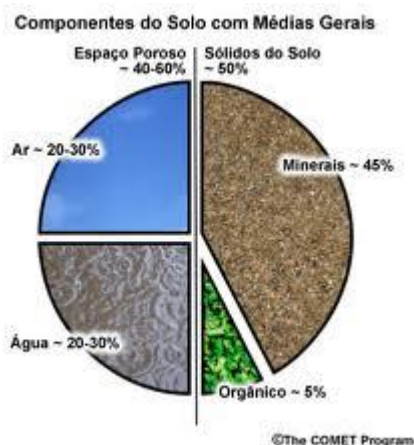
### **Conceito de Solo**

Solo é a parte superficial intemperizada da crosta terrestre, contendo matéria orgânica e organismos vivos, é o meio em que se desenvolvem os vegetais, que dele obtêm, através das raízes, água e nutrientes. É um recurso natural fundamental para a produção agrícola, graças a um conjunto de atributos e propriedades que lhe permitem sustentar as plantas, fornecendo-lhes as condições necessárias para o seu



desenvolvimento. Trata-se de um material poroso (ou seja, com ar), que permite a penetração de raízes e o suprimento de água e nutrientes para as plantas (Raij, 2011).

O conceito solo deve ser entendido como um sistema heterogêneo envolvendo três fases em equilíbrio: sólida, líquida e gasosa, sendo apresentado na Figura 1 o equilíbrio adequado entre eles.



**Figura 1.** Equilíbrio adequado entre as fases do solo (Vitti e Domeniconi, 2010).

#### a) Fase sólida

Os minerais do solo são sólidos que se originam da decomposição das rochas. O outro componente sólido encontrado nos solos é a matéria orgânica. (Lepch, 2011). Assim, o solo pode ser considerado material contendo partículas unitárias de vários tamanhos. A mistura de partículas sólidas de diferentes tamanhos condiciona a existência de um volume de poros no solo.

#### b) Fase gasosa (Vitti e Domeniconi, 2010).

Os espaços que ficam abertos entre os minerais do solo são os poros. A fase gasosa (ar) é fundamental tanto para a respiração de raízes e de micro-organismos como para a mineralização da matéria orgânica. Do ponto de vista de nutrição de plantas, é a fase gasosa que fornece oxigênio ( $O_2$ ) para a respiração das raízes e, posteriormente, para a absorção de nutrientes, além de fornecer nitrogênio ( $N_2$ ) para a fixação biológica.

#### c) Fase líquida (Vitti e Domeniconi, 2010).

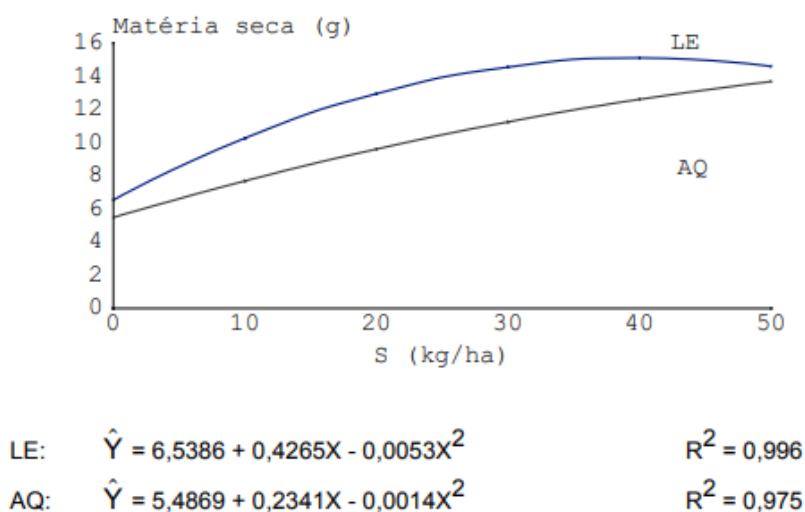
Conhecida como SOLUÇÃO DO SOLO, esta fase é constituída por íons e sais dissolvidos, sendo o meio principal em que ocorre a maioria dos processos químicos e biológicos e o movimento de minerais no solo, representando o fator intensidade no fornecimento de nutrientes para as plantas.



A fertilidade tem sido conceituada como "a capacidade do solo de ceder elementos essenciais às plantas" (Raij, 1981; Braga, 1983). Alguns autores (Malavolta, 1976; Raij, 1981) acrescentam que esta capacidade, para não apresentar limitações, deva ser mantida durante todo o crescimento e desenvolvimento da planta, mesmo que esta deixe de absorver ou utilizar, numa determinada fase de seu ciclo. A produtividade encontra, portanto, na fertilidade do solo, variável determinante de seu dimensionamento, apenas por limitação quando ela é deficiente.

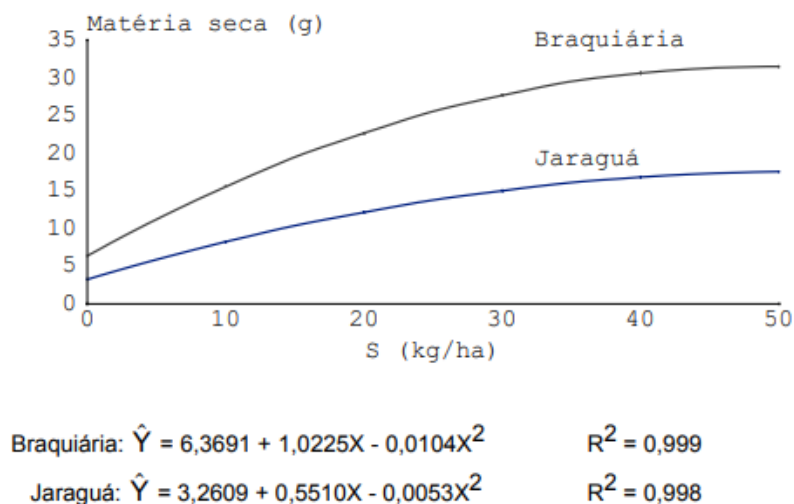
Além das condições físicas e microbiológicas, a fertilidade é um componente do fator solo na equação de produção (Produção = f (solo, clima, planta e manejo)) que envolve além desses fatores, outros como a mineralogia e a química.

O conceito de fertilidade do solo apresenta várias limitações importantes em sua interpretação. Assim, por exemplo, a resposta em produção de uma planta pode ser diferente quando se aplicam doses crescentes de um nutriente em solos diferentes, conforme se observa na Figura 1, onde o solo LE tem maior produtividade refletindo aparentemente, maior capacidade para ceder elementos essenciais.



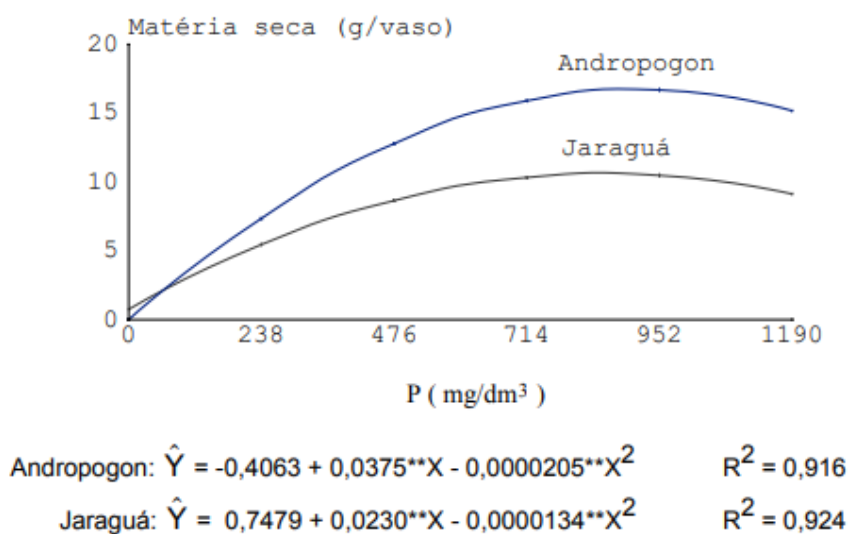
**Figura 1.** Produção da matéria seca de capim jaraguá (*Hyparrhenia rufa*) em resposta à aplicação de cinco doses de enxofre em um Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e uma Areia Quartzosa (AQ). FONTE: Casagrande & Souza, 1982.

Da mesma forma, um solo de definido nível de fertilidade pode apresentar diferente produção com diferentes espécies de plantas (Figura 2), posto que as plantas variam em sua capacidade de absorção e de utilização de um mesmo nutriente (Epstein, 1975; Malavolta, 1976; Sanchez, 1981; Mengel & Kirby, 1982).



**Figura 2.** Produção de matéria seca de duas espécies de gramíneas forrageiras, braquiária (*Brachiaria decumbens*) e jaraguá (*Hyparrhenia rufa*), em resposta à aplicação de cinco doses de enxofre em um Latossolo Vermelho-Escuro. FONTE: Casagrande & Souza, 1982.

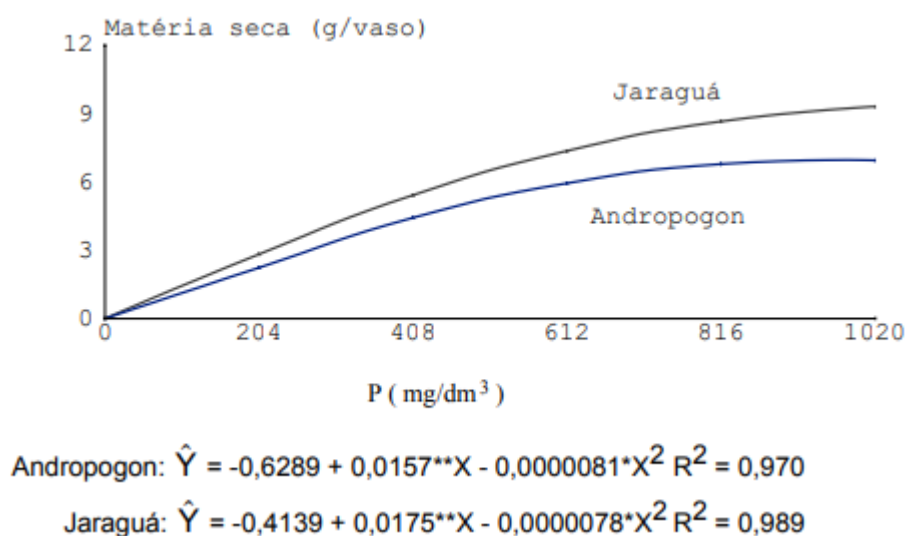
Nesse caso, a braquiária mostra maior capacidade de produção em relação ao jaraguá. Percebe-se, assim, que o conceito de fertilidade deve considerar, também, a espécie a ser cultivada. Com a evolução das pesquisas na área das relações solo-planta, o conceito estático e reducionista de que a fertilidade de um solo é sua capacidade de ceder nutrientes, tem sido revisto. Espécies leguminosas em associação simbiótica com rizóbio podem apresentar maior capacidade de acidificação do solo na região da rizosfera, trazendo reflexos importantes para sua nutrição. Por outro lado, essas respostas poderiam ser diferentes em outro solo, devido à diferentes características entre eles, mostrando que o produto final resulta da interação solo-planta (Figuras 3 e 4).



**Figura 3.** Produção de matéria seca da parte aérea de capim andropogon (*Andropogon gayanus*) e jaraguá (*Hyparrhenia rufa*) em resposta à aplicação de diferentes doses de P em um Latossolo Vermelho-Amarelo de Minas Novas. FONTE: Fonseca, 1986.

Dessa forma, conclui-se, que considerando determinado nutriente o solo pode ser fértil, porém, em relação à outro nutriente não. O mesmo se observa em relação à espécie a ser cultivada, ou ainda para diferentes variedades de uma mesma espécie, fato que é enfatizado em diversas publicações (Russell & Russell, 1973; Epstein, 1975; Malavolta, 1980; Magnani, 1985).

A fertilidade não é característica estática e sim processo altamente dinâmico (Figura 5). Por isto no seu estudo é necessário definir os limites da sua interpretação e o alcance das recomendações. Esse processo é apresentado numa visão hidrodinâmica para explicar a capacidade do solo de ceder nutrientes (disponibilidade). Assim, a disponibilidade seria resultante da interrelação entre os fatores quantidade (Q), intensidade (I) e capacidade tampão (CT), como se explicará posteriormente.



**Figura 4.** Produção de matéria seca da parte aérea de capim andropogon e jaraguá em resposta à aplicação de diferentes doses de P em um Latossolo Vermelho-Amarelo de Sete Lagoas. FONTE: Fonseca, 1986.

## 5. TIPOS DE FERTILIDADE DE SOLO

O solo, o meio principal para o crescimento das plantas, é uma camada de material biologicamente ativo, resultante de transformações complexas que envolvem o intemperismo das rochas e minerais, a ciclagem de nutrientes e a produção e decomposição de biomassa. Uma boa condição de funcionamento do solo é fundamental para garantir a capacidade produtiva dos agroecossistemas.



**Figura 1.** Esquema da ciclagem de nutrientes pelas árvores. SELLE, G.L. Ciclagem De Nutrientes Em Ecossistemas Florestais. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 23, n. 4, p. 29-39, 2007.

A presença de nutrientes é um dos aspectos fundamentais que garantem a boa qualidade dos solos e o seu bom uso e manejo, principalmente no caso dos agroecossistemas. Em ecossistemas nativos, a ciclagem natural de nutrientes é a grande responsável pela manutenção do bom funcionamento do solo e do ecossistema como um todo. Essa ciclagem é fundamental para manter o estoque de nutrientes nos ecossistemas naturais, evitando a perda da fertilidade natural do solo.

Mas o que vem a ser fertilidade natural do solo? O que é solo fértil? Todo solo fértil é necessariamente produtivo? Quais são as causas da baixa fertilidade dos solos?

### 5.1. Conceito de Fertilidade do solo (EMBRAPA, 2007)

Dada a necessidade de se avaliar a fertilidade do solo sob uma visão dinâmica, didaticamente tem-se empregado os termos "Fertilidade Natural", "Fertilidade Potencial" e "Fertilidade Atual", a fim de facilitar o entendimento desse conceito (Buol et al., 1974; Lepsch, 1983).

### 5.2. Fertilidade Natural

A fertilidade natural corresponde à fertilidade do solo quando ainda não sofreu nenhum manejo, ou seja, não foi trabalhado e portanto, não sofreu recente interferência antrópica. É muito usada na avaliação e classificação de solos onde não existe atividade agrária. Dá ideia da capacidade que apresenta um solo ou unidade de classificação para ceder nutrientes; mostra as diferenças entre as unidades (Lepsch, 1983).

Por exemplo, em dois solos com diferentes graus de saturação de bases, o solo distrófico ( $V < 50\%$ ), aparentemente apresentaria menor capacidade de ceder nutrientes, comparado ao eutrófico ( $V \geq 50\%$ ). Na verdade, estes índices pouco representam em termos da real capacidade de ceder nutrientes como P, S, Zn, Mn, já que um solo pode ser distrófico e ter uma CTC superior, com maiores teores de cátions trocáveis, do que um solo eutrófico e, portanto, ter condições de fornecer maior quantidade de nutrientes para as plantas (Tabela 1).

**Tabela 1.** Características químicas de dois solos com diferentes graus de saturação por bases (V).

Solo	SB	T	V
	----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> -----		%
Eutrófico	2	3	66,7
Distrófico	7	15	46,7

cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> = meq/100cm<sup>3</sup>

### 5.3. Fertilidade Potencial

No caso da fertilidade potencial, evidencia-se a existência de algum elemento ou característica que impede o solo de mostrar sua real capacidade de ceder nutrientes. Assim, persistindo essas condições limitantes, a capacidade de ceder elementos estará obstruída, ainda que a fertilidade potencial seja alta.

Entre as características limitantes cita-se o caso de solos ácidos, onde o teor de  $Al^{3+}$  é elevado e a disponibilidade de Ca, Mg e P é baixa ou insuficiente, o que se poderia corrigir com adição de calcário, gesso e fosfato.

Assim, também, os solos salino-sódicos apresentam conteúdos excessivos de  $Na^+$ , o que eleva o pH e ocasiona diminuição da disponibilidade de micronutrientes, principalmente Fe, Mn, Zn e Cu.

A Tabela 2 dá uma ideia desse tipo de fertilidade, pois se observa que a incorporação de gesso,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , aumentou significativamente a produção de soja e de feijão, mesmo em diferentes solos, devido ao fornecimento de Ca e S, efeito fertilizante, e a diminuição de saturação de Al no solo, efeito corretivo.

**Tabela 2.** Produção de grãos de soja e de feijão pela aplicação de gesso agrícola em solos do Estado de São Paulo.

Tipo de solo	Cultura	+ Gesso * - Gesso		Diferença
		----- kg / ha-----		
- Latossolo Roxo	Soja	1.739	1.306	+ 483
- Latossolo Vermelho Amarelo (fase arenosa)	Soja	1.608	1.258	+ 350
- Latossolo Vermelho Escuro (fase arenosa)	Soja	1.616	1.130	+ 486
- Arenito de Botucatu	Soja	1.608	1.258	+ 350
- Podzólico Vermelho	Feijão	2.216	1.961	+ 255
- Podzólico Vermelho Amarelo (var. Lárás)	Feijão	872	550	+ 322
- Latossolo Vermelho Escuro (fase arenosa)	Feijão	1.535	1.105	+ 430

\* Em todos os ensaios foram aplicados 100 kg/ha de gesso.

FONTE: Vitti & Malavolta, 1985.

#### 5.4. Fertilidade Atual

A fertilidade atual é a que apresenta o solo após receber práticas de manejo para satisfazer as necessidades das culturas; dá a ideia da fertilidade de um solo já trabalhado. Deve ser interpretada considerando-se as correções realizadas, por exemplo, calagem, adubação fosfatada, etc. A fertilidade atual é caracterizada pela determinação das formas disponíveis dos nutrientes do solo.

## 6. SOLO FÉRTIL E SOLO PRODUTIVO

Ao longo do tempo, tem-se visto numerosas tentativas de se conceituar a fertilidade do solo. Entretanto, sempre existiu a tendência de se expressar a fertilidade do solo em termos de produtividade, de se utilizar, indiscriminadamente, os termos fertilidade e produtividade (produção por unidade de área) como sinônimos. Com o desenvolvimento de técnicas analíticas, o homem adquiriu maior facilidade e capacidade preditiva da disponibilidade dos nutrientes, fato que lhe permitiu desvincular, parcialmente, a produção da planta da fertilidade do solo como índice para medir a quantidade de nutrientes passíveis de serem absorvidos.

Para esclarecer a diferença entre produtividade e fertilidade, suponha-se que um solo fértil gere altas produções de algodão na época de verão, quando as temperaturas são elevadas, existe suficiente água disponível e os dias são mais longos. Sem dúvida, no inverno sucederá o contrário e os rendimentos cairão substancialmente. Pode-se, então, perguntar qual o motivo dessa queda, pois a fertilidade do solo não foi responsável por este menor rendimento, já que ela permanece adequada. Pode-se concluir que o uso de um solo fértil nem sempre implica na obtenção de alta produtividade, pois se têm casos de solos férteis com impedimentos físicos, que provocam restrições ao transporte e ao desenvolvimento do sistema radicular, em razão de altos teores de argila, de declividade pronunciada, de elevada pedregosidade, de alta compactação etc.

Por outro lado, um solo produtivo deve apresentar fertilidade elevada, ou ter sido, previamente, corrigido.

Solo fértil é aquele que contém os nutrientes em quantidades adequadas e balanceadas para o normal crescimento e desenvolvimento das plantas cultivada e que apresenta ainda boas características físicas e biológicas, está livre de elementos tóxicos e encontra-se em local com fatores climáticos favoráveis.

Solo produtivo é aquele fértil que se encontra localizado numa zona climática capaz de proporcionar suficiente umidade, luz, calor etc., para o bom desenvolvimento das plantas nele cultivadas.

Nota-se, pois, que um solo pode ser fértil sem necessariamente ser produtivo. Nota-se ainda que a fertilidade do solo pode advir de causas naturais ou ser criada pela adição de nutrientes ao solo durante o cultivo.



## 7. CAUSAS DA BAIXA FERTILIDADE NOS SOLOS

Um ponto importante a ser considerado com relação à fertilidade do solo é que muitos solos não são naturalmente férteis e que mesmo aqueles férteis podem, sob manejo inadequado, transformar-se em solos de baixa fertilidade. Diante disso, as causas da baixa fertilidade dos solos podem ser tanto naturais quanto antrópicas (decorrentes do manejo inadequado do solo pelo homem).

Como causas naturais, destacam-se que a gênese do solo e o intemperismo como os principais fatores causadores da baixa fertilidade, particularmente em grande parte das regiões tropicais e subtropicais, onde a remoção de nutrientes do solo é mais acelerada, em razão das condições de altas temperaturas e precipitações pluviais. O fato de o Brasil possuir grandes extensões de terra com problemas de fertilidade relacionadas com alta acidez e toxidez por Al, além de alta capacidade de fixação de P, é em grande parte consequência de sua localização na região tropical.

Além das causas naturais, também aquelas antrópicas (provocadas pelo manejo inadequado do solo) podem ser causadoras da baixa fertilidade dos solos. Uma dessas causas antrópicas é a exaustão de nutrientes do solo provocada pelas retiradas das culturas, maiores que pelas adições via adubação.

Um ponto importante a considerar quando se trata de baixa fertilidade provocada por causas naturais ou até mesmo por exaustão do solo é que podem ser corrigidas facilmente, mediante a reposição de nutrientes via adubação mineral e/ou orgânica, bastando para isso que o agricultor faça uso da análise de solo e de planta para diagnosticar possíveis problemas ligados à fertilidade do seu solo.

Um problema maior ligado às causas não-naturais de queda da fertilidade do solo está relacionado com a erosão. A erosão é a maior causa de degradação de solos no mundo, que tem consequências às vezes permanentes, sobre a fertilidade dos solos. Neste sentido, vale lembrar que a exaustão de nutrientes dos solos é também a causa de erosão, visto que reduz a cobertura vegetal e, com isso, a resistência do solo à erosão. A erosão atinge cerca de 13% da superfície do planeta, afetando cerca de 1,65 bilhão de hectares de terra que se encontram degradados em todo o mundo (Oldeman, 2000). O pior aspecto da queda de fertilidade do solo causada pela erosão é que, ao contrário da exaustão causada pela extração de nutrientes em taxa maior que a reposição ou da baixa fertilidade natural, as quais podem ser recuperadas de maneira simples, a erosão resulta, algumas

vezes, em degradação de difícil recuperação ou até mesmo em dano irreparável à capacidade produtiva do solo.

### **Preservar a matéria orgânica é fundamental**

Um dos piores aspectos da erosão e que afeta grandemente a fertilidade do solo é a perda de matéria orgânica do solo (MOS). Também práticas de manejo inadequadas, como por exemplo, a adoção do cultivo intensivo, em vez de cultivo mínimo ou de plantio direto, podem levar a queda rápida do teor de MOS. Isto é particularmente relevante em solos altamente intemperizados, localizados na região tropical, como é o caso de extensas áreas do Brasil. A MOS pode ser considerada como o indicador mais simples e entre os mais importantes para se medir a qualidade do solo e, conseqüentemente, dos agroecossistemas. Alguns efeitos benéficos que a MOS proporciona são:

- Estabiliza e agrega partículas de solo, reduzindo a erosão;
- Provê uma fonte de C e energia para os microrganismos do solo;
- Melhora o armazenamento e o fluxo de água e ar no solo;
- Armazena e provê nutrientes;
- Mantém o solo menos compactado e mais fácil de trabalhar;
- Retém C da atmosfera e de outras fontes;
- Armazena nutrientes como Ca, Mg e K, pois aumenta a CTC do solo;
- Serve para reduzir possíveis efeitos ambientais negativos decorrentes de uso inadequado de pesticidas ou de disposição de poluentes no solo.

Por fim, é sempre bom lembrar que o solo é o compartimento ambiental primário que suporta a agricultura e, conseqüentemente, a sobrevivência do ser humano na Terra. Manter e aumentar o teor de MOS são condições primordiais para evitar a diminuição da fertilidade do solo e para garantir sua qualidade e seu funcionamento em agroecossistemas produtivos.

## 8. INTRODUÇÃO AOS NUTRIENTES DE PLANTAS (Prado, 2018).

O conhecimento atual de nutrição de plantas é historicamente recente. A primeira inferência sobre alguns aspectos da nutrição mineral de plantas teve início na antiguidade, quando Aristóteles (384-322 a.C.), filósofo e biólogo grego, já fazia afirmações de como as plantas se “alimentavam”. Nessa época, acredita ele, que as plantas eram como animais invertidos e que mantinham a boca no chão. Para ele, os alimentos seriam previamente digeridos pela terra, uma vez que os vegetais não apresentavam excrementos visíveis como fazem os animais.

As investigações a respeito das formas como as plantas se alimentavam prosseguiram e, a cada fase da história da humanidade, era dado ao conhecimento novas descobertas.

No século XIX, o pesquisador suíço Saussure (1804) fez uma importante publicação, estabelecendo que a planta tinha carbono (C) do CO<sub>2</sub> da atmosfera, energia da respiração, hidrogênio (H) e oxigênio (O) eram absorvidos juntos com o C. Neste mesmo século, Just Von Liebig (1803-1873) “pai da química agrícola”, estabelecia que alimentos de todas as plantas verdes são substâncias inorgânicas ou minerais. Dessa forma, segundo a teoria de Liebig, definiu-se a exigência das plantas aos macronutrientes. No século XX, é que se definiu o conceito de micronutrientes, ou seja, aqueles igualmente essenciais, porém exigidos em menores quantidades pelas plantas.

Assim, o estudo de nutrição de plantas estabelece **quais são os elementos essenciais para o ciclo de vida da planta, como são absorvidos, translocados e acumulados, suas funções e os distúrbios que causam quando em quantidades deficientes ou excessivas.**

É pertinente ressaltar que, na ciência agrônoma, os objetivos principais estão voltados para a produção de alimentos, fibras e energia. Para isso, existem vários **fatores de produção** que devem ser levados em consideração para atingir a máxima eficiência dos sistemas de produção agrícolas.

Esses fatores estão arranjados em 3 grandes sistemas como: SOLO, PLANTA e AMBIENTE. A área de nutrição de plantas está centrada no sistema PLANTA, assim como outras, tais como fitopatologia, fisiologia vegetal, melhoramento vegetal, fitotecnia, etc. No SOLO, estão as áreas de fertilidade do solo, fertilizantes e corretivos, adubação, mecanização, propriedades físicas do solo (textura, porosidade, estrutura, agregação, densidade, cor, etc.). E no AMBIENTE, estão as áreas de irrigação e drenagem, climatologia (temperatura, luz, umidade relativa, ventos, precipitação, etc.).

## 9. ELEMENTOS MINERAIS (Malavolta, 2006)

Os elementos minerais podem ser classificados como:

- ESSENCIAIS:** são os nutrientes da planta, sem os quais ela não sobrevive. Em função da quantidade em que são exigidos pelas plantas, são classificados em macronutrientes e micronutrientes.
- ÚTEIS/BENÉFICOS:** não são essenciais, a planta pode viver sem eles; entretanto sua presença é capaz de contribuir para o crescimento, produção ou para a resistência a condições desfavoráveis do meio (clima, pragas, doenças, etc.). Exemplos: sódio (Na), cobalto (Co), selênio (Se).
- TÓXICOS:** quando prejudiciais à planta e não se enquadram nas classes anteriores. Exemplos: arsênio (As), cádmio (Cd), bromo (Br), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), entre outros.

## 10. NUTRIENTES DE PLANTAS (Malavolta, 2006)

### 10.1. Definição e classificação dos nutrientes

Na natureza, existem muitos elementos químicos, conforme ilustra a tabela periódica (Tabela 1), com mais de uma centena de elementos químicos, sujeita a aumento com novas descobertas pela ciência.

**Tabela 1.** Tabela periódica.

GRUPO		1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18																							
PERÍODO	1	1 H hidrogênio 1,008																	2 He hélio 4,0026						
	2	3 Li lítio 6,94	4 Be berílio 9,0122																	5 B boro 10,81	6 C carbono 12,011	7 N nitrogênio 14,007	8 O oxigênio 15,999	9 F flúor 18,998	10 Ne neônio 20,180
	3	11 Na sódio 22,990	12 Mg magnésio 24,305																	13 Al alumínio 26,982	14 Si silício 28,085	15 P fósforo 30,974	16 S enxofre 32,06	17 Cl cloro 35,45	18 Ar argônio 39,948
	4	19 K potássio 39,098	20 Ca cálcio 40,078(4)	21 Sc escândio 44,956	22 Ti titânio 47,867	23 V vanádio 50,942	24 Cr cromio 51,996	25 Mn manganês 54,938	26 Fe ferro 55,845(2)	27 Co cobalto 58,933	28 Ni níquel 58,693	29 Cu cobre 63,546(3)	30 Zn zinco 65,38(2)	31 Ga gálio 69,723	32 Ge germânio 72,630(8)	33 As arsênio 74,922	34 Se selênio 78,971(8)	35 Br bromo 79,904	36 Kr criptônio 83,798(2)						
	5	37 Rb rubídio 85,468	38 Sr estrôncio 87,62	39 Y itríio 88,906	40 Zr zircônio 91,224(2)	41 Nb nióbio 92,906	42 Mo molibdênio 95,95	43 Tc tecnécio [98]	44 Ru rutênio 101,07(2)	45 Rh ródio 102,91	46 Pd paládio 106,42	47 Ag prata 107,87	48 Cd cádmio 112,41	49 In índio 114,82	50 Sn estanho 118,71	51 Sb antimônio 121,76	52 Te telúrio 127,60(3)	53 I iodo 126,90	54 Xe xenônio 131,29						
	6	55 Cs césio 132,91	56 Ba bário 137,33	57-71 lanatânios	72 Hf hafnínio 178,49(2)	73 Ta tântalo 180,95	74 W tungstênio 183,84	75 Re rênio 186,21	76 Os ósio 190,23(3)	77 Ir irídio 192,22	78 Pt platina 195,08	79 Au ouro 196,97	80 Hg mercúrio 200,59	81 Tl tálio 204,38	82 Pb chumbo 207,2	83 Bi bismuto 208,98	84 Po polônio [209]	85 At astato [210]	86 Rn radônio [222]						
	7	87 Fr frâncio [223]	88 Ra rádio [226]	89-103 actínios	104 Rf rutherfordio [261]	105 Db dubnio [268]	106 Sg seabórgio [269]	107 Bh bohrio [278]	108 Hs hásio [269]	109 Mt meitnério [278]	110 Ds darmastádio [281]	111 Rg roentgênio [281]	112 Cn copernício [285]	113 Nh nihônio [286]	114 Fl fleróvio [289]	115 Mc moscóvio [289]	116 Lv livermório [293]	117 Ts tenessio [294]	118 Og oganesônio [294]						
		57 La lantânio 138,91	58 Ce cério 140,12	59 Pr praseodímio 140,91	60 Nd neodímio 144,24	61 Pm promécio [145]	62 Sm samário 150,36(2)	63 Eu europio 151,96	64 Gd gadolínio 157,25(3)	65 Tb térbio 158,93	66 Dy disprósio 162,50	67 Ho hólmio 164,93	68 Er érbio 167,26	69 Tm túlio 168,93	70 Yb itérbio 173,05	71 Lu lutécio 174,97									
		89 Ac actínio [227]	90 Th tório 232,04	91 Pa protactínio 231,04	92 U urânio 238,03	93 Np netúnio [237]	94 Pu plutônio [244]	95 Am américio [243]	96 Cm cúrio [247]	97 Bk berquélio [247]	98 Cf califórnio [251]	99 Es einstênio [252]	100 Fm fêrmio [257]	101 Md mendelévio [258]	102 No nobélio [259]	103 Lr laurêncio [262]									

Não metais    
  Metais alcalinos    
  Semimetais    
  Outros metais    
  Lantanídeos

Gases nobres    
  Metais alcalino-terrosos    
  Halogênios    
  Metais de transição    
  Actínidos

número atômico  
 símbolo químico  
 nome  
 peso atômico  
(ou número de massa do isótopo mais estável)

Entretanto, quando se realiza a análise química do tecido vegetal, é comum encontrar vários elementos químicos, mas nem todos eles são considerados nutrientes de planta. Isso ocorre porque a planta tem habilidade de absorver do solo ou da solução nutritiva, os elementos químicos disponíveis sem grandes restrições, podendo ser um nutriente ou não.

**Definição:** Nutriente é todo elemento químico *essencial* para o desenvolvimento da planta, sem ele a planta não consegue completar seu ciclo.

**Em função da quantidade em que são exigidos pelas plantas, classificam-se como:**

- **Macronutrientes orgânicos:** Carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O).
- **Macronutrientes:** Nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S).
- **Micronutrientes:** Boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni), silício (Si) e zinco (Zn).

Ressalta-se ainda que os *macronutrientes* podem ser ainda divididos em macronutrientes primários e secundários, ***em função do valor comercial e da forma predominante de adição a solo:***

*Macronutrientes primários:* N, P e K: Tem *maior valor comercial* (são mais caros que os macronutrientes secundários) e são aplicados ao solo predominantemente *via adubação*.

*Macronutrientes secundários:* Ca, Mg e S. Tem *menor valor comercial* (são mais baratos que os macronutrientes primários) e são aplicados ao solo predominantemente *via práticas corretivas ou adicionados a fertilizantes primários*.

Os macro e micronutrientes são classificados na proporção em que são exigidos pelas plantas, mas são IGUALMENTE IMPORTANTES para a produção vegetal.

## 10.2. Composição relativa de nutrientes nas plantas

Realizando análise química do material vegetal seco, observa-se o predomínio de carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), compondo aproximadamente 92% da matéria seca da planta (Tabela 2).

**Tabela 2.** Composição relativa dos nutrientes presentes na matéria seca das plantas.

Classificação	Nutriente	Participação (%)	Total
Macronutrientes Orgânicos	C	42	92
	O	44	
	H	6	
Macronutrientes	N	2	7
	P	0,4	
	K	2,5	
	Ca	1,3	
	Mg	0,4	
	S	0,4	
Micronutrientes	B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Si e Zn		1

Ressalta-se que o C provém do ar atmosférico na forma de gás carbônico (CO<sub>2</sub>); o H e o O provêm da água (H<sub>2</sub>O); enquanto os minerais (macro e micronutrientes) vêm do solo, direta ou indiretamente; portanto percebe-se que o nutriente das plantas provém de três sistemas: ar, água e solo. Assim, cerca de 92% da matéria seca das plantas provém dos sistemas ar e água e apenas 8% provém do solo, entretanto, embora esse último seja menor quantitativamente em relação aos demais, é o mais discutido nos estudos de nutrição de plantas e também o mais dispendioso aos sistemas de produção agrícola.

## 10.3. Critérios de essencialidade

### Como saber se um elemento é essencial?

Para serem classificados como nutrientes os elementos minerais devem obedecer aos Critérios de Essencialidade.

Os critérios de essencialidade podem ser diretos ou indiretos:

**DIRETOS:**

Elemento é essencial quando:

**1) Faz parte de um composto.**

- N: aminoácidos e proteínas, bases nitrogenadas e ácidos nucleicos, enzimas e coenzimas, vitaminas, pigmentos.
- P: ligações éster (transferência de energia) e diéster em ácidos nucleicos (DNA e RNA) e em fosfolipídios nas membranas (lecitina).
- Ca: pectato (parede celular), carbonato, oxalato.
- S: constituinte dos aminoácidos cisteína, cistina, metionina e taurina; todas as proteínas; vitaminas (tiamina, biotina); flavonoides.

**2) Ou participa de uma reação sem a qual a vida da planta não é possível.**

- B: funcionamento das membranas (entrada e saída de solutos), formação da parede celular, síntese e transporte de carboidratos, síntese de proteínas, resistência a doenças, fotossíntese.
- Mn: fotólise da água (na fotossíntese) e respiração (enzimas que atuam na glicólise e no ciclo do ácido cítrico são ativadas pelo Mn), controle hormonal, metabolismo do N.
- Mg: ativador de muitas enzimas – quase todas as enzimas fosforilativas (incorporação e transferência do P inorgânico).

**INDIRETOS:**

**1) Na ausência do elemento a planta não completa seu ciclo de vida.**

- N: constituinte de proteínas e clorofila, participa da fotossíntese, respiração, multiplicação e diferenciação celular.
- Ca: componente da parede celular, integridade e funcionamento das membranas, inibição de enzimas pectolítica.
- Mg: constituinte da clorofila, armazenamento e fornecimento de energia, estrutura e funcionamento dos ribossomos.

**2) O elemento não pode ser substituído.**

**3) O elemento deve ter um efeito direto na vida da planta e não exercer apenas o papel de, com sua presença no meio, neutralizar efeitos físicos, químicos ou biológicos desfavoráveis para a planta.**

Todos os elementos essenciais devem estar presentes nas plantas, mas nem todos os elementos presentes são essenciais.



Alguns exemplos das funções dos nutrientes nas plantas:

N: constituinte de aminoácidos, proteínas e clorofila, bases nitrogenadas e ácidos nucleicos, enzimas e coenzimas, vitaminas, participa da fotossíntese, respiração, multiplicação e diferenciação celular.

P: constituinte de ligações ester (transferência de energia) e diester em ácidos nucleicos (DNA e RNA) e em fosfolipídeos nas membranas (lecitina).

K: ativador enzimático de mais de 60 enzimas; não faz parte da estrutura da planta.

Ca: componente da parede celular, integridade e funcionamento das membranas, inibição de enzimas pectolítica.

Mg: ativador de muitas enzimas – quase todas as enzimas fosforilativas (incorporação e transferência do P inorgânico: armazenamento e fornecimento de energia), constituinte da clorofila, estrutura e funcionamento dos ribossomos.

S: constituinte dos aminoácidos cisteína, cistina, metionina e taurina; todas as proteínas; vitaminas (tiamina, biotina); flavanóides.

B: funcionamento das membranas (entrada e saída de solutos), formação da parede celular, síntese e transporte de carboidratos, síntese de proteínas, resistência a doenças, fotossíntese.

Mn: fotólise da água (na fotossíntese) e respiração (enzimas que atuam na glicólise e no ciclo do ácido cítrico são ativadas pelo Mn), controle hormonal, metabolismo do N.

## 11. FORMAS DE ABSORÇÃO DOS NUTRIENTES

### 11.1. Formas absorvidas

Os nutrientes em condições normais de cultivo são absorvidos pelas plantas nas seguintes formas:

macronutriente	absorvido como	micronutriente	absorvido como
nitrogênio	$\text{NO}_3^-$ ; $\text{NH}_4^+$	boro	$\text{H}_3\text{BO}_3$
fósforo	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ; $\text{HPO}_4^{2-}$	cloro	$\text{Cl}^-$
potássio	$\text{K}^+$	cobre	$\text{Cu}^{2+}$
cálcio	$\text{Ca}^{2+}$	ferro	$\text{Fe}^{2+}$
magnésio	$\text{Mg}^{2+}$	manganês	$\text{Mn}^{2+}$
enxofre	$\text{SO}_4^{2-}$	molibdênio	$\text{MoO}_4^{2-}$
		zinco	$\text{Zn}^{2+}$

Fonte: Malavolta (2006); Raij (1983).

### 11.2. Formas expressas

Ao se tratar de fertilizantes, os nutrientes neles contidos são expressos, *por convenção*, nas seguintes formas:

macronutriente	expresso por	micronutriente	expresso por
nitrogênio	% N	boro	% B
fósforo	% $\text{P}_2\text{O}_5$	cloro	% Cl
potássio	% $\text{K}_2\text{O}$	cobre	% Cu
cálcio	% CaO ou % Ca	ferro	% Fe
magnésio	% MgO ou % Mg	manganês	% Mn
enxofre	% S	molibdênio	% Mo
		zinco	% Zn

Cabe salientar que as formas químicas de P e K nos fertilizantes não são  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{K}_2\text{O}$ . Mas estes óxidos são as unidades tradicionais utilizadas para representar os nutrientes nos fertilizantes. Para converter a forma de óxido para a forma elementar utiliza-se os seguintes fatores de conversão:  $\text{P}_2\text{O}_5 \times 0,437 = \text{P}$ ;  $\text{P} \times 2,29 = \text{P}_2\text{O}_5$ ;  $\text{K}_2\text{O} \times 0,830 = \text{K}$ ;  $\text{K} \times 1,20 = \text{K}_2\text{O}$ .

## 12. ABSORÇÃO IÔNICA RADICULAR (Malavolta, 2006)

### Contato do elemento com a raiz (Contato íon-raiz)

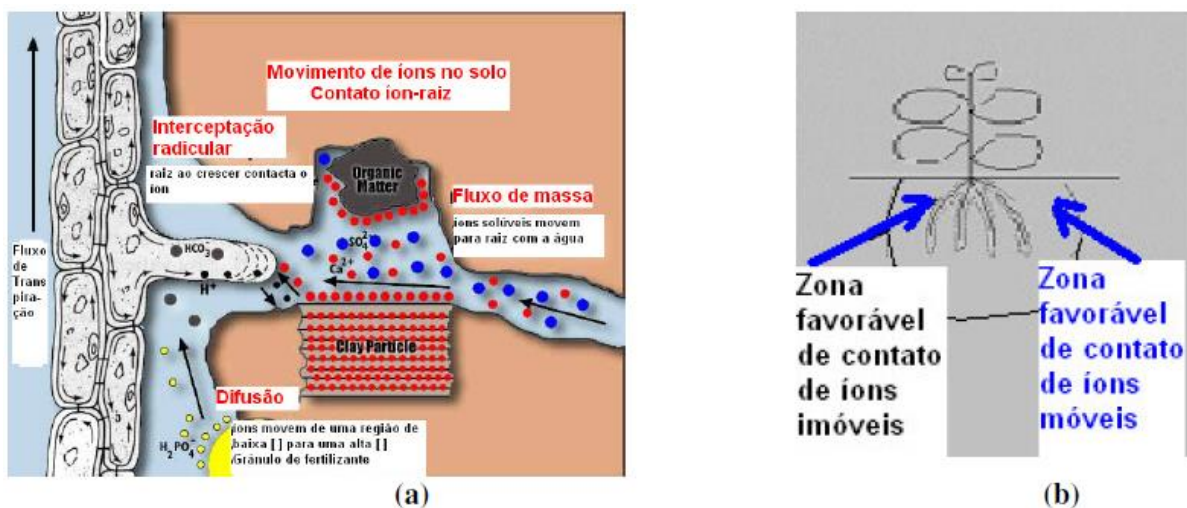
Para estudar os fenômenos da absorção iônica radicular, inicialmente é preciso entender os processos de **contato íon-raiz**.

Antes de ocorrer o processo de absorção do nutriente pelas raízes, é preciso ocorrer o contato íon-raiz, seja pelo movimento do íon na solução do solo da rizosfera, seja pelo próprio crescimento da raiz que encontra com o íon.

Há três processos de contato íon-raiz, a saber:

- 1) *Interceptação radicular*: A raiz ao desenvolver-se, encontra o elemento na solução do solo.
- 2) *Fluxo de massa*: À medida que a planta transpira, o nutriente flui até a raiz juntamente com a água.
- 3) *Difusão*: O nutriente caminha por curtas distâncias na solução, indo de uma região de maior concentração para outra de menor concentração, na superfície da raiz.

Os íons têm diferentes capacidades de caminhamento no solo e/ou na água. Por isso existem 3 maneiras de ocorrer o contato íon-raiz: interceptação radicular, difusão e fluxo de massa, que estão esquematizados na Figura 1.



**Figura 1.** Os elementos entram em contato com a raiz por interceptação radicular, fluxo de massa e difusão (a) e zona favorável da rizosfera para o contato de íons imóveis e móveis (b).

O fluxo de massa é mais importante para o N, Ca, Mg, S e alguns micronutrientes (B, Cu, Fe e Mo), e a difusão é o principal meio de contato do P e K e os micros Mn e Zn do solo com as raízes.

Estes processos são importantes porque tem implicações na determinação da **localização do fertilizante** em relação à semente ou à planta, no sentido de garantir maior contato dos nutrientes com pelos absorventes e conseqüentemente maior eficiência da adubação. Assim, nota-se que o nutriente que se move por *difusão deve ser localizado próximo da raiz* de modo a garantir o maior contato com a raiz, pois, caso contrário, devido ao pequeno movimento, as necessidades da planta poderão não ser atendidas. Enquanto os nutrientes que apresentam maior mobilidade no solo, a exemplo do processo de fluxo de massa, têm a possibilidade de aplicação a distâncias maiores da planta em adubação à lanço ou em cobertura. Portanto, pode-se inferir que os nutrientes que caminham muito pouco no solo (imóveis) e os que tem maior mobilidade no solo (móveis) têm uma restrita e ampla zona favorável para que ocorra o contato íon-raiz, respectivamente com consequência para o local da adubação.

### **13. ACÚMULO E EXTRAÇÃO DE NUTRIENTES PELAS CULTURAS E A FORMAÇÃO DE COLHEITA**

#### **6.1. Exigência nutricional**

De forma geral, as culturas apresentam suas **necessidades nutricionais**, que representam as quantidades de macro e micronutrientes que as plantas retiram do solo, ao longo o cultivo para atender a todas as fases de desenvolvimento, expressando em colheitas adequadas (máximas econômicas).

As culturas em geral e apresentam como regra, **alta exigência em nitrogênio e/ou potássio e em cobre e molibdênio** (Tabela 3);

Entretanto, a ordem de exigências para os demais nutrientes pode sofrer variações entre as culturas e até entre cultivar/híbrido.

**Ordem padrão de EXTRAÇÃO DAS CULTURAS EM GERAL, é a seguinte:**

**Macronutrientes: N > K > Ca > Mg > P -- S**

**Micronutrientes: Cl > Fe > Mn > Zn > B > Cu > Mo**

Mas, considerando as culturas apresentadas na Tabela 2, nota-se que houve alteração para essa ordem de extração total de nutrientes.

Nos macronutrientes, observa-se, em cana-de-açúcar, em capim braquiária e capim-pé-de-galinha, maior exigência para o K em relação ao N.

Para os micronutrientes, nota-se que o Cl é o mais extraído (não citado); entretanto, o mesmo, na alteração da ordem-padrão, ocorre especialmente entre o Zn e o B, sendo, por exemplo, a cana-de-açúcar mais exigente em Zn, e a soja em B.

Nota-se que a extração de micronutrientes (exceto o Cl e o Fe) pelos capins é inferior a  $1 \text{ kg ha}^{-1}$  (Tabela 2), implicando que as doses indicadas para atender à exigência nutricional são iguais ou inferiores a  $2 \text{ kg ha}^{-1}$  (Mo=0,2; Zn e Cu= 2; B=1  $\text{kg ha}^{-1}$ ) (Vilela et al., 2007).

**Tabela 2.** Extração total (parte aérea) e exportação pela colheita (colmos/grãos/forragem) de algumas culturas

Nutriente	Cana-de-açúcar 100 t ha <sup>-1</sup>			Soja 5,6 t ha <sup>-1</sup>			Forrageiras - 13,5 t ha <sup>-1</sup> 6,4 t ha <sup>-1</sup>			
	Colmos	Folhas	Total	Grãos	Restos culturais	Total	Capim- braquiária <sup>1</sup>	Capim- -moa <sup>2</sup>	Capim- pé-de- galinha <sup>3</sup>	
	<b>kg ha<sup>-1</sup></b>									
Macronutriente	N	90	60	<b>150</b>	152	29	<b>181</b>	59,4	130	116,7
	P	10	10	<b>20</b>	11	2	<b>13</b>	14,6	28	12,6
	K	65	90	<b>155</b>	43	34	<b>77</b>	145,9	91	131,9
	Ca	60	40	<b>100</b>	8	43	<b>51</b>	14,0	37	47,5
	Mg	35	17	<b>52</b>	6	20	<b>26</b>	14,5	35	18,6
	S	25	20	<b>45</b>	4	2	<b>6</b>	-	6	16,4
	<b>g ha<sup>-1</sup></b>									
Micronutriente	B	200	100	<b>300</b>	58	131	<b>189</b>	-	-	-
	Cu	180	90	<b>270</b>	34	30	<b>64</b>	21,6	53,5	106,8
	Fe	2500	6400	<b>8900</b>	275	840	<b>1115</b>	4430	5653,0	633,2
	Mn	1200	4500	<b>5700</b>	102	210	<b>312</b>	918	718,0	596,3
	Mo	-	-	-	11	2	<b>13</b>	-	-	-
	Zn	500	220	<b>720</b>	102	43	<b>145</b>	194,5	490,2	231,7

<sup>1</sup> *B. brizantha*, cultivada em solo sob o manejo pelo sistema "barreirão" (Magalhães et al., 2002); <sup>2</sup> *Setaria incana* referente à parte aérea com grãos, aos 69 dias após semeadura (Nakazu et al., 2006); <sup>3</sup> *Eleusine coracana* L. Gaertn., referente à parte aérea, na época do florescimento (Francisco, 2002).

As forrageiras com alta produção de biomassa, como colonião (23 t ha<sup>-1</sup>), apresentam alta extração de nutrientes: K=363; N=288; Ca=149; Mg=99 e P=44 kg ha<sup>-1</sup> (Sanchez, citado por Macedo, 2004).

Com relação à exportação dos nutrientes levados da área agrícola, tem-se significativa quantidade de elementos mobilizados no produto da colheita (colmo ou grão) (Tabela 2).

**Parte significativa do N, S, P, Zn entre outros são mobilizados nos grãos.**

Desse modo, os nutrientes são estocados nas sementes na forma de compostos orgânicos específicos, a exemplo do N e do S, que se acumulam em proteínas específicas de armazenamento (Müntz, 1998).

**P e vários cátions estão na forma de fitatos (Raboy, 2001).**

E cada molécula de fitato contém seis grupos de fosfatos que formam complexos com cátions e, então, a maioria do K, Mg, Mn, Ca, Fe e Zn em sementes é associada ao fitato (Epstein & Bloom, 2006).

Conseqüentemente, para os seres vivos (humanos e animais), sementes são mais nutritivas que o resto da planta. Assim, teores de nutrientes mais elevados nas sementes terão benefícios na qualidade do alimento.

E ainda, em campos de produção de sementes, essa qualidade terá reflexos no crescimento inicial de nova cultura.

Normalmente, a **exigência nutricional de uma determinada forrageira poderá ser afetada pelo sistema de produção adotado** → ou seja, **produção de forragem ou de grãos/sementes.**

Nesse sentido, **os requerimentos de fertilidade do solo para produção de sementes de determinada cultivar são superiores àqueles necessários para essa mesma cultivar quando utilizada como pastagem** (Souza, 2001).

Na prática, as **culturas que exportam com a colheita grande parte dos nutrientes absorvidos, ou aquelas que o produto colhido é toda a parte aérea** (cana-de-açúcar, milho, silagem, pastagem) → deixam muito pouco restos de cultura e, assim, merecem mais atenção em termos de **necessidade de reposição destes nutrientes**, por meios de adubação de manutenção.

Entretanto, os **restos culturais deixados na superfície do solo podem ser reciclados e aproveitados pelas plantas** → atingindo 60% a 70% para o N; 100% para o K (Spain & Salinas, 1985) e 77% para o P (Jones & Woodmanse, 1979).

Diante da reciclagem, espera-se que os nutrientes satisfaçam parte da necessidade da forrageira e, portanto, a exigência nutricional da pastagem na fase de manutenção seria inferior à fase de estabelecimento.

Além disso, a forrageira, na fase de implantação, apresentaria maior produção de biomassa (cerca de 30%), comparada aos demais ciclos de crescimento, pois a ausência de estresse fisiológico da planta, induzido pelo pastejo, elevaria a exigência nutricional no primeiro ciclo de crescimento.



**Tabela 1.** Extração média de nutrientes pela cultura do milho destinado à produção de grãos e silagem, em diferentes níveis de produtividades. (Fonte: Coelho & França 1995).

Tipo de exploração	Produtividade	Nutrientes extraídos <sup>1</sup>				
		N	P	K	Ca	Mg
	t/ha	-----kg/ha -----				
Grãos	3,65	77	9	83	10	10
	5,80	100	19	95	7	17
	7,87	167	33	113	27	25
	9,17	187	34	143	30	28
	10,15	217	42	157	32	33
Silagem (matéria seca)	11,60	115	15	69	35	26
	15,31	181	21	213	41	28
	17,13	230	23	271	52	31
	18,65	231	26	259	58	32

Fonte: Coelho & França (1995).

Experimentos com milho para grãos e silagem, reportados por Coelho & França (1995), da ideia de uma ideia de nutrientes extraídos pela cultura.

Observa-se aumento na exigência dos macronutrientes com o aumento da produtividade → maior exigência da cultura refere-se ao nitrogênio e potássio, seguindo-se do cálcio, fósforo e magnésio.

Com relação aos **micronutrientes**, para uma produtividade de 9 t de grãos/ha, são extraídos: **2.100 g de ferro, 340 g de manganês, 400 g de zinco, 170 g de boro, 110 g de cobre e 9 g de molibdênio.**

#### **Exportação dos nutrientes no milho:**

- P é quase translocado para os grãos (77% a 66%),
- seguindo-se o nitrogênio (70% a 77%),
- S (60%), o todo mineral (47 % a 69%),
- K (26% a 3%) e o Ca (3% a 7%).

Isso implica que a **incorporação dos restos culturais do milho devolva ao solo grande parte dos nutrientes, principalmente potássio e cálcio, contidos na palhada.**

**Quando o milho é cultivado para silagem**, além dos grãos colhidos, a parte vegetativa também é removida, havendo, conseqüentemente, exportação de nutrientes (Tabela 1). **Assim, os problemas de fertilidade do solo se manifestam mais cedo na produção de silagem do que na produção de grãos.**

Neste sentido, os estudos sobre a extração de nutrientes podem identificar nas culturas a exigência nutricional para um determinado nutriente e, assim, é possível atender a sua demanda, incrementando a produção da cultura.

O fornecimento de nutrientes para as plantas é importante, pois, além de participarem das moléculas orgânicas que constituem as plantas, além da sua síntese como catalisadores em reações, com menor gasto de energia, auxilia também na economia de água pelas plantas.

## 6.2. Acúmulo e curva de extração de nutriente

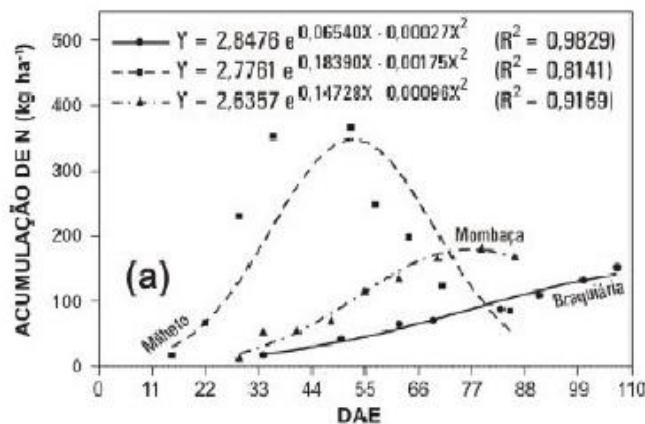
A extração dos nutrientes do solo não ocorre de forma constante ao longo do ciclo de produção da cultura.

Na prática, a curva de extração de nutriente ao longo do tempo de cultivo (marcha de absorção), segue a do crescimento da planta, explicado por uma “curva sigmóide”.

É caracterizada por uma fase inicial de baixo crescimento e absorção de nutrientes e, na fase seguinte, têm-se crescimento rápido (quase linear) da planta com elevada taxa de absorção/acúmulo de nutrientes e, depois, uma estabilização no crescimento/desenvolvimento e também na absorção de nutrientes da planta, até completar o ciclo de produção.

Entretanto, no final desta última fase, o acúmulo de certos nutrientes (K, N) pode estabilizar ou até sofrer diminuição no acúmulo, devido às perdas de folhas senescentes e também perda do nutriente da própria folha (lavagem de K).

Este padrão da marcha de absorção de nutrientes ocorre na maioria das plantas forrageiras



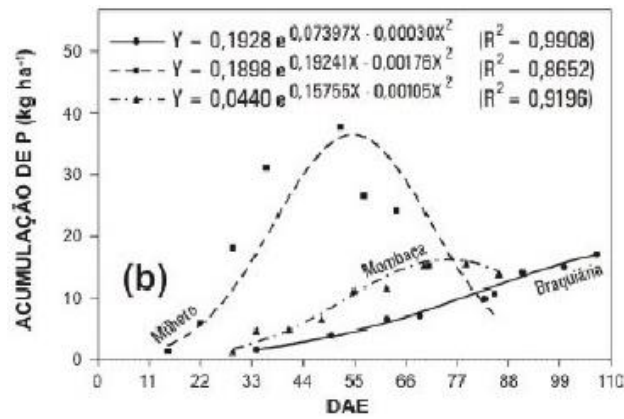


Figura. Acumulação de N (a), de P (b) no limbo foliar do milho, braquiária e mombaça, em função de dias após a emergência da planta (DAE) (Braz et al., 2004).

Na prática, os produtores aplicam parte do nutriente na semente e depois em cobertura, no início do crescimento rápido, e outra quando a forrageira atingir uma cobertura de 60-70% do solo, tendo maior aproveitamento do nutriente (Coelho & Martins, 2004).

Este padrão da marcha de absorção de nutrientes ocorre também em culturas perenes como o café (Figura 2a), e em anuais como o milho (Figura 2b).

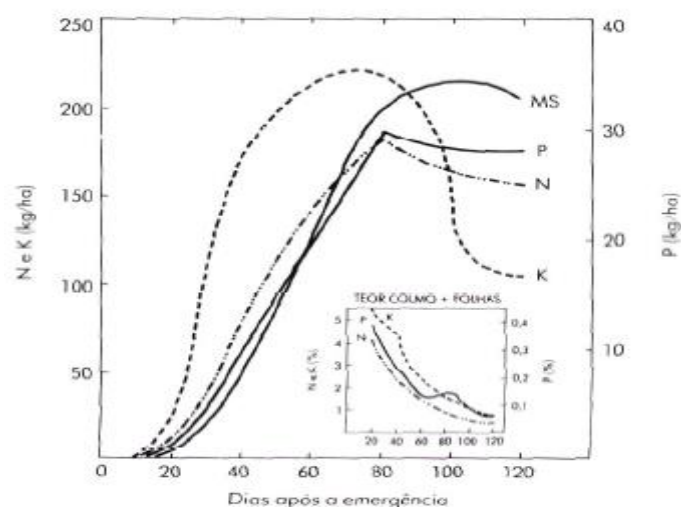
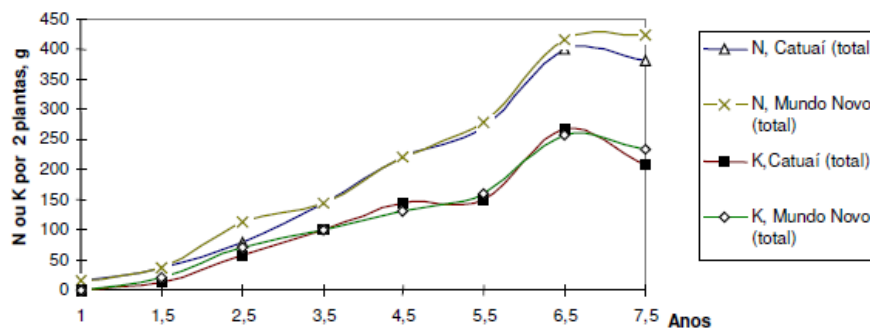
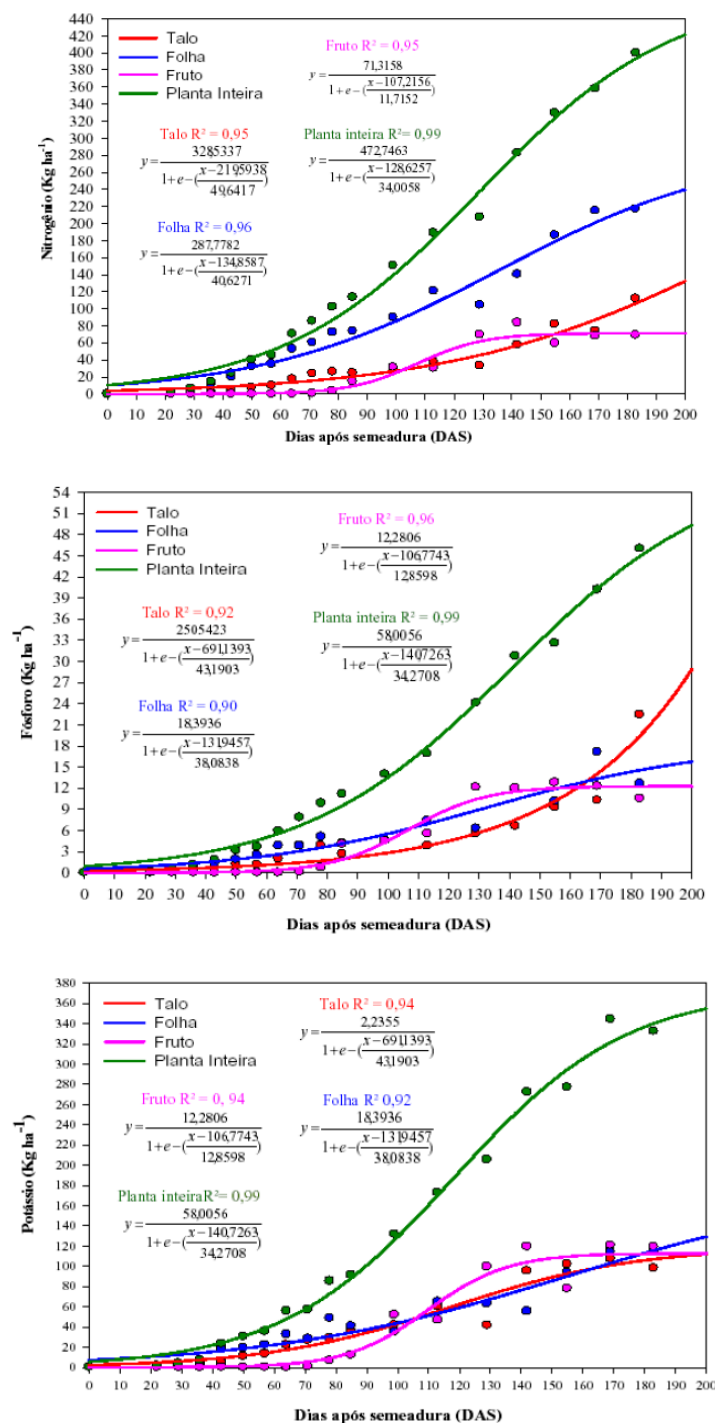


Figura 2. Marcha de absorção do N e do K pelo café (Corrêa et al., 1986) e de N, P e K pela cultura do milho (Bull & Cantarella, 1993).

Para estabelecer o momento da aplicação dos nutrientes é importante conhecer o ciclo efetivo da forrageira, governado pela qualidade da mesma, por exemplo em capim-elefante.



**Figura.** Marcha de absorção de N, P e K na fitomassa (planta inteira, talo, folha e fruto) do feijão-de-porco, no período de outubro de 2005 a abril de 2006. Chapecó- SC, 2006.

Em **soja**, Bataglia & Mascarenhas (1977) verificaram para cada nutriente, um **período de exigência máxima, que corresponderia a velocidade máxima de acúmulo do nutriente pela planta** (Tabela 5).

No **milho**, para a maioria dos nutrientes, a **exigência máxima seria no período de 60-90 dias** → que também corresponde à **máxima acumulação de matéria seca**. Para o **P e o K**, a **exigência máxima** ocorre mais precocemente, **aos 30-60 dias**.

Entretanto, a **aplicação do nutriente deve ocorrer, preferencialmente, até os 30 dias**, que corresponde ao **início do período de exigência máxima** da cultura.

É pertinente salientar que embora a **maioria dos trabalhos da literatura tenha estabelecido a marcha de absorção utilizando dados cronológicos (em dias)**, entretanto o crescimento das plantas é **influenciado pelo clima, a exemplo da radiação solar e da temperatura do ar**, com efeitos distintos na ecofisiologia vegetal.

A **radiação é a fonte da energia que é convertida em biomassa vegetal, e a temperatura está associada à eficiência dos processos metabólicos** envolvidos nessa conversão, alterando o desempenho de várias enzimas (Bonhomme, 2000).

Tabela 5. Velocidade de acúmulo de matéria seca (M.S.) e de absorção de nutrientes em função do estágio de desenvolvimento da soja cv. Santa Rosa (Bataglia & Mascarenhas, 1977)

Nutriente/M.S.	Dias após a sementeira			
	0-30	30-60	60-90	90-120
	kg/ha/dia			
M.S.	12,00	69,00	80,00	42,00
N	0,38	1,69	2,90	2,30
P	0,03	0,17	0,17	0,17
K	0,16	1,21	0,78	0,27
Ca	0,11	0,78	0,86	-
Mg	0,05	0,36	0,39	0,19
S	0,01	0,04	0,09	0,05
	g/ha/dia			
B	0,2	1,0	1,8	0,6
Cl	2,2	17,4	14,9	17,2
Cu	0,2	0,9	1,2	0,02
Fe	5,7	9,0	15,4	2,6
Mn	0,3	3,2	5,7	-
Mo	0,01	0,17	0,24	0,23
Zn	0,4	2,0	2,1	1,2

As forrageiras desenvolvem-se à medida que se acumulam unidades térmicas acima de uma temperatura-base, ao passo que, abaixo dessa temperatura, o crescimento cessa.

Assim, **através do acúmulo térmico, também conhecido como graus-dia, têm-se obtido ótimas correlações com a duração do ciclo da cultura**, ou com os estádios do desenvolvimento fenológico de uma dada cultivar.

Portanto, seria interessante que novos trabalhos que tratam de marcha de absorção seja desenvolvido em função dos graus-dias acumulado durante o ciclo da cultura.

Assim, **estudos de marcha de absorção, tornam-se importantes para detectar em que fase de desenvolvimento a cultura apresenta maior exigência** em um determinado nutriente.

**Essa informação, associada ao potencial de lixiviação de nutrientes nos tipos de solos e sua eficiência, são fatores importantes a considerar no parcelamento de fertilizantes**, principalmente nitrogenados e potássicos.

Logo, pode-se **prever com antecedência o momento da aplicação do nutriente para satisfazer à exigência nutricional no respectivo estágio de desenvolvimento** da cultura.

**A exigência nutricional das culturas é específica para a espécie e até para o cultivar/variedade de uma mesma espécie.**

Tabela 1. Produção de matéria seca (PMS) e extração mineral pela forragem de capim-coastcross, em função de fonte e dose de N (total de cinco períodos/cortes)

dose N kg/ha	PMS	N	P	S	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe
	kg/ha										
	Uréia										
0	2.710	42	7	9	42	10	5	14	50	174	604
125	4.980	81	14	16	87	18	9	29	96	262	960
250	8.520	158	24	29	161	32	18	55	176	311	1.395
500	12.150	277	31	40	286	44	30	95	286	588	1.687
1.000	14.265	404	34	42	386	54	36	125	335	795	2.873
	Nitrato de amônio										
0	2.500	41	7	9	43	11	5	14	53	151	593
125	6.645	118	19	23	135	32	14	45	152	338	1.118
250	10.805	218	28	36	251	52	24	86	283	522	1.399
500	14.160	377	34	42	389	70	36	126	372	586	2.381
1.000	14.180	429	35	40	392	67	37	137	410	1.431	2.206
	Tukey (dms)										
adubos		12,4**	1,4**	2,2**	14,1**	3,0**	1,2**	4,3**	13,0**	91,1**	490,6 ns
doses		23,7**	2,6**	4,2**	26,9**	5,8**	2,3**	8,2**	24,7**	173,1**	932,3**

Extração De Nutrientes Em Pastagem De Capim – Coastcross. Ana Cândida Primavesi, Odo Primavesi, Luciano A. Corrêa, Heitor Cantarella, Aliomar G. Silva.

## 14. LEIS GERAIS DA ADUBAÇÃO

O crescimento de uma planta é função, entre outros fatores, da quantidade de elementos essenciais a ela fornecidos.

A adição de nutrientes ao solo por meio das adubações constitui, quando aplicada científica e racionalmente, prática fundamental para o êxito de qualquer exploração agrícola. A adubação tem como objetivo primordial manter ou aumentar no solo a disponibilidade dos nutrientes e o teor de matéria orgânica, já que a incorporação de elementos restitui aqueles perdidos pelo solo em processos de lixiviação, erosão, complexação, imobilização, fixação, volatilização e, de absorção pelas plantas (Russell & Russell, 1973; Tisdale & Nelson, 1975; Sanchez, 1981; Thomas & Hargrove, 1984).

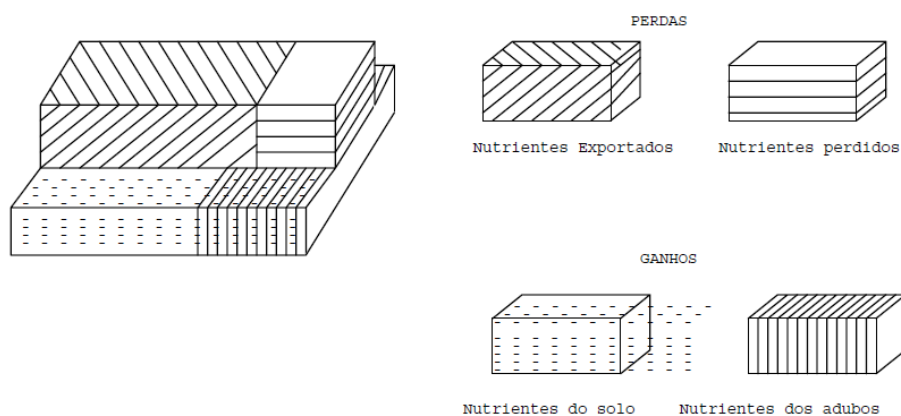
Por isso, o crescimento das plantas depende, entre outros fatores, da quantidade de nutrientes adicionados ao solo.

Os princípios da adubação são provenientes de três leis fundamentais: lei da restituição, lei do mínimo e lei do máximo e de duas derivações da lei do mínimo: lei dos incrementos decrescentes e lei da interação e uma derivada da lei do máximo: lei da qualidade biológica (Voisin, 1973).

### 13.1. Lei da Restituição

A lei da restituição baseia-se na necessidade de restituir ao solo aqueles nutrientes absorvidos pelas plantas e exportados com as colheitas, ou seja, aqueles que não foram reciclados. Essa lei considera o esgotamento dos solos, decorrência de cultivos sucessivos, como uma das origens da redução da produtividade.

Esta lei foi enunciada por Voisin (1973) nos seguintes termos: é indispensável, para manter a fertilidade do solo, fazer a restituição, não só dos nutrientes exportados pelas colheitas, mas, também, daqueles perdidos do solo.



**Figura 1.** Representação gráfica da lei da Restituição.

Dentro de sua concepção, essa lei apresenta várias limitações à sua completa aplicabilidade, posto que:

a) Muitos solos são naturalmente pobres em um ou mais nutrientes, ou apresentam problemas de acidez ou problemas de salinidade. Portanto, o primeiro objetivo seria corrigir as deficiências ou excessos existentes.

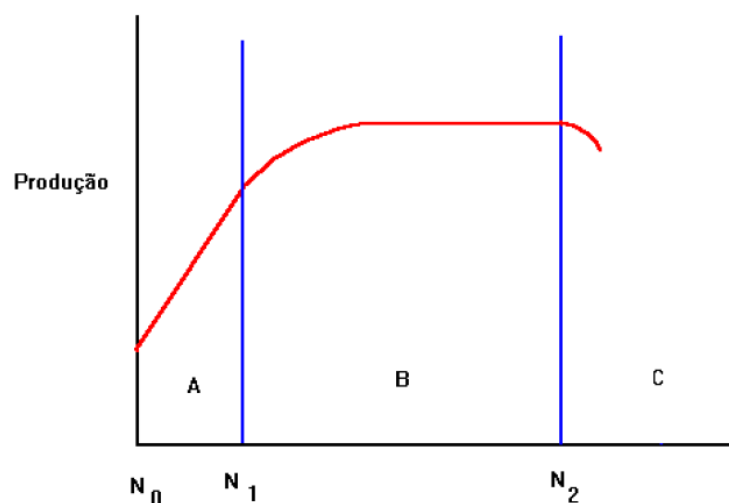
b) Os solos estão submetidos à perda de nutrientes por lixiviação e mesmo por erosão, perdas que muitas vezes são intensificadas pela adição de corretivos e adubos; por exemplo, pelo uso de gesso, que aumenta a mobilidade de cátions em profundidade, no perfil do solo. Em geral, essas perdas são insignificantes para P, mas para N, K, S, Mg e Ca podem ser muito importantes.

### 13.2. Lei do Mínimo

Esta lei, também conhecida como lei de Liebig, foi enunciada em 1843. Relaciona o crescimento vegetal com a quantidade do elemento existente no solo. Segundo ela, o crescimento de uma planta está limitado por aquele nutriente que se encontra em menor proporção no solo, em relação à necessidade das plantas (Russell & Russell, 1973; Tisdale & Nelson, 1975; Rajj, 1981).

Sua aplicabilidade é complexa, porque em condições normais de campo, muitas vezes são vários os nutrientes ou fatores que limitam a produção, além da ação de suas interações.

A Figura 2, representa o aspecto quantitativo da lei que, sendo linear possui validade somente para a região "A" da curva ( $N_0 - N_1$ ), uma vez que doses adicionais geram resposta curvilínea ( $N_1 - N_2$ ).



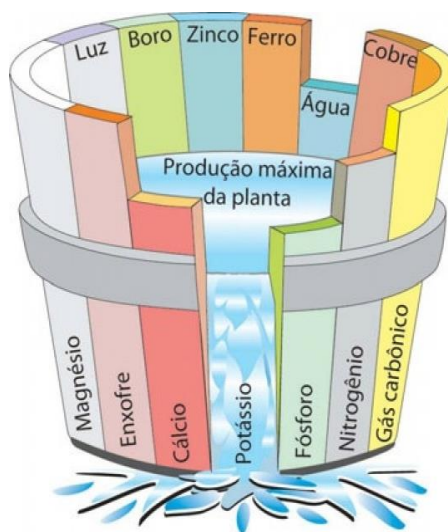
**Figura 2.** Curva de resposta à adição de um nutriente. FONTE: Alvarez V. (1985).



Segundo a interpretação quantitativa da lei de Liebig, o crescimento é continuamente linear até um ponto onde se alcança um "plateau" devido à insuficiência de outro fator que se torna limitante do crescimento, e que, se suprido, provoca outro surto de crescimento, até que novo nutriente (ou fator) se torne limitante e, assim, sucessivamente (Figura 3).

Também pode considerar-se que a produtividade aumenta linearmente, com o nutriente adicionado, até que um "plateau" seja atingido, em consequência de ter outro nutriente passando a ser mais limitante ao crescimento e, portanto, o único limitante da produtividade (Figura 4). Em outras palavras, uma adubação com N e K não traria aumento algum na colheita se o elemento mais limitante no solo fosse o P. Somente após aplicação do P é que haveria possibilidade de resposta ao N ou a K.

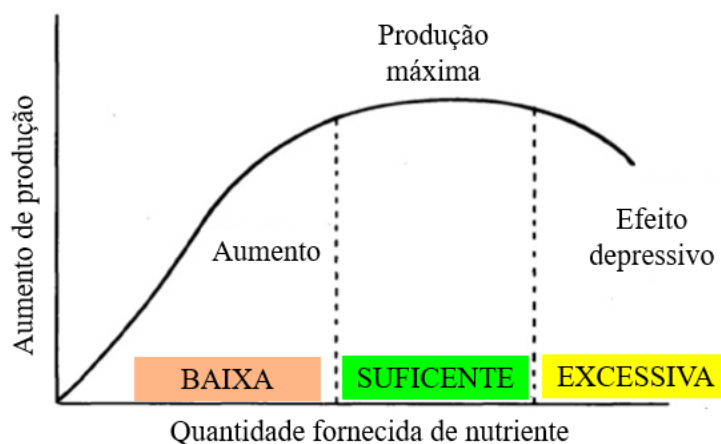
Essa situação é bem representada por uma corrente que suporta certo peso. Se há um elo mais fraco, a resistência da corrente não será alterada pelo reforço de outros elos. Para que a corrente suporte um peso maior deve-se, portanto, reforçar, inicialmente, aquele elo mais fraco. Essa lei tem sido também ilustrada, tradicionalmente, por um barril, tendo algumas tábuas com diferentes alturas, sendo a tábua com a menor altura a que representa o elemento mais limitante. O aumento dessa tábua permitirá aumentar o nível de líquido no barril até o limite de outra tábua, agora a de menor altura.



Ao se verificar as limitações do aspecto quantitativo da lei do mínimo (resposta linear à aplicação de um nutriente) na representação de uma função de resposta biológica (obviamente curvilínea), sua utilização atual tem sido por meio de constatação apenas qualitativa. Dessa maneira, a presença de um nutriente em nível insuficiente no solo é responsável pela redução da eficiência e não pela eliminação completa dos efeitos de outros nutrientes.

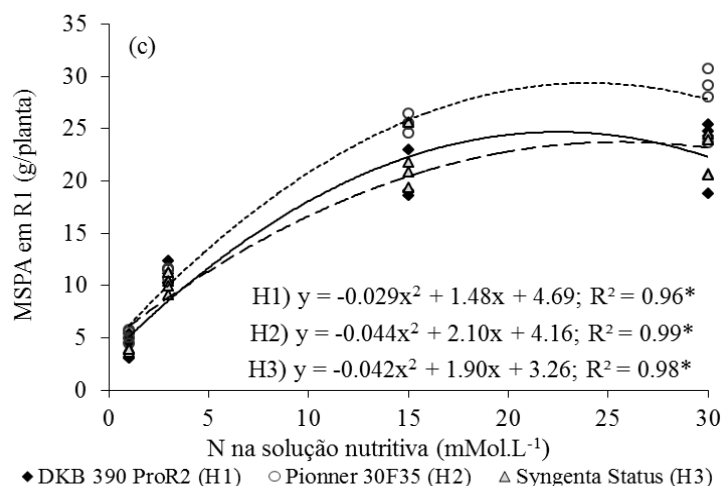
### Lei do mínimo x curvas de resposta

É a relação entre a produção da planta e o nutriente aplicado.



Curva de resposta esquemática, mostrando a aplicação de um nutriente sobre a produção de uma cultura.

Exemplos:



Massa seca da parte aérea (MSPA) de 3 (três) híbridos de milho (H1, H2 e H3) no estágio R1 em função de doses de nitrogênio na solução nutritiva. \*Significativo a 5%. DEVECHIO e LUZ, 2015.

### 13.3. Lei de Mitscherlich, como Derivação da Lei do Mínimo

Em 1909, o alemão E. A. Mitscherlich, tomando como base uma série de ensaios, desenvolveu uma equação relacionando o crescimento de plantas ao suprimento de nutrientes (Tisdale & Nelson, 1975).

A resposta linear à aplicação de um nutriente, em nível insuficiente no solo, proposta por Liebig, é complementada pela resposta curvilínea correspondente à adição daquele nutriente, em doses adicionais, até atingir o ótimo crescimento das plantas. O modelo linear de Liebig foi substituído ou complementado por Mitscherlich, que

observou que, com o aumento progressivo das doses do nutriente deficiente no solo, a produtividade aumentava rapidamente no início (tendendo a uma resposta linear) e estes aumentos tornavam-se cada vez menores até atingir um "plateau", quando não havia mais respostas a novas adições (Malavolta, 1976; Braga, 1983; Pimentel Gomes, 1985). Este tipo de resposta é expressa, matematicamente, pela diferencial:

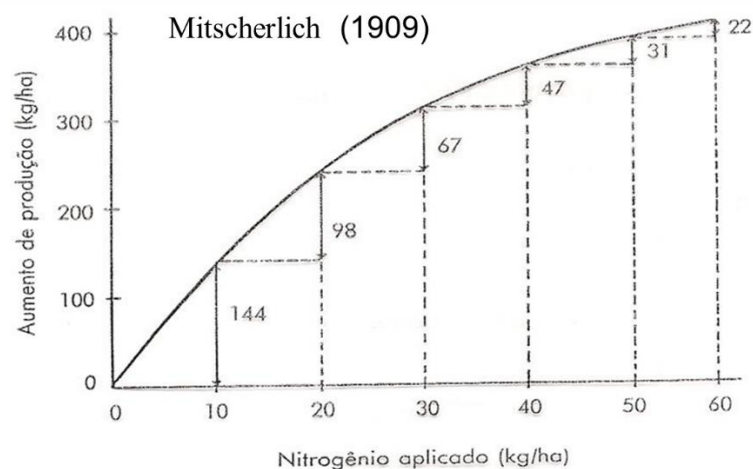
$$\delta Y = c(A - Y) \delta X \quad \text{Eq. 2}$$

onde, Y é a produção obtida; A é a produção máxima esperada em resposta ao nutriente X colocado à disposição da planta (ou outro fator de produção, como luz, temperatura etc.); e c é uma constante de proporcionalidade ou "coeficiente de eficácia".

Esta lei mostra que o aumento de produção é proporcional ao crescimento das doses do nutriente e, ainda, à diferença entre a produção máxima possível e a produção obtida. Assim, quanto mais próximo a produção obtida estiver da produção máxima possível, menos interessante se torna a aplicação de adubo. Se a produção obtida tende para a produção máxima possível, o aumento de produção tende para zero. Esta equação representa a primeira aproximação da função de Mitscherlich (Alvarez V., 1985). As denominações de "lei dos excedentes menos que proporcionais" ou "lei dos incrementos decrescentes" traduzem bem a forma de equação que se representa na Figura 4.

Esta lei se expressa da seguinte maneira:

“Ao se adicionar doses crescentes de um nutriente, o maior **incremento** em produção é obtido com a primeira dose. Com aplicações sucessivas, os incrementos são cada vez menores”.

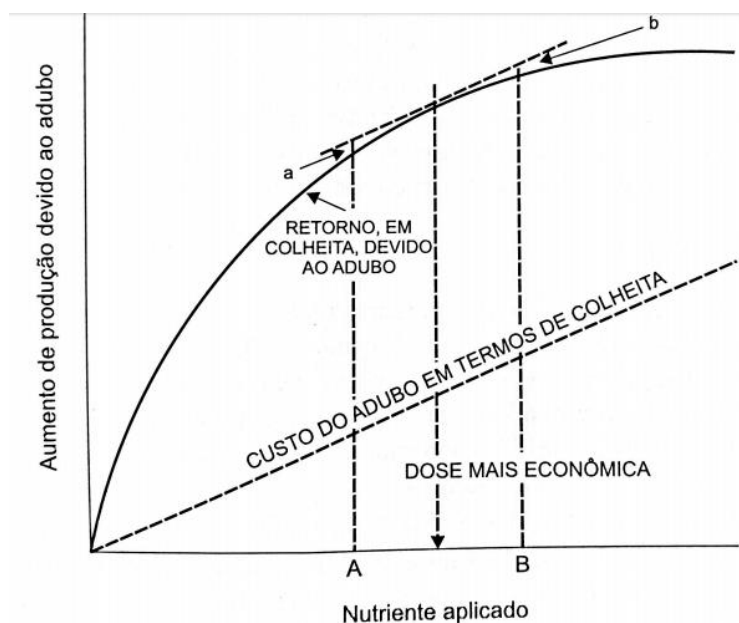


**Figura 4.** Curva de resposta de algodão a nitrogênio (média de 15 ensaios) mostrando os incrementos de produção para aumentos sucessivos de 10 kg/ha na dose aplicada do nutriente. Fonte: RAIJ, 2011 (construído a partir de dados de Silva, 1971).

### 13.4. Dose mais econômica de fertilizantes

A chamada lei dos incrementos decrescentes serve como base para a conceituação da dose mais econômica. De acordo com esse princípio, a cada quantidade de nutriente adicionada sucessivamente corresponde um incremento de produção cada vez menor. Quando o valor do incremento em produção é exatamente igual ao custo do nutriente, atinge-se um nível de aplicação acima do qual a adubação dá prejuízo e que corresponde à chamada **dose mais econômica**.

Na Figura 5, encontra-se ilustrada a determinação da dose mais econômica, correspondente à quantidade aplicada do nutriente que proporciona a máxima distância entre a linha de custo do insumo e a curva de resposta. Os dados podem ser colocados no gráfico na forma de seu valor monetário ou com valores em termos de produto. A última representação é preferível, por permitir a análise em termos que não se desatualizam tanto com o passar dos anos e com a alteração de preços em regimes inflacionários.



**Figura 5.** Representação gráfica do conceito de dose mais econômica. Note-se que uma variação de 25% para mais ou para menos teria pequena consequência prática, com prejuízos representados por *a* ou *b*. Fonte: Raij, 2011 (Adaptado de Tisdale, Nelson e Beaton, 1985).

É importante salientar que a determinação da dose mais econômica, em geral, não representa muita sensibilidade. Variações moderadas, para mais ou para menos, têm pouco efeito prático. Isso pode ser verificado na Figura 4, que mostra o que aconteceria para aplicações de nutrientes em doses representadas por A ou B, em vez do ótimo econômico. Os prejuízos decorrentes disso, indicados por *a* ou *b*, seriam insignificantes.

Dessa maneira, as recomendações práticas de adubação têm em geral uma margem de segurança decorrente do próprio princípio de cálculo das doses mais adequadas de fertilizantes a aplicar. Isso é bastante útil considerando as incertezas relacionadas a produções futuras e ao valor que o produto alcançará no mercado, variáveis não conhecidas na ocasião em que a adubação é planejada.

A dose mais econômica é usada no preparo de tabelas de adubação, conforme estudaremos futuramente.

### **13.5. Lei da Interação**

Considerando o aspecto qualitativo da lei do mínimo, tem-se uma variante moderna que é a lei da interação, que se expressa assim (Voisin, 1973):

Cada fator de produção é tanto mais eficaz quando os outros estão mais perto do seu ótimo.

Também é conhecida como Porcentagem de Suficiência ou Produção Relativa.

Esta lei exprime que é ilusório estudar, isoladamente, um fator de produção, e que, pelo contrário, cada fator deve ser considerado como parte de um conjunto, dentro do qual ele está relacionado com os outros por efeitos recíprocos, pois eles se interagem.

Muitos experimentos têm mostrado que existem interações entre os elementos e outros fatores de produção, isto é, um ou mais elementos exercem influência mútua ou recíproca. Essa influência pode ser positiva, sinérgica, como no caso de N x P; N x K; P x Ca; P x S; P x H<sub>2</sub>O do solo; N x Irrigação; N x Controle de más ervas; ou, ao contrário ser negativa, antagônica, onde um fator ou elemento limita a ação de outro elemento: Al x P; Al x Ca; P x Zn; P x Fe; P x Cu; Ca x Zn; S x Mo; Ca x B; Zn x Fe. Estes efeitos dependem, em alto grau, das concentrações existentes, como por exemplo, das modificações provocadas na disponibilidade dos nutrientes pela aplicação de uma supercalagem (Fassbender, 1978; Malavolta, 1980; Dibb & Thompson, 1985).

A Produção Relativa é expressa pela seguinte equação:

$$\text{Produção relativa} = \frac{\text{Produção sem o nutriente} \times 100}{\text{Produção com o nutriente}}$$

Exercício 1: De acordo com as informações da tabela abaixo, calcule qual seria a produção relativa e a produção esperada do milho, sem aplicação de nitrogênio (N) e sem fósforo (P).

<b>Tratamento</b>	<b>Produtividade</b>
	t/ha
<b>Sem calcário</b>	8,6
<b>Sem N</b>	7,3
<b>Sem P</b>	6,6
<b>Sem K</b>	7,2
<b>Com NPK + calagem</b>	10,7
<b>C.V (%)</b>	4,45

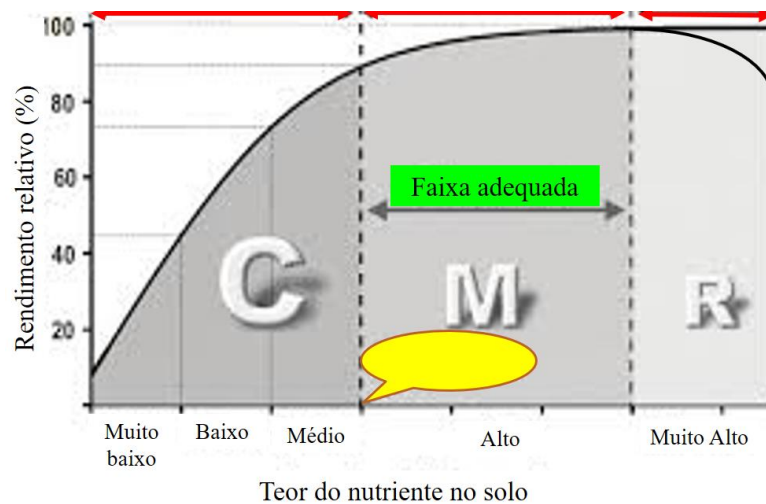
### 13.6. Lei do Máximo

Normalmente, ao se aumentar ainda mais as doses de um nutriente (acima de N<sub>2</sub>, na Figura 7), observa-se que os rendimentos começam a diminuir (região C dessa Figura). Nesse caso, é o excesso que limita ou prejudica a produção.

Foi considerando este aspecto, especialmente em relação à produção, que André Voisin (1973) enunciou a lei do máximo, nos seguintes termos:

O excesso de um nutriente no solo reduz a eficácia de outros e, por conseguinte, pode diminuir o rendimento das colheitas.

Respostas negativas por meio do decréscimo da produtividade são observadas em resultados experimentais. Tal tipo de resposta não foi previsto pela lei de Mitscherlich, na sua primeira aproximação.



Exercício 2: De acordo com o gráfico abaixo, determine a produção máxima de massa seca dos 3 híbridos de milho (H1, H2 e H3) em função de doses de nitrogênio na solução nutritiva.

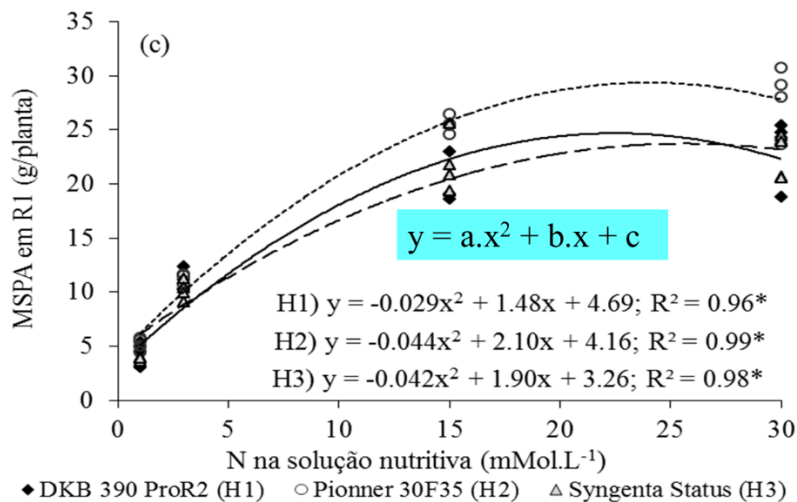


Figura 1. Massa seca da parte aérea (MSPA) de 3 híbridos de milho (H1, H2 e H3) submetidos a níveis de N na solução nutritiva, no estágio R1 de desenvolvimento.

### **13.7. Lei da Qualidade Biológica**

Considerando os efeitos negativos na alimentação animal pela produção de pastagem com teores desequilibrados de nutrientes, pela adição exagerada de certos corretivos ou adubos, Voisin (1973) propôs a "lei da qualidade biológica", a qual é tida por ele como importante, mas de difícil aplicação prática. Ele considera que a aplicação de adubos deva ter como primeiro objetivo a melhoria da qualidade do produto, a qual tem prioridade sobre a produtividade. A deficiência ou excesso de certos nutrientes nas plantas pode causar problemas à saúde daqueles que a consomem. Evidentemente, tem merecido pouca atenção por parte dos pesquisadores que têm relegado a qualidade do produto a um nível de menor ou de mínima importância. Dentre os efeitos do uso de fertilizantes sobre a qualidade das plantas utilizadas pelo homem ou pelos animais, destaca-se o exemplo da cultura do fumo, na qual a adubação potássica não deve ser realizada com cloreto de potássio, pois, o  $\text{Cl}^-$  prejudica a combustão do fumo.

A tetania dos pastos ou tétano hipomagnésico é uma condição comum associada à deficiência de magnésio nos ruminantes e está relacionada aos baixos níveis de magnésio no sangue. A tetania das pastagens ocorre mais frequentemente em vacas que pastam forragens bastante novas. O manejo intensivo das pastagens e o excesso de aplicação de fertilizantes com N e K, estimulam o crescimento vegetativo das plantas forrageiras, e caso o solo não tenha recebido práticas corretivas adequadamente, especialmente a calagem, as plantas podem apresentar deficiência de Mg.

O consumo exclusivo de pastagem deficiente em Mg, pode levar à deficiência de Mg no animal, conhecida como tetania dos pastos ou tétano hipomagnésico.



## 15. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO SOLO

As partículas minerais (colóides) podem apresentar cargas elétricas. De um modo geral, são **eletronegativas**, mas podem conter cargas + (positivas). Essas cargas elétricas permitem a atração de íons de cargas opostas, retendo-os no solo, sendo importante papel para o crescimento das plantas.

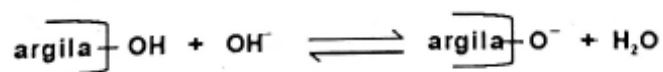
Em **regiões temperadas**, há predominância das cargas – em relação às +, Graças à predominância de argilas silitadas mais ativas. Em **regiões tropicais**, os solos são mais intemperizados e por isso o predomínio de cargas negativas tende a diminuir. Pois os solos são mais intemperizados e predomínio de argilas 1:1; óxidos de Fe e Al.

### 14.1. Origem das cargas negativas do solo:

- Dissociação dos grupos OH nas arestas das argilas silicatadas;
- Substituição isomórfica;
- Matéria orgânica

#### a) Dissociação dos grupos OH nas arestas das argilas silicatadas

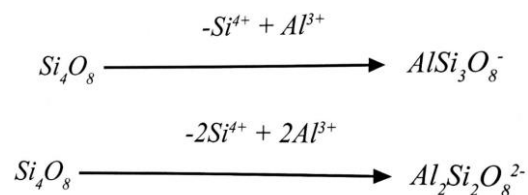
O grupo OH nas terminações das faces quebradas dos minerais das argilas silicatadas, podem dissorciar, **gerando uma carga negativa**:



São *cargas dependentes do pH* e predomina em argila 1:1 (caulinita).

#### b) Substituição isomórfica

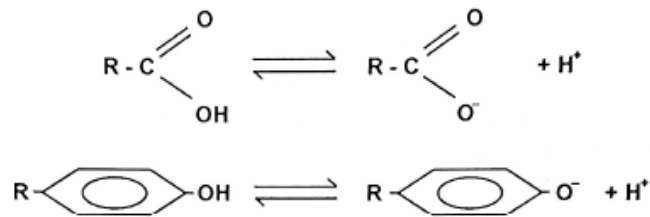
Na gênese de argilas 2:1, alguns átomos de  $\text{Si}^{4+}$  dos minerais podem ser substituídos por  $\text{Al}^{3+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{2+}$ . Essa substituição do Si por cátions de menor valência, resulta em sobra de carga negativa.



As cargas geradas independentes do pH do solo. Portanto essas cargas são denominadas *cargas permanentes ou constantes*.

### c) Cargas geradas pela Matéria Orgânica

Na matéria orgânica do solo, as cargas negativas originam-se pela dissociação de grupos carboxílicos e fenólicos pela decomposição da M.O:

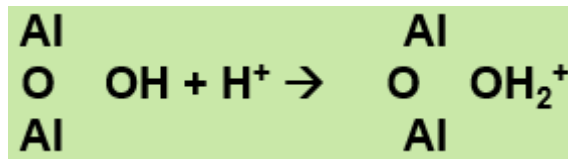


São dependentes com o pH do solo. Portanto, uma forma de aumentar o número de cargas negativas do solo é pela **adição de matéria orgânica**.

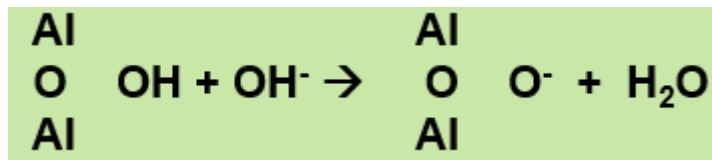
### 14.2. Origem das cargas positivas do solo

Ocorrem nos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, principalmente. Ocorre mais intensamente em condições de solos mais **ácidos**.

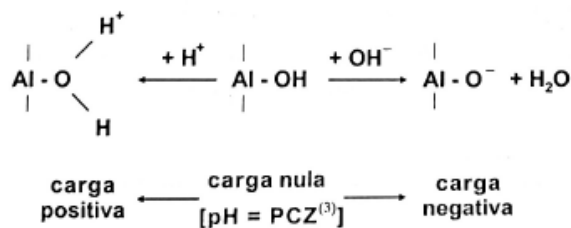
- Em solos tropicais, muito ácidos, os OH dos minerais atraem  $\text{H}^+$  da solução, fenômeno da “protonação”, gerando cargas positivas:



- Ao contrário, se houver um aumento do pH (aumenta o  $\text{OH}^-$ ), o H do OH dos minerais é atraído pelo  $\text{OH}^-$  da solução, gerando cargas negativas:



Desta forma, os óxidos e hidróxidos de Fe e Al  $\rightarrow$  podem originar cargas + ou - ou permanecer com carga neutra  $\rightarrow$  dependendo o pH.

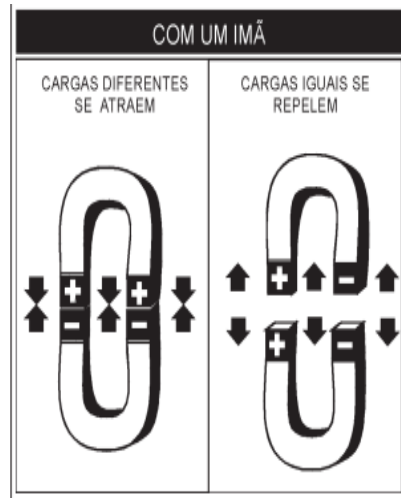


O pH em que o solo apresenta carga nula é o **ponto de carga zero (PCZ)**.

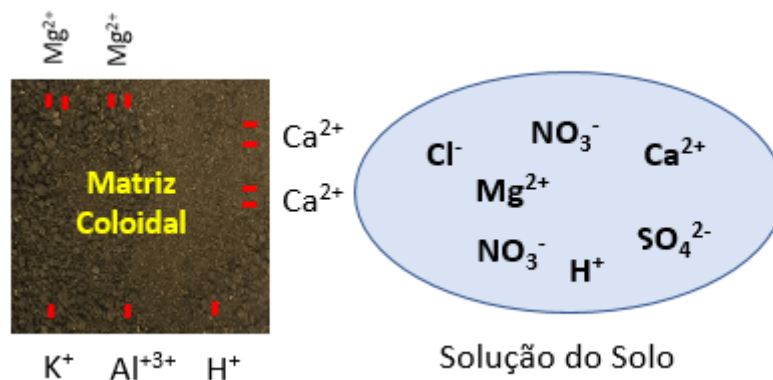
Seu valor é variável em função da natureza dos materiais.

### 14.3. Adsorção e troca iônica

Cargas negativas ATRAEM cargas positivas.



O termo **Adsorção** é a atração dos elementos da solução pelas cargas dos colóides do solo; e é reversiva.



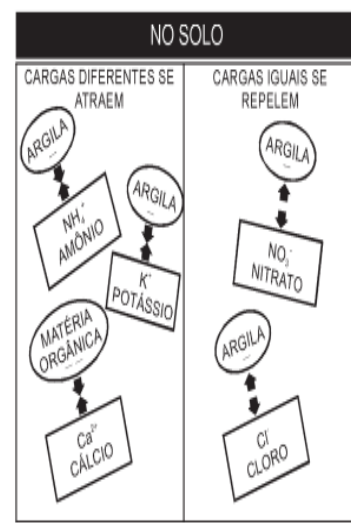
Os cátions adsorvidos nas cargas negativas, estão em equilíbrio com a solução. Ou seja, **eles podem ser trocados** com os cátions da solução. Portanto, essas cargas negativas do solo são chamadas: CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIONS (CTC).

A CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIONS é a Quantidade total de cátions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) que um solo é capaz de reter por unidade de volume, e seus resultados são expressos na análise de solo como  $\text{mmol}\cdot\text{dm}^{-3}$  ou  $\text{cmol}\cdot\text{dm}^{-3}$ .

Solo é um reservatório de cátions. Quanto maior a CTC do solo maior a reserva de nutrientes.

A capacidade de troca iônica dos solos representa, portanto, a graduação da capacidade de liberação de vários nutrientes, favorecendo a manutenção da fertilidade por um prolongado período e reduzindo ou evitando a ocorrência de efeitos tóxicos da

aplicação de fertilizantes. Se a maior parte da CTC do solo está ocupada por cátions essenciais como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ , pode-se dizer que esse é um solo bom para a nutrição das plantas. Por outro lado, se grande parte da CTC está ocupada por cátions potencialmente tóxicos como  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  este será um solo pobre. Um valor baixo de CTC indica que o solo tem pequena capacidade para reter cátions em forma trocável; nesse caso, não se devem fazer as adubações e as calagens em grandes quantidades de uma só vez, mas sim de forma parcelada para que se evitem maiores perdas por lixiviação.



A seguir, são apresentados atributos pertinentes à CTC, alguns determinados em laboratório e outros calculados.

a) Determinações de laboratório

$$\text{Soma de bases (SB)} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ (**)$$

\*\*O sódio (Na) pode ser ignorado em regiões úmidas e distantes do mar.

Acidez total a pH 7,0:  $\text{H} + \text{Al}^{3+}$

Acidez trocável:  $\text{Al}^{3+}$

b) Atributos calculados

$$\text{Capacidade de troca de cátions (CTC)} = \text{SB} + (\text{H} + \text{Al}^{3+})$$

$$\text{Capacidade de troca de cátions efetiva (CTC}_{\text{ef}}) = \text{SB} + \text{Al}^{3+}$$

A CTC é ocupada por uma parte ácida ( $\text{H} + \text{Al}^{3+}$ ) e uma parte básica (SB). Um conceito muito prático é o de saturação por bases (V%), utilizado na calagem, calculado por:

$$V = \left( \frac{100 * \text{SB}}{\text{CTC}} \right)$$

*A saturação por bases (V%) expressa a parte da CTC ocupada por Ca, Mg e K.* Ela é um excelente indicativo das condições gerais de fertilidade do solo, sendo utilizada até como complemento na nomenclatura dos solos. Os solos podem ser divididos de acordo com a saturação por bases: solos eutróficos (férteis) =  $V\% \geq 50\%$ ; solos distróficos (pouco férteis) =  $V\% < 50\%$ . Um índice V% baixo significa que há pequenas quantidades de cátions, como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ , saturando as cargas negativas dos coloides e que a maioria delas está sendo neutralizada por  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ .

A maioria das culturas apresenta boa produtividade quando no solo é obtido valor V% entre 50 e 80% e valor de pH entre 6,0 e 6,5.

Outro conceito útil é o da saturação por alumínio (m%), *que é a porcentagem da CTC ocupada por Al*. E é diretamente usada para diagnosticar se há necessidade de aplicação de gesso em solo. O cálculo

$$m = \left( \frac{100 * Al}{SB + Al} \right)$$

**Leitura complementar:**

Capítulo de livro SBCS, Viçosa, 2007. Fertilidade do solo, 1017p. (eds. NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F; CANTARUTTI, R.B; NEVES, J.C.L.)

## 16. AMOSTRAGEM E AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO

Análise da fertilidade do solo tem como finalidade fornecer as bases para estabelecer as quantidades a aplicar de calcário e fertilizantes.

### OBJETIVO:

Elevar ou manter os teores de nutrientes no solo em faixas adequadas; Manter retorno econômico o mais favorável possível.

Para isso existem tabelas com recomendação de correção e adubação, estabelecidas com base na análise do solo.

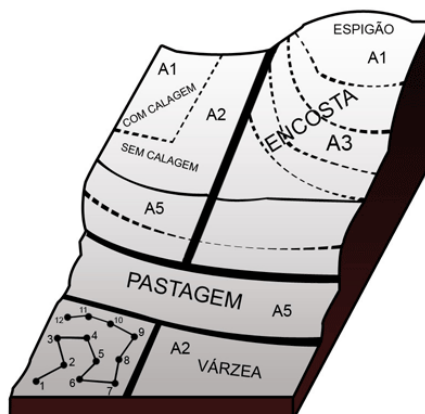
### 15.1. Etapas de um programa integrado de recomendação da adubação

- 1) Amostragem de solo e/ou de plantas;
- 2) Seleção de métodos de análise (laboratório);
- 3) Interpretação dos resultados;
- 4) Recomendação de práticas corretivas e de adubação;
- 5) Avaliação econômica.

### 15.2. Escolha das glebas para amostragem

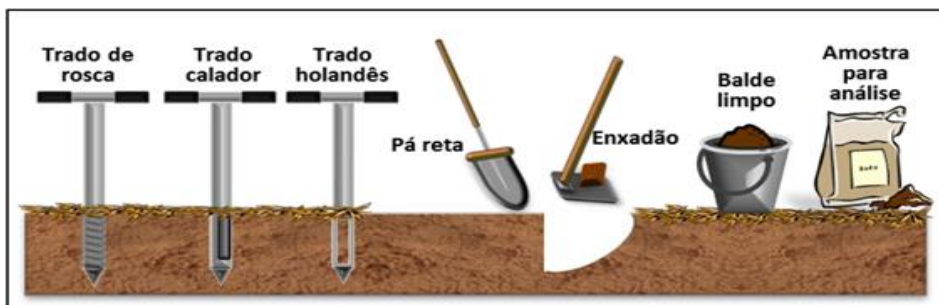
Divida a propriedade em glebas homogêneas, de até 20 hectares, e amostre cada área isoladamente. As glebas da propriedade deverão ser divididas de acordo com:

- posição topográfica (morro, meia encosta, baixada),
- cor do solo
- textura (solos argilosos, arenosos),
- cultura ou vegetação anterior (soja, café, milho, etc.),
- histórico (adubação e calagem anteriores),
- idade e variedade das culturas perenes,
- áreas com uma mesma cultura, mas com produtividades muito diferentes.



### 15.3. Ferramenta para amostragem

A coleta das amostras pode ser feita com sonda, trado ou enxadão. A sonda e o trado permitem a retirada da mesma quantidade de terra de todos os pontos amostrados.

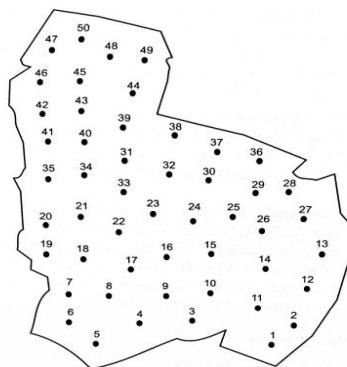


### 15.4. Procedimentos para amostragem de solo

- 1) Percorrer a área escolhida em zigue-zague e coletar de 10 a 20 sub-amostras (0 – 20 cm) por gleba homogênea.
- 2) Em cada ponto, retire os detritos e restos de cultura.
- 3) Evite pontos próximos a cupins, formigueiros, casas, estradas, currais, depósitos de adubo, calcário ou manchas de solo.
- 4) Raspe a terra da lateral do trado, aproveitando apenas a porção central.
- 5) Transfira a terra do trado, dos 20 pontos, para um balde.
- 6) Retire pedras, gravetos ou outros resíduos e misture bem.
- 7) Essa mistura de sub-amostras é chamada de amostra composta.
- 8) Retire cerca de 500g de terra do balde e transfira para saco de plástico limpo.
- 9) Identificar a amostra de solo com o nome do proprietário, propriedade, gleba, profundidade e data → envie ao laboratório.

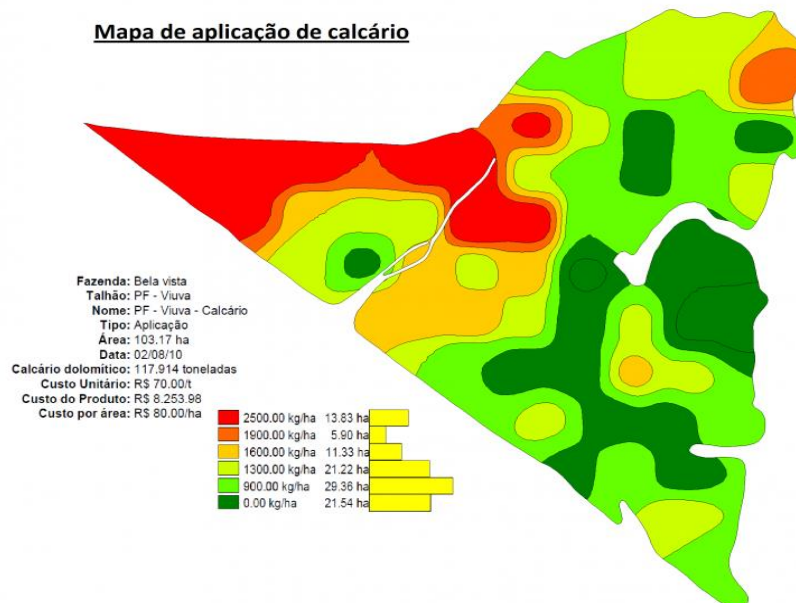
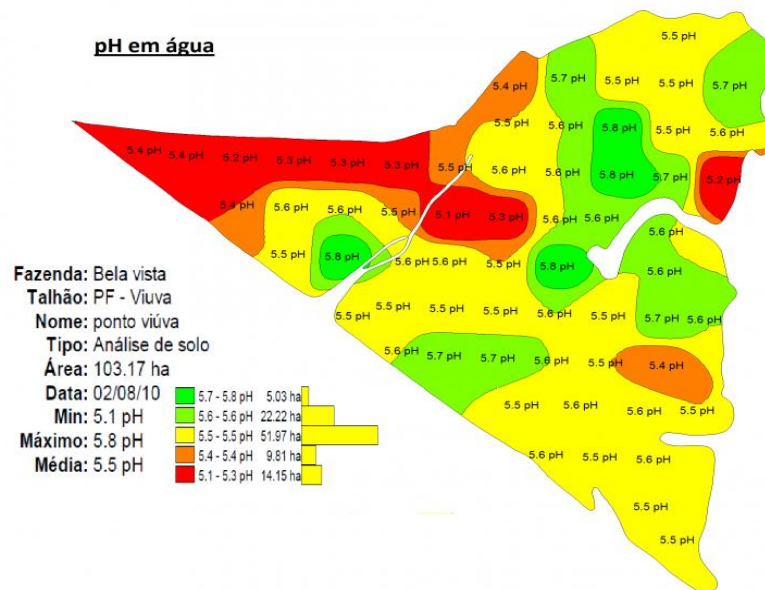
### 15.5. Amostragem de solo em agricultura de precisão

- 1) Definir o posicionamento geográfico dos pontos a serem amostrados, utilizando o GPS.
- 2) Definir o número de subamostras e o espaçamento entre elas.



Esquema 5.2. Pontos de amostragem em sistema de agricultura de precisão.  
Fonte: Original do autor.

Neste caso, não são consideradas áreas homogêneas, pois a amostragem é que fornecerá elementos para avaliar a variabilidade da fertilidade do solo da propriedade.



## 15.6. Época de amostragem

A amostragem de solo pode ser efetuada em qualquer época do ano. Considerando 4-5 dias para envio da amostra e 2-3 semanas para o processamento no laboratório, recomenda-se amostrar o solo 2 a 3 meses antes da época prevista para a prática corretiva e/ou adubação.



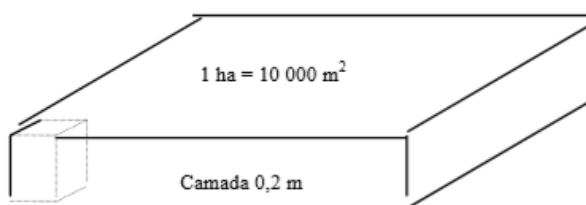
### 15.7. Profundidade de amostragem

Amostras devem ser retiradas a uma profundidade de 0 a 20 cm (“camada arável”) para determinação da necessidade de calagem e adubação.

Para verificar a necessidade de gessagem, coletar amostras da camada de 20-40 cm de profundidade.

### 15.8. Amostragem de solos: Etapa Crítica

A área de 1 hectare de terra representa um volume de 2 milhões de  $\text{dm}^3$  ou litros de terra. A quantidade de amostra necessária no laboratório não ultrapassa 20 gramas!



$$1 \text{ ha} \Rightarrow 10\,000 \text{ m}^2 \times 0,2 \text{ m}$$

$$1 \text{ ha} \Rightarrow 2\,000 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ ha} \Rightarrow 2\,000\,000 \text{ dm}^3$$

### 15.9. Prática de Amostragem de solo

## 17. INTERPRETAÇÃO DA ANÁLISE DE SOLO (Raij, 2011)

A análise de solo fornece as bases para estabelecer as quantidades a aplicar de calcário e nutrientes, objetivando não somente elevar ou manter os teores dos elementos no solo em faixas adequadas, mas também obter retorno econômico o mais favorável possível. Para isso, existem tabelas, preparadas por regiões, com recomendações de correção e adubação estabelecidas com base na análise de solo.

Em São Paulo, a partir de 1996, a publicação que estabeleceu critérios de interpretação da análise de solo foi a segunda edição do Boletim Técnico nº 100 do IAC (Raij et al., 1996).

### a) Nitrogênio

Para o estado de São Paulo, não se tem um critério confiável de recomendação de adubação nitrogenada com base na análise do solo. Neste caso, para diversas culturas anuais, atualmente é adotado o critério de classes de resposta esperada, associado às recomendações por produtividade esperada, deve resultar em adubações mais coerentes com as necessidades em cada situação. Para algumas culturas perenes, as classes de resposta esperada ao nitrogênio são estabelecidas com base em resultados de teores foliares deste elemento.

### b) Fósforo e potássio

Os resultados de P e K são divididos em cinco classes de teores e o fósforo para quatro grupos de culturas, com exigências crescentes de disponibilidade de P (Quadro 1).

Quadro 1. Limites de interpretação de teores de potássio e de fósforo em solos.

Teor	K <sup>+</sup> trocável mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	P-resina			
		Florestais	Perenes	Anuais	Hortaliças
		-----mg/dm <sup>3</sup> -----			
Muito baixo	0,0-0,7	0-2	0-5	0-6	0-10
Baixo	0,8-1,5	3-5	6-12	7-15	10-25
Médio	1,6-3,0	6-10	13-30	16-40	25-60
Alto	3,1-6,0	10-20	31-60	41-80	61-120
Muito alto	>6,0	>20	>60	>80	>120

**Fonte:** Raij e outros (1996, p.9).

### c) Acidez

Os parâmetros relacionados à acidez dos solos, pH e saturação por bases, apresentam estreita relação entre si para amostras retiradas da camada arável (Quadro 2).

Quadro 2. Limites de interpretação das determinações relacionadas com a acidez da camada arável do solo.

Acidez	pH em CaCl <sub>2</sub>	Saturação por bases	V
			%
Muito alta	Até 4,3	Muito baixa	0-25
Alta	4,4-5,0	Baixa	26-50
Média	5,1-5,5	Média	51-70
Baixa	5,6-6,0	Alta	71-90
Muito baixa	>6,0	Muito alta	>90

Fonte: Raij e outros (1996, p.9).

d) Micronutrientes

Na interpretação da análise química de micronutrientes no solo é importante utilizar extratores adequados para avaliar sua disponibilidade (Quadro 4).

Quadro 4. Limites de interpretação dos teores de micronutrientes em solos.

Teor	B (água quente)	Cu (DTPA)	Fe (DTPA)	Mn (DTPA)	Zn (DTPA)
	----- mg/dm <sup>3</sup> -----				
Baixo	0-0,20	0-0,2	0-4	0-1,4	0-0,5
Médio	0,21-0,60	0,3-0,8	5-12	1,5-5,0	0,6-1,2
Alto	>0,6	>0,8	>12	>5,0	>1,2

Fonte: Raij e outros (1996, p.9).

## 18. REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES (Raij, 2011)

A representação de análises de solos, folhas corretivos e fertilizantes é feita seguindo o Sistema Internacional de Unidades (SI).

### 17.1. Unidades de representação dos resultados de análises

#### a) Solos

Os resultados de cátions trocáveis, tais como cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ), alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ), acidez total a pH 7,0, SB, CTC e enxofre ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) são expressos em  $\text{mmol}/\text{dm}^3$ .

Os resultados de fósforo e dos micronutrientes zinco, ferro, manganês, cobre e boro são apresentados em  $\text{mg}/\text{dm}^3$ .

Os resultados de matéria orgânica são apresentados em  $\text{g}/\text{dm}^3$ .

A saturação por bases (V) e a saturação por alumínio (m) são expressas em porcentagem (%).

#### b) Folhas

A porcentagem (%) deixou de ser usada para macronutrientes, sendo substituída por  $\text{g}/\text{kg}$ .

### 17.2. Conversão de unidades

As representações antigas podem ser convertidas nas atuais levando-se em conta as relações apresentadas na tabela abaixo.

Tabela. Fatores de conversão de unidades antigas em unidade dos SI.

Unidade antiga (A)	Unidade nova (N) ( $N = A \times F$ )	Fator de conversão (F)
%	$\text{g}/\text{kg}$ , $\text{g}/\text{dm}^3$ , $\text{g}/\text{L}$	10
ppm	$\text{mg}/\text{kg}$ , $\text{mg}/\text{dm}^3$ , $\text{mg}/\text{L}$	1
$\text{meq}/100 \text{ cm}^3$	$\text{mmol}_e/\text{dm}^3$	10
$\text{meq}/100\text{g}$	$\text{mmol}_e/\text{kg}$	10
$\text{meq}/\text{L}$	$\text{mmol}_e/\text{L}$	1
$\text{P}_2\text{O}_5$	P	0,437
$\text{K}_2\text{O}$	K	0,830
CaO	Ca	0,715
MgO	Mg	0,602
$\text{mmho}/\text{cm}$	$\text{dS}/\text{m}$	1

**Fonte:** Baseada em Cantarella, Andrade e Raij (2001).

## 19. ACIDEZ DO SOLO

### 18.1. Introdução

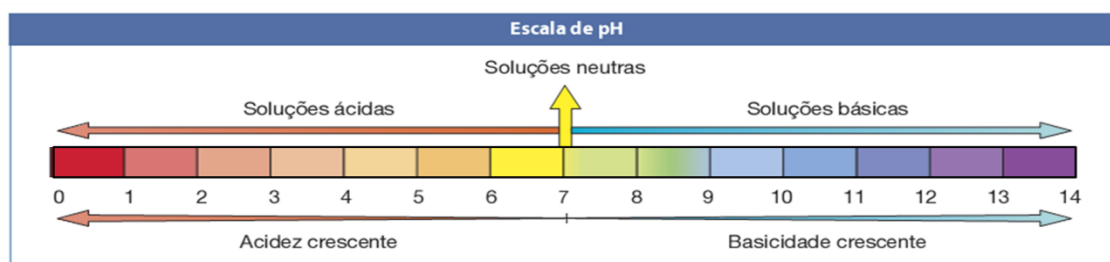
A maioria dos solos brasileiros possuem limitações a produção de grande parte das culturas, em decorrência dos efeitos da acidez, associada à presença de Al e Mn em concentrações tóxicas e de baixos teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg).

O excesso de acidez do solo provoca alterações na fertilidade, restringindo o crescimento radicular, limitando a absorção de água e nutrientes e como consequência: menor produtividade (principalmente em regiões onde ocorrem veranicos).

O avanço da agricultura do Brasil em áreas de cerrado, com propriedades físicas adequadas e topografia favorável à mecanização, mas propriedades químicas inadequadas, com elevada acidez, altos teores de Al e deficiência de nutrientes (P, Ca e Mg). A correção da fertilidade desses solos garante grande potencial produtivo para agricultura tecnificada com altas produtividades.

### 18.2. Reação do solo

A reação do solo (ou pH do solo) mede o grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade da solução solo.



Solos com pH maior que 7,0 sofrem reação alcalina.

Solos com pH menor que 7,0 sofrem reação ácida (maioria dos solos brasileiros).

A grande maioria dos solos brasileiros apresenta reação ácida, o que confere características desfavoráveis ao desenvolvimento das plantas, daí sua infertilidade.

Dentre essas características, pode-se destacar:

- a) Pobreza em bases trocáveis (K, Ca e Mg)
- b) Baixa capacidade de troca catiônica (CTC)
- c) Teores elevados de alumínio trocável (tóxico)
- d) Níveis tóxicos de manganês (Mn)
- e) Alta capacidade de fixação de fósforo (P)
- f) Baixa disponibilidade de molibdênio (Mo)
- g) Condições inadequadas à vida microbiana, etc.

A primeira pergunta que se faz quando se trata desse assunto é: POR QUE OS SOLOS SÃO ÁCIDOS? A resposta é simples: o solo pode ser ácido por motivos de “causas naturais” ou por “ações antrópicas”.

*Causas naturais:* Gênese do solo e o intemperismo. Regiões tropicais (altas temperaturas e precipitações) tem alto grau de intemperismo, e com isso a remoção de nutrientes do solo é mais acelerada.

*Ações antrópicas:* Manejo inadequado do solo pelo homem. Exaustão de nutrientes do solo provocada pelas retiradas das culturas, maiores que pelas adições via adubação.

Em ambas as causas, a acidificação do solo pode ser corrigida mediante o uso de práticas corretivas de solo.

### **18.3. Origem da acidez do solo (Raij, 2011).**

O solo será tanto mais ácido quanto menor a parte da CTC ocupada por cátions básicos (Ca, Mg, K e Na). A acidificação do solo consiste na remoção desses cátions do complexo de troca catiônica, substituindo-os por alumínio trocável e hidrogênio.

Há solos naturalmente ácidos devido à pobreza em bases do material de origem ou a processos pedogenéticos que favoreceram as perdas de elementos básicos, como potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg).

Outros não são naturalmente ácidos. Em qualquer um dos casos, o processo de acidificação se inicia ou se acentua devido à remoção de cátions trocáveis da superfície dos colóides.

O processo de acidificação do solo pode ser simplesmente representado por uma remoção de cátions básicos do solo e entrada de cátions “ácidos” ( $H^+$  e/ou  $Al^{3+}$ ) nos seus lugares.

A acidificação em termos de fase sólida significa que as cargas negativas do solo vão sendo saturadas por  $H^+$  e/ou  $Al^{3+}$ , o que leva a diminuição do índice de saturação por bases (V%). Na verdade, o que se tem é a remoção de bases da solução do solo e a adição de íons  $H^+$  nesta mesma solução.

### 18.3.1. Remoção de bases da solução do solo

A remoção de bases da solução do solo se dá principalmente por meio de:

a) Lixiviação

Com as chuvas ou irrigação forte, desde que ocorram condições para percolação de água, ocorrerá arrastamento de cátions na água que percola (portanto ocorrerá lixiviação). Esses cátions saem acompanhando ou “arrastados” por ânions da solução.

b) Remoção pelas colheitas

Ao absorverem os cátions nutrientes, as plantas estão concorrendo para a acidificação do solo. No caso de culturas, a quantidade removida vai depender do tipo de cultivo, do sistema de colheita, do tempo que a cultura fica no campo, etc.

### 18.3.2. Aumento de $H^+$ na solução

O balanço entre a liberação de prótons ( $H^+$ ) e sua assimilação por diferentes processos deixa a quantidade de íons  $H^+$  livres, os quais acidificam o solo.

Uma das reações químicas mais importantes relacionadas à liberação de prótons ( $H^+$ ) no solo é a nitrificação do íon amônio ( $NH_4^+$ ): proveniente da mineralização da matéria orgânica ou da adição de fertilizantes nitrogenados amoniacais, consiste na oxidação do N-  $NH_4^+$  realizada por bactérias, conforme a reação resumida:



A acidificação do solo ocorrerá com maior intensidade quanto maior for a entrada de  $H^+$  nas posições de troca dos cátions removidos dos coloides do solo. (Vitti e Domeniconi, 2010).

Com a remoção de bases e ganho de  $H^+$ , irá ocorrer a acidificação do solo. A intensidade da acidez desenvolvida dependerá do seguinte:

a) Da quantidade de água que percola

Quanto mais intensa e maior a percolação, maior a lixiviação e, com isso, maior acidez desenvolvida. A quantidade de água que percola depende não só do volume de água que chega ao solo, como também da sua permeabilidade.

b) Da quantidade de resíduos orgânicos deixados ou levados ao solo

Quanto maior a quantidade de resíduos orgânicos deixados ou levados ao solo, maior a acidificação, pois na decomposição desses resíduos ocorre a formação de ácidos orgânicos e inorgânicos e, conseqüentemente, quanto maior a quantidade de material que for decomposto, maior a produção de ácidos.

c) Do tipo e quantidade de fertilizante mineral empregado

Existem fertilizantes que quando colocados no solo provocam acidificação. Usando como exemplo o sulfato de amônio, verifica-se que esse fertilizante, através da nitrificação, promove o aparecimento de  $H^+$ , conforme a reação simplificada a seguir:



Também com a lixiviação de  $NO_3^-$  e remoção das bases, ocorre acidificação.

Na maioria dos sistemas agrícolas produtivos, a adubação nitrogenada tem sido apontada como a principal responsável pelo processo de acidificação do solo, porque os fertilizantes contendo amônio ou ureia, que gera amônio por sua hidrólise, são frequentemente usados como fontes de nitrogênio. Considerando o sistema de produção, a magnitude da acidificação gerada pela adubação nitrogenada pode variar de acordo com o grau de acidez e o tipo de solo, a fonte e a dose de nitrogênio empregadas e a periodicidade da aplicação de nutriente. Assim, maior cuidado com o controle da acidez do solo, por meio de calagem, será necessário quanto maior a dose e a frequência da aplicação de fertilizantes nitrogenados. (Vitti e Domeniconi, 2010).

d) Oxidação do enxofre: certos compostos de plantas (proteínas) e alguns minerais (pirita), contem S reduzido. Quando esse S é oxidado, a reação produz ácido sulfúrico (ácido forte):



e) Absorção de cátions pelas plantas: para cada carga + absorvida (cátion), a raiz absorve ânion (carga -) ou exsuda um cátion (diferente)  $\rightarrow$  para manter o equilíbrio de cargas.

Quando as raízes absorvem alguns cátions ( $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ ) muito mais que certos ânions ( $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ )  $\rightarrow$  exsudam  $H^+$   $\rightarrow$  para manter o equilíbrio de cargas  $\rightarrow$  acidificando o solo.

f) Uso de calcário

O calcário controla a acidez e daí, em função da quantidade, da qualidade e da frequência de aplicação, tem-se uma maior ou menor acidificação.

g) Poder tampão do solo

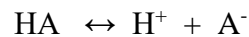
Quando se neutraliza  $H^+$  da solução, a fase sólida os repõe, liberando  $H^+$  de reserva. Tem-se então uma resistência à mudança de pH. A essa resistência denomina-se *poder tampão* do solo.

O poder tampão é responsável tanto por uma resistência na correção da acidez do solo quanto na sua acidificação.



#### 18.4. Tipos de Acidez do solo: Ativa e Potencial

Conceito: Ácidos são substâncias que, em solução aquosa, liberam íons  $H^+$



##### *Acidez Ativa e Acidez Potencial*

Acidez Ativa: mede o  $H^+$  dissociado, livre na solução do solo (medida pelo pH).

Acidez Potencial: é a maior parte da acidez do solo: adsorvidos aos colóides ou fazendo parte de compostos orgânicos.

#### 18.5. Efeitos da acidez dos solos

O pH afeta direta e indiretamente o crescimento e a produção vegetal:

a) *Efeito tóxico ou destrutivo do  $H^+$ :*

Não muito grande.

O suco celular apresenta pH de 4 – 6 e o solo, raramente, abaixo de 4 – 4,5.

- pH 4 ou 8 → plantas suportam bem, desde que recebam nutrientes.
- pH 3 ou 9 → começam os problemas
- pH 5,5 – 7 → bom desenvolvimento
- pH 6 – 6,5 → excelente

b) *Disponibilidade de nutrientes*

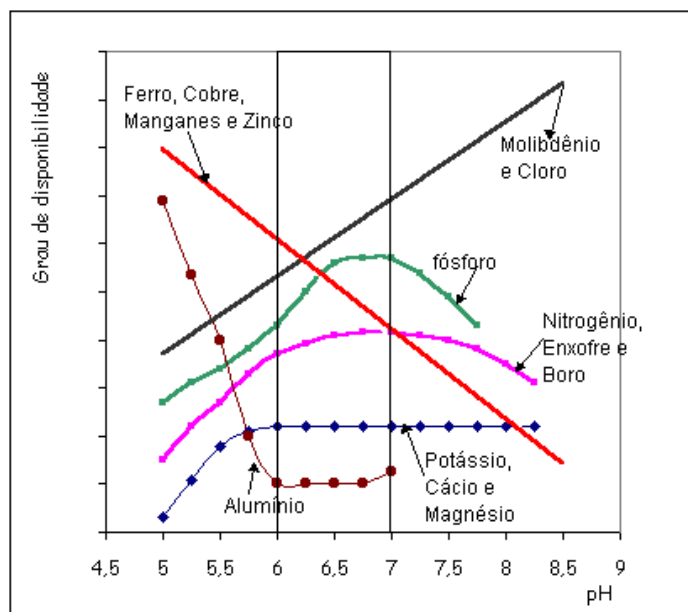


Figura 3. Efeito do pH na disponibilidade dos nutrientes e na solubilidade do alumínio no solo (Malavolta, 1985).

c) *pH e saturação por bases*

A disponibilidade de nutrientes interfere a saturação por bases (Figura 4).

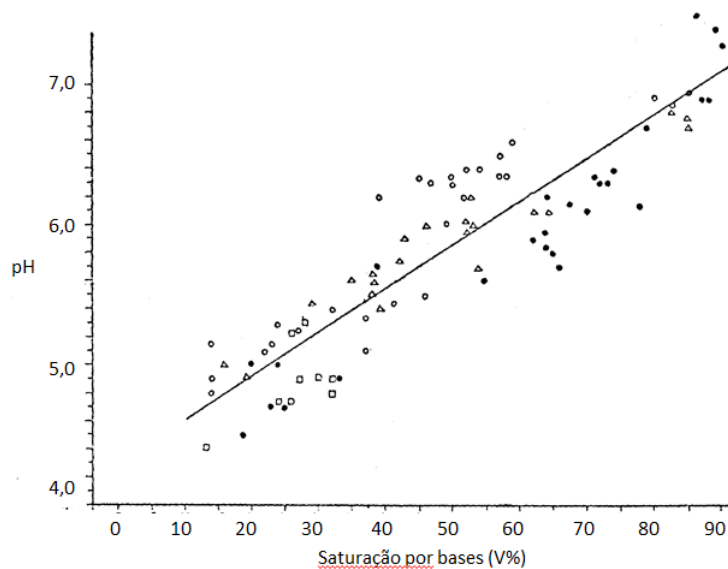
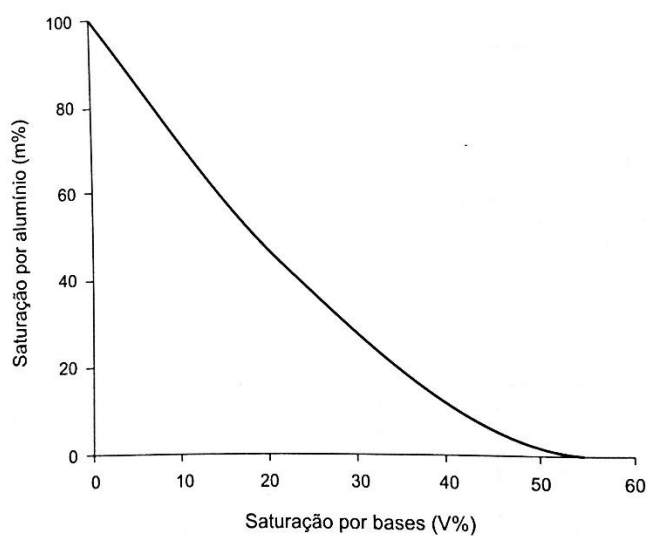


Figura 4. Relação entre pH e porcentagem de saturação por bases de 85 amostras de solos do estado de São Paulo (Catani e Gallo, 1955).

d) *V% e saturação por alumínio*

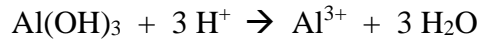


## 18.6. Alumínio em solos ácidos

O alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) é um importante componente da acidez do solo.

Altas concentrações de Al e Mn no solo podem ser tóxicas às plantas, constituindo umas das principais limitações agrícolas em solos ácidos.

O Alumínio NÃO é causa de acidez, e sim consequência!



Portanto: acidez potencial = [H + Al]

pH acima de 5,5-6,0 (até 7,0) → solubilidade do Al é mínima.

### *Efeitos do Alumínio nas plantas*

Manifestam-se na parte aérea e nas raízes, sendo mais críticos na raiz.

Provocando:

- Raízes curtas ou grossas;
- Inibição no crescimento de raízes;
- Raízes laterais engrossadas e pequena formação de pelos radiculares;
- Pré-disposição da planta injuriada a infecções por fungos;
- Inibição da divisão celular, com consequente inibição do alongamento celular;

Consequência: raízes ocupam menor volume de solo, diminuindo a absorção de água e nutrientes.

## 20. CORREÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO (Souza e Lobato, 2004)

A correção da acidez superficial e subsuperficial se faz necessária para obter maiores produtividades das culturas e maior eficiência no uso da água e nutrientes. Para essa correção, o insumo mais barato utilizado para a camada superficial (ou camada arável) do solo é o *calcário* (Figura 5a) e para correção do  $Al^{3+}$  camada subsuperficial é usado o *gesso agrícola* (Figura 5b).



**Figura 5.** Exemplos de calcário dolomítico (a) e gesso agrícola (b)

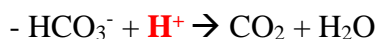
A prática mais utilizada para correção da acidez na camada arável (0 a 20 cm) do solo é a *calagem*. Para tanto, os materiais mais empregados são rochas calcárias moídas, constituídas por mistura de minerais, como a calcita e a dolomita, que são constituídos por carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) e/ou carbonato de magnésio ( $MgCO_3$ ), cujos constituintes neutralizam a acidez, fornecendo Ca e Mg. São menos usadas rochas calcárias calcinadas, que contém óxidos de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO), e os silicatos de cálcio e de magnésio, que serão estudados em capítulo separadamente (Vitti e Domeniconi, 2010).

### 19.1.Finalidades da calagem

#### 1) *Corrigir a acidez do solo, pela neutralização do H<sup>+</sup>*

Mecanismos de neutralização da acidez pelo calcário (Vitti, Domeniconi, 2010):

A pequena dissolução dos carbonatos (CaCO<sub>3</sub> e MgCO<sub>3</sub>), que ocorre em presença de água (H<sub>2</sub>O) e gás carbônico (CO<sub>2</sub>), é suficiente para desencadear uma série de reações, representadas a seguir, que resultam na neutralização da acidez do solo:



A hidroxila (OH<sup>-</sup>) reage com o íon H<sup>+</sup> da solução do solo, formando água (H<sub>2</sub>O). O bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) reage também com o H<sup>+</sup>, originando CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O.

É importante destacar que a neutralização da acidez ocorre por meio dos ânions (OH<sup>-</sup> e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), que são os receptores de prótons (H<sup>+</sup>), sem os quais a eliminação da acidez não seria possível.

À medida que as reações se processam, o Ca e Mg do corretivo vão ocupando os pontos de troca onde estavam o alumínio e o hidrogênio.

#### 2) *Corrigir a toxidez do Al e de Mn → por reações de precipitação desses elementos.*



#### 3) *Adicionar Ca e Mg ao solo, e todos os reflexos do aumento da disponibilidade desses nutrientes;*

#### 4) *Diminuir a lixiviação de Ca, Mg e K*

#### 5) *Diminuir a fixação do fósforo;*

#### 6) *Diminuir a toxidez do alumínio, manganês e eventualmente o ferro;*

#### 7) *Propiciar condições para melhor crescimento do sistema radicular → aumentando absorção de água e nutrientes para as plantas.*

Para que o calcário produza os efeitos desejáveis, é necessário haver umidade suficiente no solo para sua reação.

A velocidade de reação do calcário depende do grau de acidez do solo, da granulometria do corretivo e do grau de intimidade da mistura do calcário com o solo (Raij, 2011).

## 19.2. Corretivos de acidez do solo (Alcarde, 2005)

Corretivos da acidez dos solos são produtos capazes de neutralizar (diminuir ou eliminar) a acidez dos solos e ainda carrear nutrientes vegetais ao solo, principalmente cálcio e magnésio (Alcarde, 1992).

Há uma série de materiais que podem ser utilizados como corretivos, entretanto os principais são: óxidos, hidróxidos, silicatos e CARBONATOS. O *carbonatos* são os mais utilizados pois são encontrados em maiores quantidades e por isso são mais baratos.

### *Classificação dos corretivos de acidez*

Os corretivos de acidez são classificados como:

a) **Calcário:** pode ser tradicional, filler ou calcinado.

*Calcário tradicional* é o produto obtido pela moagem da rocha calcária. Seus constituintes são carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ).

*Calcário Filler* é a matéria-prima obtida através da moagem fina de calcário, basalto, materiais carbonáticos, etc. O calcário libera  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{CO}_3^{2-}$ ; a base química, isto é, o componente que proporciona a formação de  $\text{OH}^-$  é o  $\text{CO}_3^{2-}$  (e posteriormente o  $\text{HCO}_3^-$ ); o  $\text{CO}_3^{2-}$  é uma base fraca, isto é, a reação de formação de  $\text{OH}^-$  é relativamente *lenta e parcial*; e o  $\text{OH}^-$  produzido neutralizará o  $\text{H}^+$  da solução, responsável pela sua acidez.

*Calcário calcinado* é produto obtido industrialmente pela calcinação parcial do calcário. Apresenta-se na forma de pó fino. Sua ação neutralizante é devida à base forte  $\text{OH}^-$  e a base fraca  $\text{CO}_3^{2-}$ .

b) **Cal virgem agrícola:** produto obtido industrialmente pela calcinação ou queima completa do calcário. Seus constituintes são o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e o óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e se apresenta como pó fino. A cal virgem libera  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$  e calor; a liberação de  $\text{OH}^-$  é imediata e total, o que confere à cal virgem o caráter de base forte; e o  $\text{OH}^-$  produzido neutralizará o  $\text{H}^+$  da solução do solo, responsável pela sua acidez.

c) **Cal hidratada agrícola ou cal extinta:** produto obtido industrialmente pela hidratação da cal virgem. Seus constituintes são o hidróxido de cálcio -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - e o hidróxido de magnésio -  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  - e também se apresenta na forma de pó fino. A ação neutralizante da cal hidratada é muito semelhante à da cal virgem: a cal virgem “se hidrata” no solo utilizando água nele contida, enquanto a cal hidratada é hidratada industrialmente.

**d) Escória básica de siderurgia (Wutke & Gargantini, 1962):** subproduto da indústria do ferro, do aço e papel. Seus constituintes são o silicato de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) e o silicato de magnésio ( $\text{MgSiO}_3$ ) ação neutralizante da escória é muito semelhante à do calcário: neste caso, a base química é o  $\text{SiO}_3^{2-}$  que também é fraca, mas é mais forte que a base  $\text{CO}_3^{2-}$ .

**e) Carbonato de cálcio:** produto obtido pela moagem de margas (depósitos terrestres de carbonato de cálcio), corais e sambaquis (depósitos marinhos de carbonato de cálcio, também denominados de calcários marinhos). Sua ação neutralizante é semelhante à do carbonato de cálcio dos calcários.

**Observações:**

- conforme foi mostrado, uma base é considerada forte ou fraca pela intensidade com que coloca o  $\text{OH}^-$  no meio: uma base forte coloca, de imediato, todos os seus  $\text{OH}^-$  no meio, enquanto uma base fraca, devido o equilíbrio químico, coloca mais lentamente e em pequenas quantidades;

- pela ação neutralizante dos corretivos de acidez, fica claro que o cálcio e o magnésio não são neutralizantes; são nutrientes de plantas. As bases químicas efetivas são  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$  e  $\text{SiO}_3^{2-}$ . Isso significa que carbonatos, hidróxidos e silicatos solúveis corrigem a acidez, como  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{Li}(\text{OH})$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , mas *não são corretivos da acidez dos solos*. Devido à existência, em abundância, de materiais que associam essas bases químicas aos nutrientes cálcio e magnésio, estes são os indicados para corrigir a acidez “dos solos”, ou seja, são os corretivos da acidez dos solos.

### 19.3. Métodos de recomendação de calagem

Necessidade de calagem é a quantidade de corretivo necessária para neutralizar a acidez do solo de uma condição inicial até uma condição desejada. A condição desejada depende do objetivo que se pretende atingir, do método utilizado e do comportamento das culturas em relação à acidez. Há vários métodos de recomendação de calcário em uso no Brasil. Vamos nos restringir aos três principais:

- a) **Incubação com carbonato de cálcio:** usado em métodos de pesquisa.
- b) **Critério baseado na eliminação do Al-trocável e elevação dos teores de Ca e Mg (Quaggio, 1983).**

$$NC \text{ (t/ha)} = Al * 1,5 \text{ e } NC \text{ (t/ha)} = [(2 \text{ ou } 3) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})] * 1,5, \text{ onde:}$$

- 2: quando solo arenoso; 3: quando solo argiloso; NC = necessidade de calcário

Os dois critérios foram muito utilizados em São Paulo, concomitantemente, adotando-se a recomendação de maior valor. É um método inadequado pois a calagem visa neutralizar além do Alumínio, mas sim parte da acidez devida ao  $H^+$  não dissociado, de forma a elevar o pH e/ou V%.

- c) **Elevação dos teores de Ca e Mg trocáveis:**

$$Q = f [x - (Ca + Mg)]$$

$$Q = t \text{ de calcário/ha}$$

$$f = 1,5; 2,0 \text{ ou } 3,0$$

$$X = 2 \text{ ou } 3. (- 2: \text{ quando solo arenoso; } 3: \text{ quando solo argiloso;})$$

Inconveniente: solo pobre em Ca e Mg e altíssimo Al.

- d) **Método do Tampão SMP (Shoemaker et al., 1961).**

Método usado nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Por esse método, o pH determinado em suspensão do solo com a solução tampão SMP, ou  $pH_{SMP}$ , permite estabelecer diretamente as quantidades de calcário a aplicar com base em valores calculados ou tabelados. A tabela é construída com base em uma coleção de solos da região, estabelecendo-se a relação entre os valores de pH (SMP) e a necessidade de calcário para elevar o pH do solo a 6,0.



e) *Métodos baseado na elevação da saturação por bases (Raij, 1996).*

Preconiza a elevação da saturação por bases a valores pré-estabelecidos para diferentes culturas, de acordo Raij (1991) e Raij e outros (1996) pela com a seguinte fórmula:

$$NC(t/ha) = \left( \frac{(V2 - V1) * CTC}{PRNT * 10} \right)$$

Onde:

NC é a necessidade de calcário em toneladas por hectare (t/ha)

V1 é a saturação por bases do solo

V2 é a saturação por bases desejada, em função da cultura

CTC (ou T) é a capacidade de troca catiônica do solo

PRNT é o fator de correção, que leva em conta a qualidade do corretivo

VANTAGENS: Facilidade dos cálculos e flexibilidade para diferentes culturas.

Exercício 1: Calcule e dê a recomendação da necessidade de calcário para o solo da Amostra 1 da análise de solo abaixo, sabendo-se que a cultura a ser cultivada será a soja (V2 = 60%) e que o PRNT do calcário utilizado é igual a 75%.

Am	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	(H+Al)	Al	SB	CTC	V
		g.dm <sup>-3</sup>	mg.dm <sup>-3</sup>	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>						%	
1	4,4	12	17	2,8	13	3	46,9	1	18,8	65,7	29

$$NC(t/ha) = \left( \frac{(V2 - V1) * CTC}{PRNT * 10} \right) = \left( \frac{(60 - 29) * 65,7}{75 * 10} \right) = 2,7t/ha$$

## 21. NITROGÊNIO NO SOLO

### 20.1. Introdução

O nitrogênio é juntamente com o fósforo e o potássio, um macronutriente primário das plantas, sendo o mais abundante no tecido vegetal. A exigência das culturas varia de 80 a 250 kg/ha de adubo nitrogenado por ciclo, entretanto o aproveitamento pelas plantas raramente chega a 50% do que foi aplicado.

Dentre os fertilizantes, os nitrogenados são os mais caros em termos de energia necessária para produzi-los.

Desse modo, seja pela dinâmica do N no solo, seja pelo alto custo de produção dos fertilizantes, o N é um nutriente que merece máxima atenção.

### 20.2. Nitrogênio no solo (Raij, 2011)

É o nutriente exigido em maiores quantidades pelas culturas, superando, em muito, as quantidades utilizadas de P e K.

Não é proveniente de rochas que dão origem aos solos, mas sim do N **atmosférico**, através de 3 processos:

- a) **fixação atmosférica → descargas elétricas:** quebram a tripla ligação do N, sendo depositados no solo pela água da chuva, resultado em nitratos aproveitáveis pelas plantas;

Pode fornecer de 2 a 70 kg/ha de N, dependendo da precipitação da frequência de descargas elétricas e da proximidade de indústrias que liberam gases nitrogenados

- b) **fixação industrial:** fertilizantes → (N atm em amônia).

A produção de fertilizantes por processo industrial, a partir de alta temperatura e pressão, produzindo a amônia (NH<sub>3</sub>), origem de vários fertilizantes nitrogenados.

Pode fornecer valores superiores a 65 milhões de toneladas de N por ano.

A maior parte dos fertilizantes nitrogenados utiliza a amônia (NH<sub>3</sub>) como matéria prima básica. Amônia (NH<sub>3</sub>) é obtida do N do ar combinado com o hidrogênio

Principais fertilizantes nitrogenados: SULFATO DE AMÔNIO, NITRATO DE AMÔNIO E URÉIA.

- c) **fixação biológica:** fixação direta do N do ar por microorganismos do solo → a enzima NITROGENASE quebra a tripla ligação do N → > que a industrial.

Apresenta maior potencial de adição de N ao solo.

Melhor custo/benefício.

Os principais sistemas fixadores são:

- Livres: Fixadores livres → *Azobacter e Beijerinckia*. Podem ocorrer em arroz inundado, arroz, pastagem, milho, sorgo e cana-de-açúcar. Cerca de 30 kg/ha de N.
- Simbióticos: De maior interesse agrícola. Associação entre: bactérias do gênero *Rhizobium* e leguminosas e formação de nódulos. Cerca de 139 a 170 milhões de toneladas de N por ano.

Na fixação biológica de nitrogênio (FBN) a planta hospedeira cede o carboidrato que vem da fotossíntese ao microorganismo. E o microorganismo quebra a tripla ligação do  $N_2$  através de processo bioquímico: fornecendo  $NH_3$  à planta.

A energia usada pelo microorganismo (ATP, elétrons, H) provém da respiração.

A  $NH_3$  produzida: é incorporada, formando compostos como glutamina, ureídeos e aspargina, são transportados via xilema para parte aérea.

A FBN é um processo mediado por completo enzimático: nitrogenase, que tem participação direta de: Ca, Fe, Mo, Mg, Co e P (ATP). A deficiência desses elementos pode induzir a baixa FBN, ocasionando sintomas de deficiência do elemento na leguminosa. O Complexo nitrogenase pode responder positivamente à: **aplicação desses nutrientes → Ca, Mo, Mg, Co e P.**

### 20.3. Forma de nitrogênio no solo (Raij, 2011)

O nitrogênio (N) do solo pode estar na forma orgânica (chamado N orgânico) ou na forma mineral.

O N orgânico é o N da matéria orgânica: a M.O. libera o N orgânico por mineralização de forma imprevisível.

O N mineral está nas formas:  $NH_4^+$ ,  $NO_2^-$  e nitrato ( $NO_3^-$ ): existentes no solo oriundo da adição de fertilizantes ou da mineralização da M.O.

No solo, **o nitrogênio existe predominantemente em formas orgânicas (95%).**

Uma pequena parte do N total do solo encontra-se nas formas minerais de:

- **amônio ( $NH_4^+$ )**
- **nitrato ( $NO_3^-$ )**
- **nitrito ( $NO_2^-$ )**

#### 20.4. Perdas de nitrogênio no solo (Raij, 2011)

- a) *Lixiviação*: Perda do  $\text{NO}_3^-$  através da percolação da água da chuva no perfil do solo.
- b) *Desnitrificação*: Perda do  $\text{NO}_3^-$  através de formas gasosas ( $\text{N}_2\text{O}$  ou  $\text{N}^2$ ) para atmosfera. Ocorre por ação de microorganismos → durante a decomposição **anaeróbica** de restos vegetais no solo.

Ocorrência:

**Em condições de excesso de umidade no solo → falta de  $\text{O}_2$**

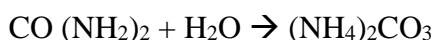
**Em presença de M.O. fresca → fonte de energia para as bactérias responsáveis pelo processo.**

Solos **compactados, mal drenados ou em períodos chuvosos** → favorecem condições anaeróbicas.

Campos de arroz inundado → não é indicado o uso de fontes nítricas ( $\text{NO}_3^-$ ).

- c) *Volatilização*: Perda da amônia ( $\text{NH}_3$ ) da ureia para atmosfera.

A Ureia é o adubo nitrogenado mais importante da agricultura:



**Urease**: enzima do solo quebra a molécula formando  $\text{NH}_3$  (gás).

Essa perda é acentuada se a ureia for aplicada sobre resíduos orgânicos (problemas para sistema conservacionista).

##### *Como evitar perdas de amônia*

Enterrar o fertilizante ou aplicar sobre o solo e aplicar água (irrigação ou chuva) para levá-lo para dentro do solo. Uso de fertilizante com inibidores de urease, enzima responsável pela hidrólise da ureia em amônia.

#### 20.5. Análise química de solo para o N

É difícil avaliar a disponibilidade de N no solo devido à dinâmica de N no solo. Deve-se considerar: mineralização, imobilização, resíduos orgânicos, clima, solo, etc. Matéria orgânica pode ser usada para avaliar a disponibilidade de N admitindo-se mineralização de 2% ao ano. Entretanto a mineralização da M.O. é difícil de determinar e variável, depende das condições climáticas, relação C:N, restos de culturas anteriores, etc.

## 21. FÓSFORO

### 21.1. Fósforo no solo

- P é um nutriente que tem alto grau de interação com o solo.
- Apresenta deficiência em vastas áreas da agricultura brasileira;
- é o elemento mais crítico da adubação.
- Dos macronutrientes primários o P é retirado em menor quantidade pelas plantas, mas é o nutriente mais utilizado na adubação.
- Solos tropicais → **tem baixa concentração de P disponível e alto potencial de “fixação” do P aplicado via fertilizante.**
- N e P são os nutrientes que mais limitam a produção em culturas no Brasil.

- **Principais fontes de P para o solo:** Estrutura de minerais; Fertilizantes e Matéria orgânica.

O principal fator que condiciona os teores totais de P é o **material de origem do solo.**

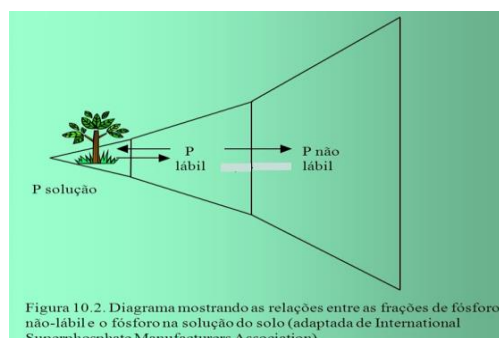
- **Na solução do solo → os teores de P são muito baixos.**

- **Formas presentes no solo:** o P na solução encontra-se na forma de íons **ortofosfatos, formas derivadas do ácido ortofosfórico ( $H_3PO_4$ )**. Em solução esse ácido dissocia-se em:  $H_2PO_4^-$ ;  $HPO_4^{2-}$  (aproveitáveis pelas plantas) e  $PO_4^{3-}$ .

À medida que o pH diminui, aumenta-se  $H^+$ , conseqüentemente aumenta-se  $H_2PO_4^-$  (predomina em solos ácidos).

### Disponibilidade de P no solo

- Representação do P no solo aplicável à Nutrição de Plantas, não qual se reconhecem 3 compartimentos:



- P lábil: Fracamente retido no solo, mantém equilíbrio rápido com a solução do solo.
- P não-lábil: Fortemente retido no solo (indisponível)

- P da solução: P disponível para as plantas.

Os **fosfatos adicionados como fertilizantes** se dissolvem, passando para a **solução do solo**.

Em decorrência da baixa solubilidade dos compostos de fósforo formados no solo e da forte tendência de adsorção destes pelo solo, a **maior parte do P passa para a fase sólida** → na qual fica em parte como **P lábil**, passando gradativamente para **P não-lábil**.

**P lábil** → **pode se redissolver**, caso haja abaixamento do seu teor em solução → de modo a **manter o equilíbrio**.

**Plantas absorvem o P da solução do solo** → na qual se encontra em concentrações muito baixas → **extensão do sistema radicular** é fundamental para **absorção do elemento**.

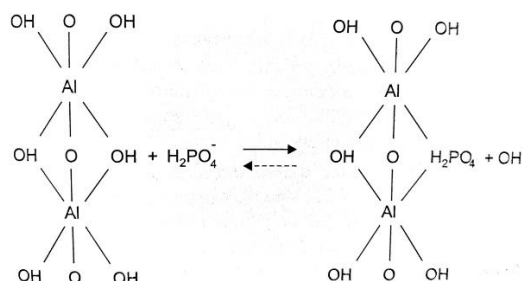
## 21.2. Solubilidade e adsorção do P

- **P forma compostos de solubilidade muito baixa com Fe, Al, Ca.**

- a reação de fosfatos com esses metais pode-se dar na **solução do solo (formação de compostos insolúveis)** ou pode ocorrer na **superfície das partículas de fração argila**.

- Neste caso, **A NATUREZA DA LIGAÇÃO NÃO É ELETROSTÁTICA**, como ocorre nos íons trocáveis, **mas do tipo COVALENTE OU TROCA DE LIGANTES**, isto é, **O P É ADSORVIDO ESPECIFICAMENTE EM PROCESSO NÃO REVERSÍVEL** → sendo denominado **“FÓSFORO FIXADO.”**

- Na **fixação do P** → é uma reação de **TROCA DE LIGANTES**, em que as oxidrilas ou moléculas de água coordenadas com cations (Al e Fe) da superfície dos óxidos, **são deslocadas pelo ânion fostato, formando um complexo de superfície, com ligações de alto grau de covalência**.



- Os fosfatos adsorvidos pelo solo não formam ligações muito estáveis imediatamente, permanecendo por bastante tempo na forma lábil → que pode retornar à solução.

- Sendo assim estabelece o seguinte equilíbrio: P solução → P lábil → P não lábil.

Se houver remoção do P da solução, o P lábil dissolve-se para manter a concentração de P em solução, com o qual está em equilíbrio.

Com o tempo, o P lábil vai gradualmente se transformando em P não lábil.

**Condições que favorecem a fixação do P:**

- maior teor de argila;
- maior ocorrência de óxidos de Fe e Al
- pH baixo.

**Apresenta baixa mobilidade no solo.**

### 21.3. Análise de solo para o P

Existe uma variedade muito grande de métodos de extração do P de solos em uso em diferentes regiões do mundo → no Brasil existem apenas 2 métodos em uso nos laboratórios de rotina:

- **Método da resina trocadora de íons:** processo de extração dá-se em suspensão aquosa de solo e resina. Ocorre a transferência do P para a resina, devido ao equilíbrio existente entre o P lábil e o P da solução. Agitação por 16h.
- **Método Mehlich 1**

### 21.4. Fósforo na planta

**Absorção:**  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  (predomina) e  $\text{HPO}_4^{2-}$ .

$\text{H}_2\text{PO}_4^-$  é mais abundante na solução do solo, devido à reação ácida dos solos brasileiros (pH diminui → aumenta  $\text{H}^+$ ). É o mesmo ânion que interage fortemente com as partículas do solo.

- **Maior absorção do fosfato inibe absorção do molibdato ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ).**
- **Mecanismo de absorção: difusão (predomina)** e interceptação radicular, portanto há necessidade de aplicação próximo das raízes.

**Transporte:** forma absorvida, ou seja, predominantemente como  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ .

**Redistribuição:** no floema apresenta **alta mobilidade**. Sendo prontamente móvel na planta no sentido ascendente, na forma de fosforilcolina (forma orgânica – predomínio) e P inorgânico (acumulado no vacúolo).

**Local inicial dos sintomas:** folha velha.

**Funções:**

1. **Transferência de energia** produzida na fotossíntese e respiração é armazenada na forma de ATP (ligação fosfatada).

2. **Elemento estrutural:** ligação em ácidos nucleicos (RNA e DNA) e em fosfolipídeos nas membranas (lecitina → resistência a estresses abióticos).

3. **Armazenamento de energia: como fitina** (hexafosfato de Ca ou Mg) → desenvolvimento inicial em sementes e plântulas.

Em quantidades adequadas o P:

- Acelera a formação de raízes.
- Aumenta o perfilhamento (junto com o N)
- Maior pegamento da florada e frutificação.
- Maior viabilidade das sementes
- Essencial para a FBN

**Exigências nutricionais das culturas para o P:** 3 a 5 g/kg.

#### **Sintomatologia de deficiência de P nas plantas:**

1. Cor verde mais escura nas folhas velhas, que pode evoluir para coloração avermelhada ou arroxeada.

Plantas deficientes em P acumulam açúcares → devido à falta de energia → que se ligam a compostos complexos formando a **ANTICIONINAS** (coloração vermelha) → dando o pigmento avermelhado nas folhas mais velhas em algumas culturas (como o cafeeiro, algodoeiro e milho).

2. Ângulos foliares mais estreitos.

3. Pequeno desenvolvimento.

4. Atraso no desenvolvimento → plantas + tempo no campo.

5. Aumento do conteúdo de carboidratos.

6. Baixo desenvolvimento do sistema radicular → comprometendo a absorção de outros nutrientes.

Neste caso, as raízes ficam mais susceptíveis ao ataque de “doenças de raiz”.

**Excessos de P:** desordem rara na literatura, entretanto existem indicações de pintas vermelho-escuras nas folhas velhas.



### 21.5. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados

- **Principais fertilizantes solúveis:** SS, ST, Termofosfato magnésiano, MAP e DAP (fertilizantes mistos); **baixa solubilidade:** Fosfatos Naturais.

- São **classificados quanto à solubilidade em água, em citrato neutro de amônio (NA) e ácido cítrico.**

- recomendação inicia-se com a análise do solo e correção da acidez do solo.

- Uso de **fertilizantes fosfatados solúveis: na forma granulada, localizada na linha de semeadura/plantio ou cova, sem incorporação** → diminui o volume de solo em que o nutriente reage, o que resulta em **menor retenção do P pelo solo** em regiões com alto teor de P → aplicação em solos com pH corrigido.

- **Fosfatos naturais: devido à baixa solubilidade,** necessitam de maior contato com o solo para reação com a acidez do solo → sendo a aplicação mais eficiente na forma de pó, a lançar em área total e com incorporação → aplicação em solos sem calagem.

- **Rotação/sucessão de culturas:**

As espécies em rotação/sucessão de culturas desempenham papel importante no uso eficiente do P aplicado ao solo → **pois diferem entre si quanto ao uso deste nutriente.**

- **Integração lavoura-pecuária:**

É uma importante opção de reciclagem e uso eficiente do fósforo utilizado como fertilizante no sistema, principalmente em decorrência do aumento do teor de MOS.

Em geral, as **gramíneas forrageiras,** como o Andropogon e as do gênero Brachiaria, tem capacidade para retirar P do solo em situação nas quais as plantas mais exigentes (milho e soja) não conseguem.

### **Recuperação do P**

- os fertilizantes fosfatados adicionados ao solo, **além do efeito imediato, também apresentam efeito residual prolongado** nas culturas subsequentes.

- dependendo do sistema, é possível aplicar uma quantidade única de fertilizante fosfatado e realizar cultivos sucessivos sem manutenções anuais de P → cana e pastagens.

- nos sistemas de cultivo anuais → é necessário fazer adubação corretiva (quando o teor de P disponível no solo for baixo) e adubação de manutenção (repor o P exportado).

## 22. POTÁSSIO

### 22.1. Potássio no solo

- é o segundo macronutriente em teor contido nas plantas.
- Depois do P é o mais consumido como fertilizante na agricultura brasileira.

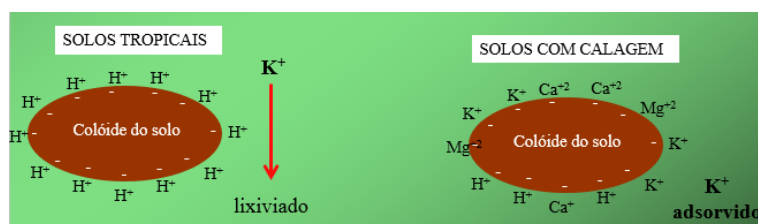
**Principais fontes de K** são as estruturas de minerais (feldspatos, micas, argila 2:1 - com o intemperismo liberam o K), fertilizantes e resíduos agrícolas e agroindustriais e os nutrientes reciclados pela cobertura vegetal.

À medida que o grau de intemperismo avança, esses minerais tornam-se menos comuns em solos, dando lugar à **caulinita**, que **não contém K em sua estrutura**.

- **O K é altamente solúvel** → conferindo **alta mobilidade** → **facilita seu esgotamento mais facilmente LIXIVIADO nos solos**

#### Fatores que afetam a disponibilidade de K em solos:

1. pH do solo: afeta a adsorção de  $K^+$  no solo.



**Figura 8.** Representação da dinâmica do K na solução em solos ácidos (à esquerda) e solos com o pH corrigido (à direita).

2. Textura do solo:

- **Solos mais ricos em matéria orgânica e argila** possuem **maior CTC** → portanto maior adsorção. Logo o K-trocável passa por menor perda por lixiviação.

Solos com **textura mais arenosa** possuem **menor CTC** → o K colocado como adubo ficará praticamente na solução do solo. Como consequência prática, neste tipo de solo, o **K deverá ser aplicado em menor quantidade e mais vezes** (ou seja, menor dose e maior parcelamento).

3. Relação K x Ca e Mg → equilíbrio

Os cátions trocáveis Ca, Mg e K são assim denominados por estarem **adsorvidos eletrostaticamente em cargas negativas das partículas do solo** → podendo ser **substituídos por outro cátion existente na solução do solo**.

Os teores de cátions trocáveis **estão em equilíbrio com os teores de cátions da solução do solo**, e quando um deles é removido da solução, pode ocorrer a reposição dos teores trocáveis pela troca com outros cátions da solução.

## 22.2. Análise de solo para o K, Ca e Mg

- índice utilizado é o **potássio, cálcio e magnésio trocável** → **extrator clássico** é a **solução de acetato de amônio 1 mol/L a pH 7,0**.

## 19.3. Potássio na planta

**Absorção do K:**  $K^+$ , sendo o mais importante cátion da fisiologia vegetal,

**Mecanismo de contato íon-raiz:** **difusão** (predomina), ou seja, move-se a curtas distâncias. Desta forma, deve-se colocar o K próximo às raízes.

- A maior parte da absorção de K ocorre na fase de crescimento vegetativo.

**Transporte:**  $K^+$  pelo xilema; sendo transportado facilmente.

**Redistribuição:**  $K^+$  é **altamente móvel** no floema.

**Sintomas de deficiência de K** inicialmente nas **folhas velhas**.

### Funções do K na planta

- **não tem função estrutural**, ou seja, não faz parte de nenhum composto orgânico.

- **Sua função é como ativador enzimático.**

1. **Ativador enzimático de mais de 60 enzimas.** Exemplos:

- K ativa a *enzima amido sintetase*, responsável pela síntese de amido.

- K ativa a *redutase do nitrato*, responsável pela síntese proteica;

- As enzimas *ATPases*, que atuam no processo de absorção iônica e crescimento de células meristemáticas, requerem o  $Mg^{2+}$  e também o  $K^+$ .

2. **Expansão celular:**

3. **Controle osmótico das células e Abertura e fechamento dos estômatos:**

4. **Fotossíntese**

Este controle da abertura/fechamento dos estômatos também é importante na taxa de fotossíntese, pois em plantas deficientes em K, a abertura dos estômatos não ocorre regularmente, diminuindo a entrada de  $CO_2$ .

5. **Aumenta a tolerância ao estresse climático** (secas e geadas):

6. **Atua no carregamento de fotossintatos (açúcares/amido) no floema.**

7. **Aumenta a rigidez da planta:** carregamento de fotossintatos para suprir o enchimento de grãos e garantir níveis adequados no caule.

8. **Fitotactismo.**

**Exigências nutricionais das culturas para o K:** 2-5% (20-50 g/kg).

**Sintomatologia de deficiência de K:**

A deficiência de K **não revela sintomas imediatos, chamada fome oculta.**

Inicialmente ocorre a redução de crescimento. Nas fases mais avançadas ocorre clorose marginal e necrose inicialmente das folhas *mais velhas*.

1. Clorose e depois necrose das margens e pontas das folhas, inicialmente as mais velhas.
2. Internódios mais curtos em plantas anuais.
3. Diminuição da dominância apical.
4. Menor tamanho dos frutos (citrus).
5. Menor teor de açúcar e amido em órgãos de reserva.
6. Acúmulo de **putrescina**: composto nitrogenado tóxico à planta, originado de aminoácidos básicos.
7. Redução na síntese da parede celular, predispondo a cultura a ventos (acamamento).
8. Turgidez reduzida e, sob deficiência de água, tornam-se flácidas.
9. A resistência à seca é reduzida: plantas mais susceptíveis a fungos.

**Excessos de K nas plantas:** confundem-se com danos causados pela salidade, que é alta nos principais fertilizantes potássicos.

### 22.3. Uso eficiente de fertilizantes potássicos

- para compensar as **extrações pelas colheitas e perdas por lixiviação e erosão do K** → **reposição periódica com uso de fertilizantes.**
- **Fertilizantes + comum é o KCl (58-62% de K<sub>2</sub>O).**
- Sulfato de potássio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) → usado em culturas sensíveis ao Cl e agricultura orgânica.
- Outras fontes importantes: fontes orgânicas como **vinhaça, esterco diversos, cama de aves, cinzas, palha de café, etc.**
- **aplicação do fertilizante potássico no sulco de plantio, por meio de fórmulas comerciais → 5 cm ao lado e abaixo das sementes → altas doses de K no sulco de semeadura (acima de 60 kg/ha) pode prejudicar a germinação e o desenvolvimento inicial pelo efeito salino.**
- o restante da dose de K deve ser **parcelado e aplicado a lanço em cobertura no período de maior exigência da cultura.**
- **Aplicação de P em taxa variável** de forma antecipada ao plantio é uma estratégia que vem aumentando nos sistemas de produção de maior nível tecnológico.
- controle das perdas por lixiviação e controle da erosão.

## 23. CÁLCIO

### 23.1. Cálcio no solo

- Cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) são conhecidos como **macronutrientes secundários**.

- Cálcio e magnésio são elementos que no solo ocorrem nas formas catiônicas  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ .

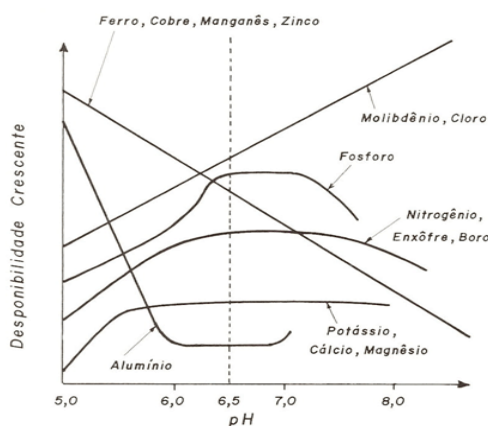
- **Principal fonte:** minerais (dolomita, calcita, apatita, feldspatos cálcicos e anfibólios) **aplicada** no solo é o **calcário** ( $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ ).

As reações de neutralização da acidez da solução do solo pelo calcário promovem a liberação de  $\text{OH}^-$  (que neutraliza o  $\text{H}^+$ ) e liberação do  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , que poderão ser absorvidos pelas plantas.



Juntamente como **potássio (K), Ca e Mg representam as bases do solo**, que compõe a **saturação por bases (V%)** e estão diretamente **relacionadas com a fertilidade** do solo.

E a sua disponibilidade está relacionada com o pH do solo, conforme figura 3:



**Figura 3.** Disponibilidade dos elementos em função do pH do solo.

### 23.2. Cálcio na planta

**Absorção:**  $\text{Ca}^{2+}$

**Mecanismo de contato íon-raiz:** fluxo de massa (predomina). A *interceptação radicular* também tem contribuição significativa na absorção do Ca.

**Transporte do Ca:** pelo xilema é na forma de  $\text{Ca}^{2+}$ , acropétalo, isto é, unidirecional, e controle pela transpiração e troca iônica, ou seja, transporte do Ca é junto com a água.

**Portanto órgãos com maior taxa de transpiração (folhas) recebem maior quantidade**

de Ca. Nos órgãos que transpiram pouco (folhas novas ou frutos) pode ocorrer deficiência de Ca, levando a desordens fisiológicas: “tipburn” ou “queima dos bordos” em alface; o colapso interno em manga, entre outros.

**Redistribuição do Ca:** é baixa. O Ca é imóvel no floema pois suas formas são insolúveis em água, como o pectato da parede celular.

**Sintomas iniciais: FN, flores e frutos** → *portanto a planta necessita de suprimento constante para alimentar o fruto.*

### **Funções do Ca na planta**

1. **Componente da parede celular:** faz parte da pectina por meio dos pectatos de Ca
2. **Estabilização das membranas celulares:** organização da lamela média pode influenciar a textura, a firmeza e a maturação dos frutos (Hanson et al., 1993) e reduzir a taxa de degradação da vitamina C, de produção de etileno e CO<sub>2</sub> e a incidência de doenças pós-colheita.
3. **Divisão e alongação da parede celular:** Principalmente nas raízes.
4. **Ativação enzimática e distribuição intracelular:** Ex: Calmodulinas: exigida para atividade de nucleotídeos e ATPase. E alfa-amilase: tem o papel de decompor o amido na germinação de sementes.
5. **Nodulação de leguminosas:** início de infecção e formação e desenvolvimento dos nódulos. Na fixação biológica do N<sub>2</sub> por leguminosas, os nódulos das raízes necessitam mais de Ca que a própria planta.
6. **Germinação do grão de pólen e crescimento do tubo polínico:**
7. **Osmorregulação e movimentos dos estômatos**
8. **Relação AIA e Ca:** Existem indicações de que o ácido indol acético (AIA) esteja envolvido no transporte do Ca para as regiões apicais da planta (raiz ou ramo).

**Exigências nutricionais para o Ca:** 0,1-0,5% (1-5 g kg<sup>-1</sup>); entretanto, pode atingir 10% (100 g/kg) em folhas velhas. Estes valores podem variar em função da cultura e outros fatores.

### **Sintomatologia de deficiência de Ca nas plantas (Malavolta, 2006)**

1. Cor esbranquiçada nas margens de folhas novas.
2. Manchas necróticas internervais nas folhas.

3. Crescimento não uniforme das folhas.
4. Murchamento e morte das gemas terminais; gemas laterais dormentes.
5. **Dilaceramento** das bordas das folhas novas.
6. Murchamento das folhas e **colapso do pecíolo**.
7. As **raízes cessam o crescimento**, e mostram aparência gelatinosa das pontas, pelos inchados.
8. Pequena frutificação ou produção de frutos anormais (podridão estilar do tomate).
10. “Bitter pit” ou buraco azedo em macieiras.
11. Podridão apical ou fundo preto em tomateiro.
12. Menor nodução em leguminosas.

### 23.3. Adição de Ca e Mg na forma de corretivos

- a principal fonte de Ca e Mg para o solo é com o uso do **calcário** → usado para correção da acidez do solo.
- **Ca deve se encontrar bem distribuído na camada de solo explorada pelas raízes** → devido à sua importante função no desenvolvimento das raízes e sua baixa mobilidade nas plantas.
- Além disso, o **calcário apresenta baixa solubilidade**.
- **aplicação a lanço com posterior incorporação na camada superficial do solo**.
- **deve anteceder pelo menos 30 a 90 dias antes da implantação da cultura**.
- **Nos SPD e em culturas perenes** → não há revolvimento do solo → o gesso pode ser uma boa opção por permitir maior mobilidade de Ca até camadas + profundas.

## 24. MAGNÉSIO

### 24.1. Magnésio no solo

- Principal fonte de Mg: minerais (biotita, clorita, serpentina e olivida), e aplicada no solo é o **calcário** ( $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ ).
- Cálcio e Magnésio tem menor mobilidade no solo que K e Na (sódio).
- Mobilidade do Mg é maior que a do Ca.

### 24.2. Magnésio na planta

**Absorção:  $\text{Mg}^{2+}$**

### **Mecanismo de contato íon-raiz: fluxo de massa (predomina),**

#### **Fatores que afetam a absorção de Mg**

- Altas concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{+3}$ , diminui absorção de  $\text{Mg}^{2+}$ .
- Sinergismo com o P.

**Transporte do Mg:** pelo xilema como  $\text{Mg}^{2+}$  e controle pela transpiração juntamente com  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ .

A solubilidade em água de Mg é maior que a do Ca.

**Redistribuição do Mg:** é muito móvel no floema; ao contrário do  $\text{Ca}^{+2}$ .

**Sintomas de deficiência iniciam-se:** folhas velhas.

#### **Funções do Mg na planta:**

**1. Componente da estrutura da clorofila.** O Mg é o átomo central da clorofila.

#### **2. Ativação enzimática**

- ribulose difosfato (rubisco): composto aceptor de  $\text{CO}_2$  no início do Ciclo de Calvin.
- quase todas as enzimas fosforilativas dependem do Mg: *carregador de P*, possibilitando a transferência de energia dos radicais fosfatos para diferentes reações:
- **Fotossíntese:** Como a fotossíntese: é a principal forma de captação de energia na forma de ATP, estabelece estreita relação entre funções do Mg e o metabolismo energético das plantas.
- **Respiração:** glicólise e ciclo dos ácidos carboxílicos;
- **Síntese de compostos orgânicos:** carboidratos, lipídeos, proteínas;
- **Absorção iônica e trabalho mecânico:** aprofundamento e extensão de raiz.

**3. Ativação enzimática da Sintetase do Glutamato (GS) →** importante no metabolismo do N e que atua na via de assimilação do  $\text{NH}_3$ .

**4. Síntese proteica:** O Mg é necessário à transferência de energia aos aminoácidos, por meio de enzimas fosforilativas.

**Exigências nutricionais:** 0,15-0,35% ( $1,5-3,5 \text{ g kg}^{-1}$ ).

As leguminosas são mais exigentes em Mg que as gramíneas.

#### **Sintomatologia de deficiência de Mg**

Como a maior parte do Mg da planta é móvel no floema, a deficiência aparece inicialmente nas folhas velhas por meio de *clorose internerval*, podendo ser acompanhada por variada pigmentação.

**Excessos de Mg nas plantas:** NÃO são descritos na literatura efeitos prejudiciais ao desenvolvimento e produção das plantas.



## 25. ENXOFRE

### 25.1. Enxofre no solo

- macronutriente secundário; trata-se de um nutriente acompanhante de outros nutrientes e sem preocupação comercial.
- não desperta interesse do setor commercial; CONSEQUÊNCIA: deficiência na planta.
- Ocorre cada vez mais deficiência de S na planta porque: uso de fórmulas de fertilizantes mais concentrados (não inclui S). Aumento de produtividade (> exigência). Redução do teor de matéria orgânica dos solos.
- Fonte primária de enxofre no solo são as rochas ígneas, nas quais o elemento ocorre normalmente em pequenas proporções. No solo a principal fonte de S é a matéria orgânica: 60 a 90% do S do solo está na forma orgânica (reservatório de S ao solo é a matéria orgânica).

Processos microbiológicos no solo tornam-se importantes no estudo de S.

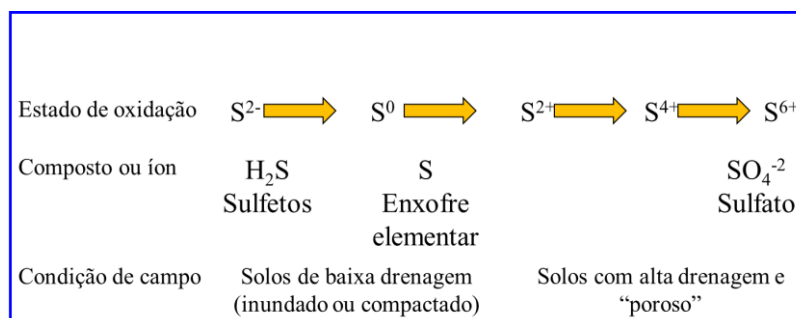
Solos arenosos e com baixo teor de M.O. podem apresentar baixos teores de S.

Os íons **fosfatos** aplicados em adubação ocupam preferencialmente as posições de troca que seriam ocupadas pelos sulfatos → dificultando a permanência de sulfato na camada arável → LIXIVIAÇÃO.

O enxofre sofre muitas transformações no solo (imobilização/mineralização e oxidação/redução) por meio de principalmente da ação de microorganismos e do manejo do solo (drenagem/porosidade) (Figura 6).

Na mineralização, o 1º mineral formado é o H<sub>2</sub>S (sulfeto), que **não é absorvido pela planta**.

Em condições aeróbicas: o sulfeto é oxidado a sulfato. Em condições anaeróbicas, de solos permanentemente encharcados ou compactados, ocorrem os sulfetos, podendo haver desprendimento do H<sub>2</sub>S do solo ou até formação do enxofre S elementar.



**Figura 6.** Fluxo do estado de oxidação do enxofre no solo.

Observa-se que a maior parte do enxofre no solo está “preso a um composto orgânico” que, por via microbiana, é convertido a formas minerais e, em solos aerados, passa à forma disponível para as plantas ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

Assim, conhecer os fatores que afetam a atividade da microbiota do solo, que favoreçam o processo da mineralização e também um manejo físico do solo adequado que favoreça maior aeração, incrementa o S-disponível e, conseqüentemente, a absorção e a nutrição da planta.

- **Alta mobilidade no solo** e por isso pode sofrer perdas por **lixiviação**, como o nitrato.

## 25.2. Enxofre na planta

**Absorção:**  $\text{SO}_4^{2-}$  (**SULFATO – predominante**). Existem evidências de absorção do S na forma **gasosa e também na forma orgânica** (cistina e cisteína).

**Contato íon-raiz:** fluxo de massa, ou seja,

**Transporte do S:** forma absorvida, ou seja, predominantemente como sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

**Redistribuição do S:** é muito pequena, sendo considerado um nutriente **pouco móvel no floema**.

**Sintomas iniciais:** órgãos mais jovens em crescimento (folha nova, flores, frutos).

Para participar do metabolismo vegetal exercendo suas funções, o enxofre na forma de sulfato deverá ser reduzido à forma de sulfeto ( $\text{H}_2\text{S}$ ), num processo chamado **redução assimilatória do sulfato**.

De forma semelhante ao nitrogênio, o enxofre que é predominantemente absorvido na forma oxidada,  $\text{SO}_4^{2-}$  (+6), precisa ser previamente reduzido a sulfeto,  $\text{H}_2\text{S}$ , (-2), para posteriormente ser incorporado aos compostos orgânicos. Para isso, exige energia (14 ATP) e um poder redutor. Portanto, essa reação exige alto consumo de energia respiratória.

### *Semelhanças e diferenças entre o sulfato e o nitrato*

1. Sulfato e nitrato podem ser perdidos por lixiviação.
2. Sulfato e nitrato passam por um processo de redução para serem incorporados aos compostos orgânicos.
3. 1º produto estável é aminoácido: cisteína (para S) e glutamato (para N)
4. Sintomas de deficiência: folhas novas (S) e folhas velhas (N).

### Funções do S na planta

1. Composto **estrutural de aminoácidos**: cisteína, cistina, metionina, taurina → entram na composição de todas proteínas.
2. Componente de **proteínas (todas) e vitaminas**.
3. Componente da **ferrodoxina**: proteínas de baixo peso molecular, que contém Fe e S.
4. Componente de **Coenzimas (CoA)** que estão ligadas ao metabolismo de carboidratos, gorduras e proteínas, na respiração.
5. Componente da **Nitrogenase** – enzima envolvida na fixação biológica do N.
6. Participa dos processos de fotossíntese, respiração, síntese de gorduras e proteínas, fixação de N e estrutura das proteínas.

Como o enxofre participa de estruturas orgânicas nas plantas e de diversas reações enzimáticas, a sua deficiência pode trazer prejuízos também na síntese proteica, como um acúmulo de nitrogênio (N-nitrato ou N-orgânico), promovendo uma **redução do teor de proteína nas plantas e no crescimento vegetal**.

**Exigências nutricionais:** 0,2 até mais de 1% do peso seco (2 a 10 g/kg).

### Sintomatologia de deficiência de S nas plantas (Malavolta, 2006)

1. Clorose semelhante ao N, primeiramente nas folhas novas.
2. Redução no crescimento, folhas pequenas, internódio curto.
3. Enrolamento da margem da folha, necrose e desfolhamento.
4. Menor nodulação (leguminosas), diminuição de açúcares.
5. No caso das leguminosas, a deficiência de S inibe mais a fixação biológica do N que a fotossíntese, podendo confundir a deficiência de S como a de N. A análise química das folhas permite a distinção entre deficiência de S e N.

### Excessos de S nas plantas

As plantas, no geral, são relativamente **tolerantes a altos níveis de  $SO_4^{2-}$** . Em solos com alta concentração de sulfato, podem ocorrer problemas, mas que se confundem com efeitos de salinidade, como pequeno desenvolvimento da planta e intensa coloração verde-escura das folhas. Além disso, pode ocorrer senescência prematura de folhas.

### 25.3. Adição de enxofre para as plantas

As quantidades aplicadas de S via elemento acompanhante dos fertilizantes como SS (18%  $P_2O_5$  e 8% S); Sulfato de amônio (20% de N e 24% de sulfato); ou Gesso Agrícola (Sulfato de cálcio): 17 - 20 % Ca e 25 a 28% de sulfato são suficientes para satisfazer as exigências das culturas. Ou **resíduos orgânicos, como esterco e agroid.**

**Análise de S:** os procedimentos + usados visam determinar o S na forma de sulfato, sendo usados vários extratores, sendo o + comum o **fosfato monocálcico em água**.

## 26. MICRONUTRIENTES

### 26.1. Introdução

São aqueles elementos exigidos em pequeníssimas quantidades pelas plantas. São eles: boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo) e zinco (Zn) e níquel (Ni).

Embora sejam exigidos em quantidades diminutas, **todos os micronutrientes são igualmente importantes**, e no caso de deficiência muito acentuada, as culturas não completam o ciclo vegetativo e, portanto sua produtividade fica prejudicada.

Sempre que a concentração no solo estiver BAIXA ou MÉDIA existe potencial de respostas das plantas à aplicação do micronutriente, que pode variar em função da exigência nutricional da cultura.

### 26.2. Boro

- é o micronutriente de deficiência mais comum no Brasil em várias culturas.
- MOS é a principal fonte de B para as plantas → solos com baixos teores de MO e/ou baixa taxa de mineralização da M.O. pode apresentar concentração crítica de B no solo para adequada nutrição da planta.
- **alta mobilidade no solo** → pode ser lixiviado da solução do solo, provocando deficiência nas culturas. Portanto **cuidado especial em áreas de solos arenosos com alta pluviosidade**.

*Absorção:*  $H_3BO_3$  (preferencialmente) e como  $H_2BO_3^-$ .

**Mecanismo de contato íon-raiz** ocorre devido ao fluxo de massa.

- É o micronutriente que tem a faixa ideal mais estreita entre deficiência e toxidez.
- *Transporte:* Pelo xilema na forma  $H_3BO_3$  pela corrente transpiratória.
- *Redistribuição:* **imóvel** no floema → sintomas iniciais de deficiência nas folhas novas e órgãos novos.

*Exigência nutricional:* monocotiledôneas varia de 6 a 18 mg/kg, nas dicotiledôneas, varia de 20 a 60 mg/kg.

*Funções:*

1. Síntese da parede celular
2. Alongamento celular das células meristemáticas (raiz e ramos).
3. Mantem a integridade das membranas.
4. Transporte de carboidratos e Crescimento reprodutivo

***Sintomas de deficiência de Boro:***

1. Deformação de folhas novas e frutos.
2. Inibição do crescimento da parte aérea e das raízes até morte das gemas terminais.
3. Encurtamento dos internódios.
4. Frutos pequenos, deformados e com lesões interna e externa.
5. Folhas engrossadas (acúmulo de carboidratos) e quebradiça.
6. Baixo florescimento, polinização e produção de sementes.
7. Caule enrugado, rachado ou ainda com manchas.

***Sintomas de excesso de Boro:*** clorose malhada (200 mg/kg) e depois manchas necróticas (>1500 mg/kg) nos bordos das folhas mais velhas (regiões de acúmulo de B), devido à maior taxa de transpiração nestes locais.

### **26.3. Cloro**

- ocorre no solo na **forma aniônica  $\text{Cl}^-$** , sendo comum em sais solúveis  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{MgCl}_2$ .

- íon cloreto é  **muito móvel → facilmente lixiviado.**

- a fonte de potássio mais comum usada é o cloreto de potássio ( $\text{KCl}$ ).

**Absorção:**  $\text{Cl}^-$ ,

**Mecanismo de contato íon-raiz** fluxo de massa.

É o micronutriente mais exigido pela planta, com exigência de 2 a 20 g/kg.

**Transporte:** Pelo xilema como  $\text{Cl}^-$ .

**Redistribuição:** Alta mobilidade no floema.

**Funções:** O Cloro não faz parte de compostos orgânicos da planta. Ele atua em funções bioquímicas e fisiológicas.

1. Participa na fotólise da água: quebra da molécula da  $\text{H}_2\text{O}$  no Fotossistema II.
2. Ativação enzimática da: **Amilase e ATPase no tonoplasto.**
3. Osmorregulação: gradiente de potencial de água
  - Consequência: a água entra na célula, empurrando a parede celular, deixando-a mais túrgida (juntamente com o K).
4. Atividade estomática:

### *Sintomas de deficiência de Cloro*

Murchamento, bronzeamento e encurvamento de folhas, que forma aspecto de taça “cupping”. As raízes são mais curtas e não ramificadas. Supressão da frutificação. Não são comuns sintomas de deficiência de cloro, o principal fertilizante potássico utilizado na agricultura leva cloro (KCl).

### *Sintomas de excesso de Cloro*

As culturas normalmente apresentam certa tolerância a altas concentrações de Cl, apresentando grandes diferenças entre as culturas. Os sintomas relatados são queima das pontas e margens das folhas, bronzeamento, amarelecimento precoce e abscisão das folhas.

O excesso de Cl pode influenciar a qualidade de alguns produtos:

- Batata: aumento do número de batatas menores (menor valor comercial)
- Fumo: dificuldade de permanência da chama acesa.
- Abacaxi: frutos menores.
- Café: reduz a qualidade de bebida.

## **26.4. Cobre**

- encontra-se no solo na forma de  $\text{Cu}^{2+}$ , **adsorvido à fração mineral do solo e complexado na matéria orgânica (M.O.) → sendo pouco móvel.**
- Quanto maior o teor de M.O., MENOR disponibilidade de Cu.
- A elevação do pH do solo também reduz a disponibilidade de cobre.

**Absorção:**  $\text{Cu}^{2+}$  ou ligado a quelados,

Mecanismo: fluxo de massa.

Exigência nutricional: Concentração: 4 a 20 mg/Kg.

A correção da deficiência pode ser feita por aplicações foliares de Cu na forma de sulfatos, oxiclreto, calda bordalesa, etc.

**Transporte:** Pelo xilema, estando ligado a compostos orgânicos como aminoácidos.

**Redistribuição:** Pouco móvel no floema. → Consequência: sintomas de deficiência nas **folhas novas e órgãos mais novos.**

### *Funções*

Ativador enzimático ou constituinte de enzimas:

1. *Plastocianinas:* **transporte de elétrons na fotossíntese entre os fotossistemas I e II.**

2. *Citocromo oxidase*: **transporte de elétrons afetando a fosforilação oxidativa.**
3. Constituinte *Dismutase superóxido*: **protege a planta dos efeitos deletérios dos radicais superóxidos ( $O_2^-$ ).**
4. Ativa *Oxidases*: **responsáveis pela síntese de lignina:**
5. Nas leguminosas, o Cu é requerido pelos nódulos.

#### *Sintomas de deficiência de Cobre*

1. Folhas mais novas com nervuras salientes, pode haver deformação do limbo, as folhas se encurvam para baixo a partir da base.
2. Deformação de folhas novas.
3. Pontos necróticos nas folhas novas.
4. Em cereais, as folhas tender a ficar mais estreitas e retorcida.
5. Colmos fracos e que podem murchar, mesmo com umidade.
8. Morte das regiões de crescimento dos ramos.
9. Pode ocorrer esterilidade dos grãos de pólen (acúmulo excessivo de auxina).

### **26.5. Ferro**

- é o elemento metálico mais comum na crosta terrestre.
- alterações nas condições físico-químicas do meio permitem a **mudança de valência ( $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$ ).**

**Absorção:**  $Fe^{2+}$ .

Mecanismo: fluxo de massa (é predominante), mas difusão e interceptação radicular também contribuem para o contato ion-raiz.

Exigência nutricional: 50 a 250 mg/kg.

**Transporte:** Pelo xilema como  $Fe^{2+}$ .

**Redistribuição:** pouco móvel no floema → sintomas iniciais de deficiência aparecem nas folhas novas e órgãos mais novos.

**Funções:** maior parte do Fe está nos cloroplastos com **influência na fotossíntese.**

1. **Biossíntese de clorofila e proteínas:**
2. **Compostos de ferredoxina (Fe-S-proteína):**
3. **Ativação enzimática: Citocromos; Catalase e peroxidase; Leghemoglobina; Nitrogenase; Nitrato redutase.**

### *Sintomas de deficiência de Ferro:*

1. **Reticulado fino nas nervuras** das folhas novas (rede fina verdes das nervuras e fundo amarelo), podendo evoluir para branqueamento.

## **26.6. Manganês**

**Absorção:**  $Mn^{2+}$ .

Mecanismo de contato íon-raiz: interceptação radicular e difusão.

Exigência nutricional de 40 a 250 mg/kg.

**Transporte:** Pelo xilema na forma  $Mn^{2+}$ .

**Redistribuição:** pouco móvel no floema → folhas novas.

### *Funções*

O Mn está envolvido em sistemas enzimáticos das plantas seja como constituinte ou como ativador enzimático, que atuam nos processos de:

1. **Fotossíntese:** ativação da enzima S.
2. **Respiração:** ativação das enzimas desidrogenases, quinases e descarboxilases.
3. **Controle hormonal:** atua na regulação e oxidação do ácido indolacético (AIA)
4. **Metabolismo do N:** ativação da redutase do nitrito, da sintetase da glutamina e na FBN.
5. **Resistência a doenças fúngicas:**

### *Sintomas de deficiência*

Reticulado grosso de folhas novas, contrastando com o verde normal das nervuras.  
Formas anormais das folhas, manchas pequenas e necróticas.

## **26.7. Molibdênio**

- nutriente menos abundante no solo e o menos exigido pelas culturas.

- Encontrado no solo na forma aniônica **molibdato** ( $MoO_4^{2-}$ )

**Absorção:**  $MoO_4^{2-}$  (molibdato),

Mecanismo de contato íon-raiz fluxo de massa.

Concentração: 0,1 a 1,0 mg/kg.

**Transporte:** Pelo xilema como  $MoO_4^{2-}$  (molibdato).

**Redistribuição:** moderadamente móvel no floema. De forma geral é pouco móvel na maioria das culturas.



### ***Funções***

- é constituinte de várias enzimas, especialmente as que atuam no metabolismo do N:

1. Ativação da nitrogenase: participa da fixação do nitrogênio.
2. Ativação das redutases: Redução do nitrato a nitrito.
3. Participa do metabolismo de compostos nitrogenados.
4. Produção e germinação do grão de pólen.

### ***Sintomas de deficiência de Molibdênio***

1. Folhas novas deformadas e amarelecimento de folhas.
2. Menor fixação biológica do nitrogênio e menor nodulação.

## **26.8. Zinco na planta (Malavolta, 2006)**

- deficiências de boro e zinco são as mais comuns no Brasil.

**Absorção:**  $Zn^{2+}$ .

Mecanismo: fluxo de massa.

Concentração: 20 a 50 mg/kg.

**Redistribuição:** Pouco móvel no floema → folhas novas.

### ***Funções***

1. Síntese protéica: faz parte dos ribossomas (local de síntese das proteínas) e participa da ativação de RNAase.
2. Integridade das membranas.
3. Síntese de triptofano, que é precursor na biossíntese do AIA (ácido indol acético), hormônio de crescimento apical da planta.
4. Ativador anidrase carbônica: Atua na fotossíntese na transferência de C para fixação.

### ***Sintomas de deficiência de Zinco***

1. Clorose internerval das folhas novas.
2. Folhas novas lanceoladas.
3. Internódios mais curtos.
4. Superbrotamento, menor pegamento da florada e frutos menores.

## 27. REFERÊNCIAS CONSULTADAS

- LUZ, P.H.C. e OTTO, R. Otimização na aplicação de corretivos agrícolas e fertilizantes. In: PROCHNOW, L.I., CASARIN, V. E STIPP, R. (Eds). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: contexto mundial e técnicas de suporte**. V.1. Piracicaba: IPNI. Brasil, 2010. p.425-461.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.
- MENDES, Alessandra Monteiro Salviano. **Manejo e Conservação do Solo e da Água**. Superintendência Federal de Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Estado da Bahia – SFA -BA/SDC/MAPA, 2007.
- PRADO, R. M. **Apostila de Nutrição Mineral de Plantas**. FUNEP: Jaboticabal/SP, 2006.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de Nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute – IPNI, 2011. 420p.
- SILVA, F. F. **Reconhecimento de padrões de nutrição para nitrogênio e potássio em híbridos de milho por análise de imagens digitais**. Tese de Doutorado. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos – Universidade de São Paulo (FZEA/USP), 2015.