

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO  
“LATO SENSU” (ESPECIALIZAÇÃO) A DISTÂNCIA  
FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO  
DE PLANTAS NO AGRONEGÓCIO**

***FERTILIDADE DO SOLO***

**Antônio Eduardo Furtini Neto  
Fabiano Ribeiro do Vale  
Álvaro Vilela de Resende  
Luiz Roberto Guimarães Guilherme  
Geraldo Aparecido de Aquino Guedes**

**Universidade Federal de Lavras - UFLA  
Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão - FAEPE  
Lavras - MG**

**Parceria**

Universidade Federal de Lavras - UFLA

Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão - FAEPE

**Reitor**

Antônio Nazareno Guimarães Mendes

**Vice-Reitor**

Elias Tadeu Fialho

**Diretor da Editora**

Marco Antônio Rezende Alvarenga

**Pró-Reitor de Pós-Graduação**

Joel Augusto Muniz

**Pró Reitor Adjunto de Pós-Graduação "Lato Sensu"**

Marcelo Silva de Oliveira

**Coordenador do Curso**

José Maria de Lima

**Presidente do Conselho Deliberativo da FAEPE**

Luiz Antônio Lima

**Editoração**

Centro de Editoração/FAEPE

**Impressão**

Gráfica Universitária/UFLA

**Ficha Catalográfica preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
da Biblioteca Central da UFLA**

Neto, Antônio Eduardo Furtini

Fertilidade do Solo / Antônio Eduardo Furtini Neto, Fabiano Ribeiro do Vale, Álvaro Vilela de Resende, Luiz Roberto Guimarães Guilherme, Geraldo Aparecido de Aquino Guedes. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001.

261 p.: il. – Curso de Pós-Graduação "Lato Sensu" (Especialização) a Distância - Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas no Agronegócio.

**Bibliografia**

1. Solo. 2. Fertilidade do solo. 3. Nutriente. 4. Interação nutriente-solo. 5. Transporte de nutriente. 6. Análise do solo. 7. Micronutriente. I. Vale, F.R. II. Resende, A.V. III. Guilherme, L.R.G., IV. Guedes, G.A.A. V. Universidade Federal de Lavras. VI. Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão. VII. Título.

CDD-631.422

Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida,  
por qualquer meio, ou forma, sem a prévia autorização da FAEPE.

# SUMÁRIO

<b>APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>1. NUTRIENTES DE PLANTAS E CONCEITOS BÁSICOS EM FERTILIDADE DO SOLO.....</b>	<b>8</b>
1.1. CARACTERIZAÇÃO DE NUTRIENTES DE PLANTAS.....	8
1.2. FERTILIDADE DO SOLO – CONCEITO E IMPORTÂNCIA.....	9
1.3. DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES.....	10
1.4. LEI DO MÍNIMO .....	13
1.5. LEI DOS INCREMENTOS DECRESCENTES.....	13
1.6. FERTILIDADE DO SOLO E PRODUTIVIDADE .....	15
<b>2. ASPECTOS GERAIS DO MANEJO DA FERTILIDADE DO SOLO .....</b>	<b>17</b>
2.1. FATORES ENVOLVIDOS NO MANEJO DA FERTILIDADE DO SOLO.....	18
<b>3. INTERAÇÃO NUTRIENTE - SOLO .....</b>	<b>22</b>
3.1. O AR DO SOLO .....	22
3.2. A SOLUÇÃO DO SOLO .....	24
3.3. OS COMPONENTES SÓLIDOS DO SOLO .....	26
3.4. DESENVOLVIMENTO DE CARGAS ELÉTRICAS EM SOLOS .....	27
3.5. RETENÇÃO E TROCA DE ÍONS NO SOLO.....	30
3.6. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE CTC.....	33
3.7. OS ORGANISMOS DO SOLO .....	36
<b>4. TRANSPORTE DE NUTRIENTES PARA AS RAÍZES.....</b>	<b>37</b>
4.1. INTERCEPTAÇÃO RADICULAR .....	38
4.2. FLUXO DE MASSA .....	38
4.3. DIFUSÃO.....	40
<b>ANÁLISE DE SOLO.....</b>	<b>45</b>
5.1. AMOSTRAGEM DO SOLO .....	46
5.2. ANÁLISE EM LABORATÓRIO .....	50
5.3. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DO SOLO .....	51
<b>6. ACIDEZ DO SOLO.....</b>	<b>60</b>
6.1. ORIGEM DA ACIDEZ DOS SOLOS .....	60

---

---

6.2. COMPONENTES DA ACIDEZ DOS SOLOS .....	63
6.3. PODER TAMPÃO DOS SOLOS.....	65
6.4. CAUSAS DO MENOR CRESCIMENTO DAS PLANTAS EM SOLOS ÁCIDOS E ALCALINOS .....	67
<b>7. CALAGEM .....</b>	<b>76</b>
7.1. CARACTERÍSTICAS DOS CORRETIVOS.....	77
7.3. ASPECTOS ECONÔMICOS DA CALAGEM.....	83
7.4. CÁLCULO DA NECESSIDADE DE CALAGEM.....	84
7.5. EFEITO RESIDUAL DA CALAGEM .....	92
7.6. ÉPOCA DE APLICAÇÃO DOS CORRETIVOS .....	92
7.7. FORMA DE APLICAÇÃO DOS CORRETIVOS.....	93
7.8. ACIDIFICAÇÃO DO SOLO.....	95
<b>8. GESSAGEM.....</b>	<b>97</b>
8.1. REAÇÕES DO GESSO EM SOLOS ÁCIDOS.....	97
8.2. DIAGNÓSTICO DA TOXIDEZ POR ALUMÍNIO OU DEFICIÊNCIA DE CÁLCIO.	100
8.3. CÁLCULO DA NECESSIDADE DE GESSAGEM.....	101
8.4. FORMA DE APLICAÇÃO DO GESSO .....	102
8.5. BENEFÍCIOS DA GESSAGEM .....	103
<b>9. PRINCÍPIOS BÁSICOS ENVOLVIDOS NA RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO.....</b>	<b>105</b>
9.1. DEFINIÇÃO DO NUTRIENTE A APLICAR.....	106
9.2. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE NUTRIENTE .....	107
<b>10. CARACTERÍSTICAS DOS FERTILIZANTES MINERAIS E ORGÂNICOS .....</b>	<b>109</b>
10.1. CLASSIFICAÇÃO DOS FERTILIZANTES.....	109
10.2. CARACTERÍSTICAS DOS FERTILIZANTES MINERAIS.....	111
10.3. CARACTERÍSTICAS DOS FERTILIZANTES ORGÂNICOS .....	116
10.4. PRINCIPAIS FERTILIZANTES ORGÂNICOS .....	120
<b>11. NITROGÊNIO NO SOLO, FERTILIZANTES E ADUBAÇÃO NITROGENADA ....</b>	<b>125</b>
11.1. CICLO E FORMAS DO NITROGÊNIO NO SOLO.....	125
11.2. FATORES QUE AFETAM O TEOR DE NITROGÊNIO NO SOLO.....	128
11.3. TRANSFORMAÇÕES DO NITROGÊNIO NO SOLO .....	129
11.4. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE NITROGÊNIO NO SOLO.....	139

---

---

11.5. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE NITROGÊNIO NA ADUBAÇÃO .....	141
11.6. FERTILIZANTES NITROGENADOS MINERAIS .....	144
<b>12. FÓSFORO NO SOLO, FERTILIZANTES E ADUBAÇÃO FOSFATADA .....</b>	<b>151</b>
12.1. FORMAS E DINÂMICA DO FÓSFORO NO SOLO .....	151
12.2. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO	161
12.3. ADUBAÇÃO FOSFATADA CORRETIVA .....	165
12.3. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE FÓSFORO NA ADUBAÇÃO .....	168
12.4. FERTILIZANTES FOSFATADOS .....	173
<b>13. POTÁSSIO NO SOLO, FERTILIZANTES E ADUBAÇÃO POTÁSSICA.....</b>	<b>177</b>
13.1. FORMAS E DINÂMICA DO POTÁSSIO NO SOLO .....	177
13.2. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO NO SOLO	184
13.3. ADUBAÇÃO POTÁSSICA CORRETIVA .....	185
13.4. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE POTÁSSIO NA ADUBAÇÃO .....	187
13.5. FERTILIZANTES POTÁSSICOS .....	189
<b>14. CÁLCIO NO SOLO .....</b>	<b>191</b>
14.1. FORMAS E DINÂMICA DO CÁLCIO NO SOLO .....	191
14.2. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE CÁLCIO NO SOLO	195
<b>15. MAGNÉSIO NO SOLO.....</b>	<b>197</b>
15.1. FORMAS E DINÂMICA DO MAGNÉSIO NO SOLO .....	197
15.2. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE MAGNÉSIO NO SOLO .....	200
15.3. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE CÁLCIO E MAGNÉSIO .....	200
15.4. FERTILIZANTES CONTENDO CÁLCIO E MAGNÉSIO .....	200
<b>16. ENXOFRE NO SOLO.....</b>	<b>201</b>
16.1. FORMAS E DINÂMICA DO ENXOFRE NO SOLO .....	201
16.2. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE ENXOFRE NO SOLO	205
16.3. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE ENXOFRE .....	206
16.4. FERTILIZANTES CONTENDO ENXOFRE .....	206
<b>17. MICRONUTRIENTES: DINÂMICA NO SOLO E FERTILIZANTES .....</b>	<b>208</b>
17.1. FORMAS E DINÂMICA DOS MICRONUTRIENTES NO SOLO.....	209
17.2. FATORES QUE AFETAM A DISPONIBILIDADE DE MICRONUTRIENTES .....	219
17.3. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE MICRONUTRIENTES NO SOLO .....	222

---

---

17.4. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE MICRONUTRIENTES NA ADUBAÇÃO .....	223
17.5. FERTILIZANTES CONTENDO MICRONUTRIENTES .....	225
<b>18. MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO E ADUBAÇÃO ORGÂNICA.....</b>	<b>229</b>
18.1. IMPORTÂNCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO.....	229
18.2. SUSTENTABILIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO .....	231
18.3. CÁLCULOS NA RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO ORGÂNICA .....	232
18.4. ÉPOCA E FORMA DE APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES ORGÂNICOS .....	233
<b>19. CRITÉRIOS PARA O MANEJO DA ADUBAÇÃO .....</b>	<b>235</b>
19.1. DEFINIÇÃO DA ÉPOCA DE APLICAÇÃO DO NUTRIENTE .....	235
19.2. DEFINIÇÃO DO FERTILIZANTE A SER APLICADO .....	238
19.3. DEFINIÇÃO DA FORMA DE APLICAÇÃO DO FERTILIZANTE .....	241
<b>20. FERTILIDADE DO SOLO NO PLANTIO DIRETO .....</b>	<b>244</b>
20.1. ESTRATÉGIAS DE FERTILIZAÇÃO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO .....	245
20.2. RECOMENDAÇÕES DE CALAGEM E ADUBAÇÃO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO NO CERRADO .....	248
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>252</b>

---

## APRESENTAÇÃO

Esperamos que esta publicação possa ser útil aos profissionais ligados à produção vegetal, com atuação no manejo da fertilidade do solo, no sentido de se realizar um trabalho mais eficiente, contribuindo, desta forma, para uma maior valorização da atividade agrícola no Brasil.

Este material se constitui na atualização das publicações “Fertilidade do Solo: Dinâmica e Disponibilidade de Nutrientes” e “Manejo da Fertilidade do Solo”, de autoria dos Professores Fabiano Ribeiro do Vale, Luiz Roberto Guimarães Guilherme e Geraldo Aparecido de Aquino Guedes, e editados pela UFLA/FAEPE. Além de se compilar os dois materiais em uma só publicação, informações mais recentes foram introduzidas com o objetivo de se avançar na parte conceitual da Fertilidade do Solo e de fatores ligados ao seu manejo.

De modo geral, os solos do Brasil apresentam problemas de acidez, além de uma baixa fertilidade natural, o que leva normalmente à necessidade da utilização de corretivos e fertilizantes. Apesar dos avanços obtidos no entendimento da fertilidade do solo, ainda ocorrem muitos desacertos no manejo dos solos brasileiros.

É nosso objetivo que o correto manejo da fertilidade possa tornar os solos altamente produtivos, de forma sustentada e economicamente viável, sem danos ao ambiente.

Os autores

---

## NUTRIENTES DE PLANTAS E CONCEITOS BÁSICOS EM FERTILIDADE DO SOLO

---

Uma característica dos seres vivos, notadamente das plantas, diz respeito à capacidade de conversão de elementos químicos absorvidos do meio ambiente em componentes celulares. Assim, por exemplo, carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo e enxofre são os elementos formadores de proteínas, constituintes protoplasmáticos de vital importância para o crescimento e desenvolvimento das plantas.

Vários elementos químicos são essenciais à produção vegetal, pois, sem qualquer um deles as plantas não conseguem completar o seu ciclo de vida. Portanto, são considerados nutrientes de plantas. Exceto o carbono, oxigênio e hidrogênio, que são supridos às plantas através de água e do ar, os demais elementos essenciais ao crescimento das plantas têm o solo como fonte primária.

A Fertilidade do Solo, importante disciplina no contexto da agropecuária brasileira, procura, em sua parte básica, estudar os aspectos relacionados com a dinâmica, suprimento e disponibilidade dos nutrientes de plantas. Na sua parte aplicada, os conhecimentos em Fertilidade do Solo subsidiam o manejo eficiente do solo e das culturas, possibilitando a adoção de técnicas adequadas de fornecimento de nutrientes – adubação – de forma a obter-se elevada produtividade com menor custo de produção e mínimo impacto ao ambiente.

### 1.1. CARACTERIZAÇÃO DE NUTRIENTES DE PLANTAS

A essencialidade de certos elementos químicos às plantas está relacionada, em resumo, ao fato do elemento ser constituinte de um metabólito essencial ou ser requerido para ação de um processo metabólico, por exemplo, para ação de uma enzima (Arnon e Stout, 1939). Com base nisto, os seguintes elementos são considerados elementos essenciais – nutrientes – para as plantas: Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O), Nitrogênio (N), Fósforo (P), Enxofre (S), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Molibdênio (Mo), Boro (B) e Cloro (Cl).

---



O cloro foi o último elemento essencial a ser descoberto (Broyer et al., 1954). A lista apresentada pode não ser definitiva, pois, elementos exigidos em quantidades inexpressivas podem ainda se mostrarem essenciais.

Não se deve confundir a essencialidade de certos elementos para microrganismos vivendo em associação com as plantas como sendo essenciais às mesmas. Por exemplo, o cobalto é essencial às bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico, mas não às plantas. De qualquer forma, visando a produção de soja sob fixação de nitrogênio pelas bactérias em simbiose nas raízes da planta, o agricultor terá de preocupar-se com a disponibilidade de cobalto no solo.

Os nutrientes supridos pelo solo não são exigidos em iguais quantidades pelas plantas. O principal fator que controla o teor de nutrientes nas plantas é o potencial de absorção, que é geneticamente fixado. Assim, por exemplo, o teor foliar de N e K é cerca de dez vezes maior que o de P, S e Mg ou cerca de mil vezes maior que o de Fe, Zn e Mn. Variações dessa natureza ocorrem em todas as espécies vegetais. Todavia, entre espécies, pode haver diferenças quanto ao teor de um mesmo nutriente, o que também é geneticamente determinado.

Uma divisão, de certa forma arbitrária, quanto a exigência, classifica os nutrientes que ocorrem em teores mais elevados nas plantas como macronutrientes – N, P, K, Ca, Mg e S –, os quais, conseqüentemente, são requeridos em maiores quantidades. Por sua vez, os menos exigidos são denominados micronutrientes – Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B e Cl. Deve-se observar que a classificação em macro ou micronutrientes não está relacionada com uma maior ou menor importância de determinado nutriente para o desenvolvimento vegetal, uma vez que todos os treze nutrientes são essenciais ao metabolismo da planta.

Portanto, os nutrientes são indispensáveis para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Numa agricultura cada vez mais tecnificada e competitiva, o agricultor tem de estar muito atento para a capacidade do solo em suprir os nutrientes de plantas, ou seja, para a fertilidade do solo a ser cultivado.

## 1.2. FERTILIDADE DO SOLO – CONCEITO E IMPORTÂNCIA

A Fertilidade do Solo como disciplina, em sua definição mais simples, pode ser considerada como o ramo da Ciência do Solo que estuda a capacidade dos solos em suprir nutrientes às plantas. Em tal estudo, para cada nutriente, procura-se aprofundar os conhecimentos para melhor entender as transformações, a mobilidade e a disponibilidade de cada um às plantas.

Fazendo-se uso desses conhecimentos básicos e da correta avaliação da capacidade do solo em suprir nutrientes às plantas, pode-se, quando necessário, fazer uso de práticas corretivas e de adubação, ou seja, fazer o correto manejo da fertilidade do solo. Este é o escopo da parte aplicada da disciplina Fertilidade do Solo.

---

Não se pode ignorar a existência de solos férteis, que permitem a obtenção de elevadas produtividades, sem uso de corretivos ou de fertilizantes – pelo menos enquanto sua capacidade de suprir nutrientes de plantas persistir.

Todavia, a maioria dos agricultores estão em luta constante para suplantarem deficiências de nutrientes na busca por maiores produtividades. Presume-se que cerca de 70% dos solos cultivados no Brasil apresentam uma ou mais limitação séria da fertilidade (Lopes, 1975; Sanchez e Salinas, 1981). Mas, através dos conhecimentos gerados pela pesquisa em fertilidade do solo, solos aparentemente improdutivos podem tornar-se destacados produtores de alimentos.

Além da necessidade da aplicação dos conhecimentos em fertilidade do solo para a produção vegetal em áreas antes improdutivas, deve-se ressaltar que os avanços em geral na agricultura – irrigação, cultivo intensivo do solo, uso de variedades mais produtivas, manejo mais eficiente do solo, etc – tendem a aumentar ainda mais a importância do manejo da fertilidade do solo na produção vegetal.

O agricultor precisa conscientizar-se de que o correto manejo da fertilidade do solo é responsável pela maior parcela – em certos casos acima de 50% – dos ganhos de produtividade obtidos com o uso das práticas culturais recomendadas para as diversas culturas. É lamentável que vários conhecimentos básicos sobre a fertilidade do solo ainda não são devidamente adotados por muitos agricultores brasileiros. A título de exemplo, cita-se o fato de que a análise química do solo – o mais usado método de avaliação da fertilidade do solo nos países desenvolvidos – ainda é grandemente desprezada, às vezes, até mesmo por técnicos.

Finalmente, é preciso destacar que o uso inadequado de fertilizantes, tanto de natureza mineral quanto orgânica, além do baixo retorno econômico, pode resultar em sérios problemas ao meio ambiente. Aí estão as preocupações com a contaminação de águas subterrâneas, com a eutroficação de lagos e rios e, até mesmo, com a contaminação dos próprios alimentos produzidos. Através da aplicação dos conhecimentos da fertilidade do solo pode-se conciliar a economicidade da atividade agrícola com a preservação do meio ambiente, no que concerne ao uso de corretivos e fertilizantes.

Quando se fala da capacidade dos solos em suprir nutrientes de plantas, está implícito o fato de que “suprir” implica em o solo ter o nutriente e, ao mesmo tempo, fornecê-lo às raízes. Em outras palavras, o nutriente numa forma capaz de ser suprido é considerado disponível às plantas. Com isso, o termo nutriente disponível é muito usado em fertilidade do solo, mas que precisa ser melhor entendido.

### **1.3. DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES**

Diversos fatores influenciam a dinâmica dos diferentes nutrientes no solo, condicionando a capacidade do solo em supri-los às plantas, sendo a disponibilidade de nutrientes é variável espacialmente e no tempo.

---

As plantas são capazes de aproveitar – absorver – nutrientes presentes em formas iônicas dissolvidas na fase aquosa que compõe o solo – solução do solo. Um nutriente para ser absorvido pela raiz necessita ser transportado até a superfície radicular. Assim, o teor disponível de um dado nutriente, em função do fator transporte, depende de aspectos físicos do solo que afetam a mobilidade de íons, tais como textura, compactação e teor de água. A umidade do solo é de relevada importância para a disponibilidade dos nutrientes, portanto, as condições de precipitação necessitam ser consideradas para melhor interpretar o conceito de disponibilidade.

De forma simplificada, pode-se considerar como disponível o somatório da quantidade de nutriente na solução do solo, capaz de chegar até a superfície da raiz, mais a quantidade que se encontra na fase sólida, capaz de ressuprir prontamente a solução do solo à medida que o nutriente da fase líquida vai sendo absorvido. Entretanto, este conceito precisa ser aprofundado, de forma a considerar os fatores que afetam a disponibilidade de um dado nutriente em toda a plenitude da relação solo-planta-microrganismos.

A concentração de qualquer nutriente em solução é normalmente muito pequena, de forma que as plantas, apesar de apenas absorverem os nutrientes da solução, ficam quase totalmente na dependência da fração do nutriente retido na fase sólida capaz de ressuprir a solução do solo.

A presença de outro nutriente ou de certos elementos químicos pode afetar seriamente a disponibilidade de um nutriente X. A disponibilidade pode ser reduzida, em primeiro lugar, através da interação na solução de solo. Neste caso, reações de precipitação – alumínio com fósforo, por exemplo – reduzem a concentração do nutriente na solução e, conseqüentemente, sua disponibilidade. Em segundo lugar, a interação pode ocorrer já na superfície radicular, ou seja, o nutriente ou elemento Y competindo com o nutriente X pelos sítios de absorção na raiz. Por exemplo, o amônio é um potente inibidor da absorção de potássio (Vale, 1988). São vários os casos de competição durante o processo de absorção, tratados em profundidade na nutrição mineral de plantas.

No caso de Y representar um radical orgânico e X um dos micronutrientes catiônicos, a complexação ou quelação do micronutriente pode aumentar a sua concentração em solução e, conseqüentemente, o seu transporte até a superfície radicular. Portanto, neste caso, a interação entre Y e X promove aumento na disponibilidade de X. Em termos práticos, conforme será discutido no Capítulo 17, em solos mais arenosos a presença de resíduos orgânicos, mesmo em pequenas quantidades, é de relevada importância para promover maior aquisição de Fe, Mn, Zn e Cu pelas plantas.

A disponibilidade de nutrientes é influenciada também pelo fator planta. Cada vez mais é reconhecido o papel da planta na aquisição dos nutrientes do solo, alterando e, em alguns casos, controlando a disponibilidade de nutrientes no solo.

---

Principalmente para os nutrientes de baixa mobilidade, como por exemplo para o fósforo, a morfologia e o crescimento radicular exercem fundamental papel na disponibilidade deste nutriente para a planta.

A raiz das plantas, dentro de certos limites, tende a criar um ambiente próprio de 1 a 4 mm ao seu redor – rizosfera –, com condições, muitas vezes, bastante distintas do solo adjacente. Assim, as alterações de acidez e de potencial de oxi-redução promovidas pelas plantas na rizosfera ou a exsudação dos mais variados compostos orgânicos podem resultar em sensíveis alterações na disponibilidade dos nutrientes.

É muito comum observar diferenças de pH de uma a duas unidades entre a rizosfera e a massa de solo adjacente. Como será detalhado adiante, a acidez do solo exerce importante papel na disponibilidade de nutrientes. Por exemplo, a alteração de apenas uma unidade no valor de pH pode alterar a disponibilidade de ferro em cerca de mil vezes. Portanto, na massa de solo, que é a parte analisada quimicamente no laboratório uma condição de pH elevado implica em baixíssima disponibilidade de ferro. Todavia, ao cultivar esse solo, certas plantas podem criar um ambiente de pH rizosférico com maior acidez, de forma a aumentar a disponibilidade deste nutriente.

A quelação ou complexação com substâncias orgânicas de baixo peso molecular exsudadas pelas raízes aumenta a concentração de micronutrientes catiônicos na solução do solo bem como o transporte dos mesmos até a superfície radicular. Portanto, aumenta a disponibilidade destes nutrientes. Neste mesmo sentido, os ácidos orgânicos podem aumentar a disponibilidade de fósforo por promoverem uma redução na atividade de ferro e/ou de alumínio na solução do solo.

As plantas, finalmente, podem também alterar a disponibilidade dos nutrientes através da absorção propriamente dita – última etapa do processo de aquisição do nutriente. Há variações entre espécies quanto a capacidade de absorção de nutrientes e, o que é mais relevante, variações entre genótipos de uma mesma espécie.

Merecem destaque também a associação das raízes com fungos micorrízicos – micorrizas. As hifas dos fungos aumentam a área de absorção promovendo maior aquisição de nutrientes, notadamente de fósforo (Siqueira e Paula, 1986). Em suma, as hifas minimizam o efeito do fator transporte na disponibilidade do fósforo.

Portanto deve-se atentar para o papel da planta na disponibilidade dos nutrientes. Além de se considerar a capacidade do solo em suprir, é necessário considerar a capacidade da planta em adquirir o nutriente, ou seja, o que a planta pode fazer para alterar a disponibilidade dos nutrientes. Portanto, para melhor entender o conceito de disponibilidade de nutrientes precisa-se considerar toda a plenitude da relação solo-planta-microrganismos.

Como se sabe, são utilizados vários métodos de análise do solo para avaliar a disponibilidade dos nutrientes. Sem dúvida, a tarefa dos extratores químicos é das mais difíceis. Neste sentido, deve ser ressaltado que a disponibilidade nem sempre pode ser expressa diretamente por um número.

---

#### 1.4. LEI DO MÍNIMO

Para maximização da produtividade vegetal, há necessidade de uma adequada disponibilidade de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, Cu, Mn, B, Mo e Cl. Caso contrário, a produção será limitada pelo nutriente em menor disponibilidade.

A lei do mínimo, formulada por Liebig em 1862, diz que a produção das culturas é limitada pelo nutriente em menor disponibilidade no solo, mesmo que todos os outros estejam disponíveis em quantidades adequadas. Apesar de não ser considerada uma lei propriamente dita, essa proposição simples deste químico alemão é de importância universal no manejo da fertilidade do solo, visando uma recomendação equilibrada de fertilizantes.

O equilíbrio de nutrientes é um conceito vital em fertilidade do solo, pensando-se na produção das culturas. O exemplo do Quadro 1.1. mostra como a aplicação de potássio, em solo com baixa disponibilidade deste nutriente, foi importante para a resposta da braquiária ao nitrogênio. Quando potássio não foi aplicado, não houve resposta ao nitrogênio (Carvalho et al., 1991).

**Quadro 1.1. Efeito da adubação com nitrogênio e potássio sobre a produção de matéria seca de *Brachiaria decumbens* Stapf (soma de três cortes).**

Nitrogênio aplicado (kg/ha/ano)	K <sub>2</sub> O aplicado (kg/ha/ano)		
	0	75	150
	.....t/ha.....		
50	11	14	14
100	13	15	18
200	12	16	20
400	12	18	25

Nos sistemas de exploração agrícola objetivando elevadas produtividades, a Lei do Mínimo ou Lei de Liebig torna-se de maior importância. Inclusive, devendo-se considerar a disponibilidade de nutrientes tais como enxofre, magnésio e micronutrientes. Infelizmente, os princípios básicos da proposição secular de Liebig são muitas vezes esquecidos pelos técnicos.

#### 1.5. LEI DOS INCREMENTOS DECRESCENTES

Idealmente, a aplicação de fertilizantes deve ser modulada pelo potencial de extração/exportação dos nutrientes pelas culturas. Além da preocupação em se fornecer todos os nutrientes de forma equilibrada, é preciso definir quantidades ótimas de cada nutriente em função da sua disponibilidade no solo e dos requerimentos nutricionais da

espécie vegetal a ser cultivada. Evidentemente tal definição não é tarefa tão fácil quanto parece, visto que vários fatores interagem afetando a disponibilidade de nutrientes no solo e a capacidade de resposta da planta à adubação.

Partindo-se de um solo deficiente em um dado nutriente, é de se esperar que a aplicação de fertilizantes promova aumento significativo na produção das culturas em geral. Acontece que, à medida que se eleva a quantidade do nutriente na adubação, não são obtidos ganhos em produtividade proporcionalmente correspondentes aos incrementos nas doses de fertilizantes. Em outras palavras, mesmo as plantas melhoradas visando altas produtividades apresentam potencial genético limitado no que tange à capacidade de assimilação e conversão de nutrientes em frutos, grãos, madeira ou fibra. Na prática o que se verifica são elevadas respostas às doses iniciais de nutrientes, havendo, a partir de determinado ponto, ganhos em produção decrescentes com o incremento nas quantidades de fertilizantes fornecidos (Figura 1.1).

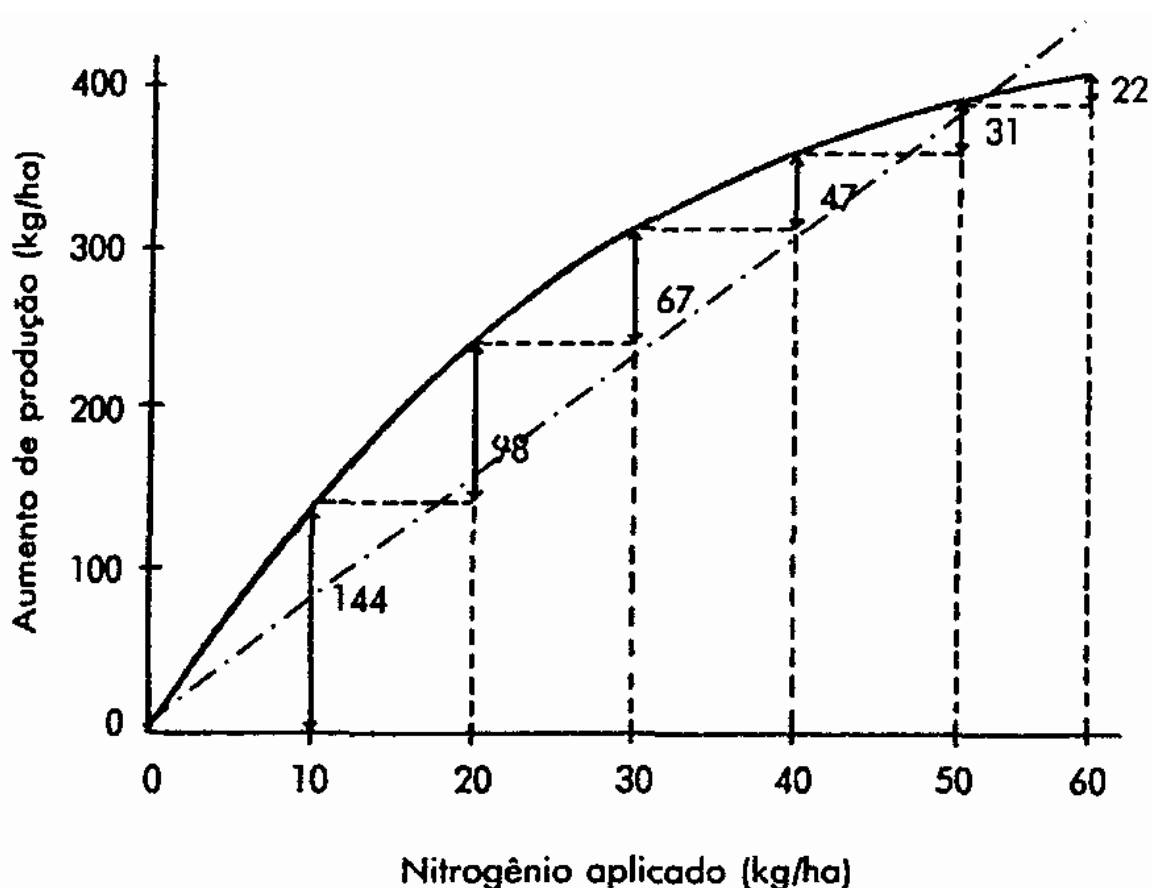


Figura 1.1. Curva de resposta do algodão ao fornecimento de nitrogênio, evidenciando os incrementos de produção para cada aumento de 10 kg N/ha. Diferentemente do que ocorre com os ganhos de produtividade, a reta tracejada representa a relação direta do custo da adubação com as doses crescentes do nutriente (Modificado de Raij, 1991).

Foram os estudos de Mitscherlich no início do Século XX que levaram à comprovação deste importante aspecto relacionado a nutrição mineral de plantas que influencia sobremaneira o manejo da fertilidade do solo. Considerando-se que os gastos com a adubação aumentam linearmente com as doses de fertilizantes empregadas, o mesmo não ocorrendo com os retornos em produção, conclui-se que a melhor relação custo/benefício não está necessariamente ligada à obtenção da máxima produtividade (Figura 1.1). Na realidade, o que se busca é a produtividade ótima econômica ou produtividade máxima econômica (PME), a qual normalmente situa-se entre 80-90% da produtividade máxima. Regionalmente e para cada situação de manejo das culturas, a estimativa da PME deve-se constituir no referencial para o dimensionamento das adubações.

## 1.6. FERTILIDADE DO SOLO E PRODUTIVIDADE

Quando se almeja a maximização da produtividade das culturas, não deve-se considerar apenas a fertilidade do solo. Em termos do manejo da produção vegetal, além da calagem e da adubação, deve-se considerar outras práticas que também afetam a produção. Portanto, é preciso observar o adequado preparo do solo, o controle da erosão, o suprimento de água, o uso de variedades mais produtivas, a densidade e época de plantio e o controle de pragas e doenças.

Dois tipos de interação envolvendo a fertilidade do solo são de destaque na agricultura moderna. A primeira diz respeito a interação do manejo da fertilidade com a irrigação e a segunda, a interação com o potencial genético – variedades mais produtivas. Apenas são obtidos os benefícios esperados da irrigação e do uso de variedades mais produtivas se houver disponibilidade suficiente de nutrientes. Portanto, em agricultura altamente tecnificada, calagem e adubação são duas práticas de crucial importância, dado ao aumento da demanda de nutrientes.

O efeito do cultivo de sequeiro ou irrigado, sob doses crescentes de nitrogênio, na produção de colza, é mostrado na Figura 1.2 Em primeiro lugar, observa-se o grande efeito da irrigação na produção desta oleaginosa. Em segundo lugar, observa-se que a resposta a nitrogênio é muito maior sob adequada disponibilidade de água. A aplicação de 168 kg/ha de nitrogênio, em cultivo irrigado, promoveu um aumento de cerca de quatro vezes na produção.

Fazendo-se uma ampliação da Lei de Liebig, para todos os fatores da produção vegetal, observa-se claramente o efeito limitante da baixa disponibilidade de água no solo na resposta das plantas à adubação. E, da mesma forma, é preciso haver disponibilidade suficiente de nutrientes para fazer-se o melhor uso possível da água disponível e do potencial produtivo das plantas geneticamente melhoradas.

---

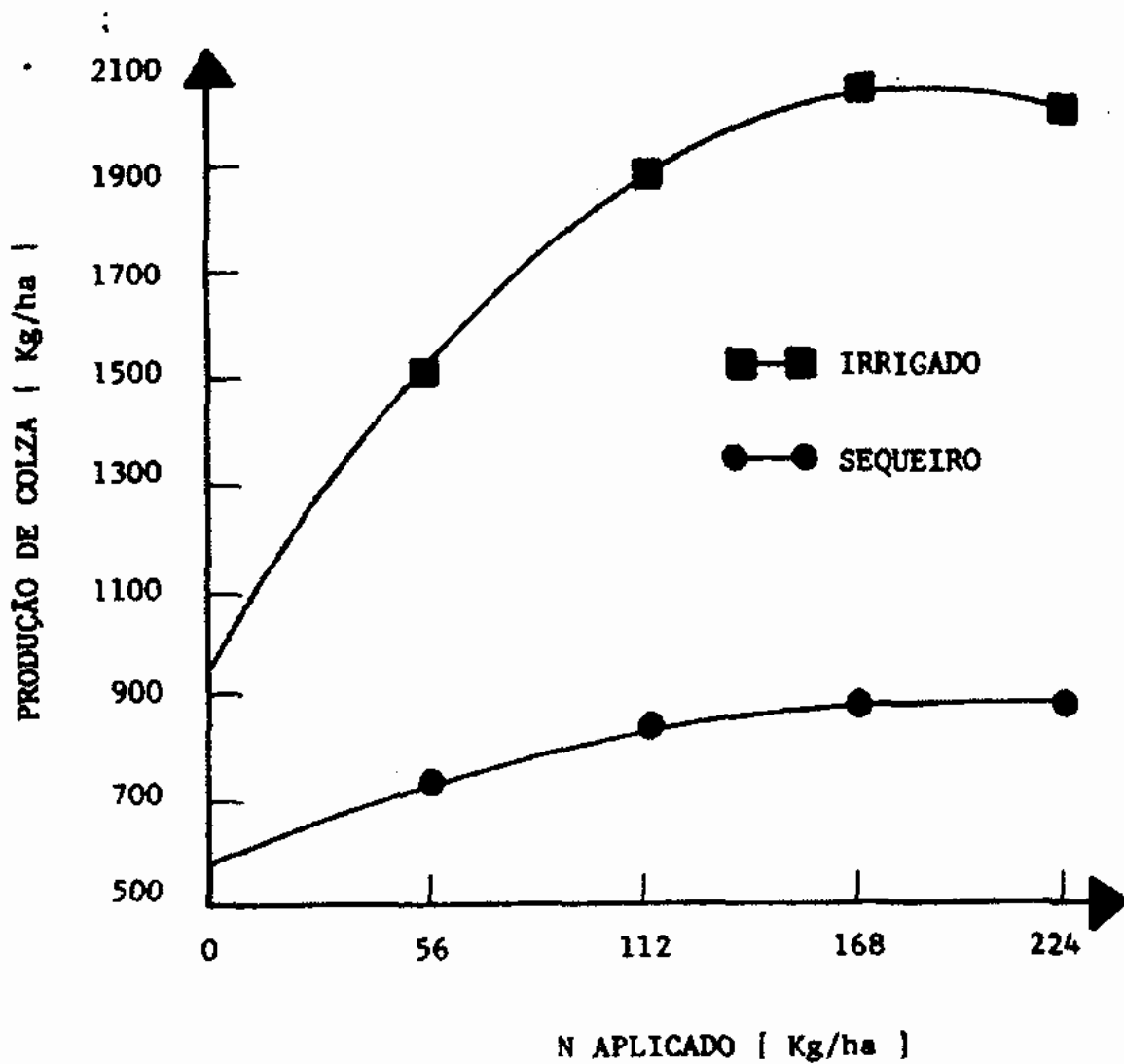


Figura 1.2. Efeito da adubação nitrogenada na produção de Colza em cultivo de sequeiro ou irrigado (Henry & Mac Donald, 1978)



## ASPECTOS GERAIS DO MANEJO DA FERTILIDADE DO SOLO

---

Os solos férteis permitem a obtenção de elevadas produtividades, sem uso de corretivos ou de fertilizantes. Todavia, essa situação envolve uma minoria muito restrita de solos e, mesmo se for o caso, em função da retirada dos nutrientes pelas colheitas, não são capazes de sustentar a produtividade por longo prazo.

A partir dos conhecimentos em fertilidade do solo e da avaliação da capacidade dos solos de suprir nutrientes para as plantas, pode-se, quando necessário, fazer o correto manejo da fertilidade do solo, representado pela adoção de Práticas Conservacionistas, Corretivas e de Adubação (Figura 2.1).

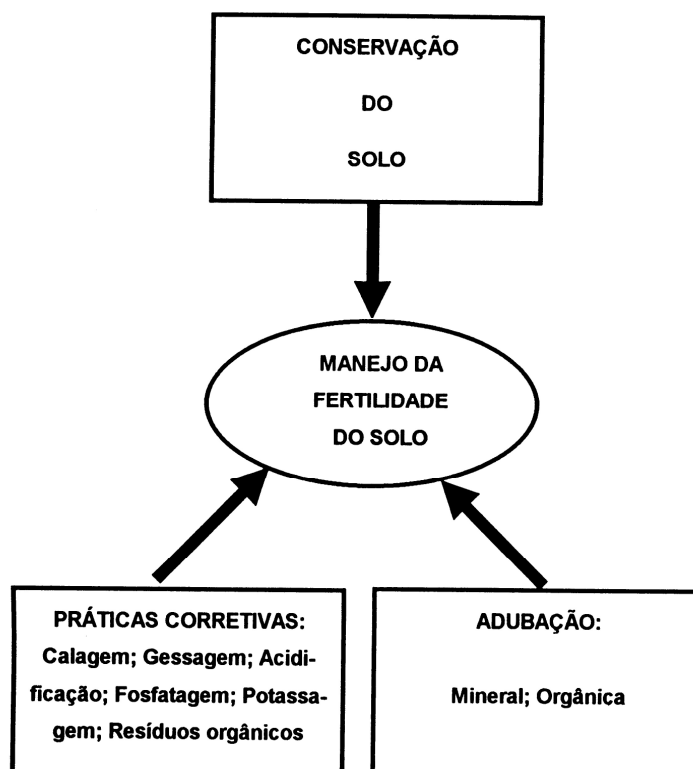


Figura 2.1. Práticas envolvidas no manejo da fertilidade do solo

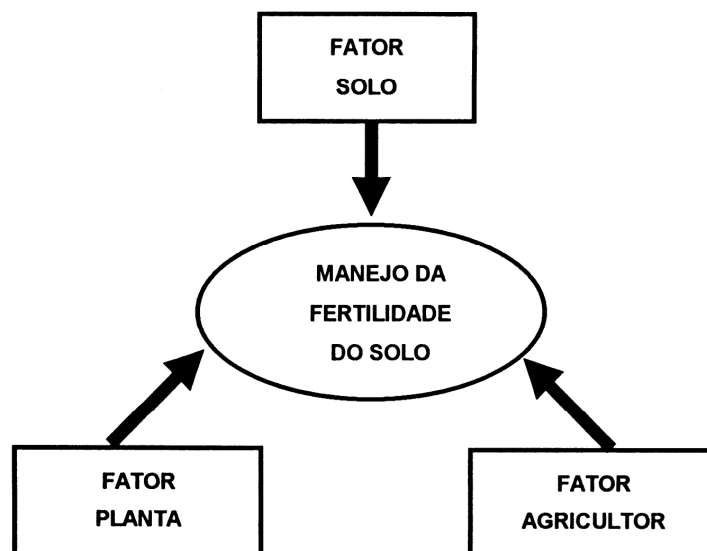
---

Este livro não objetiva abordar práticas conservacionistas, todavia, é preciso estar atento para o fato de que o manejo da fertilidade do solo inicia-se pela Conservação do Solo (Figura 2.1). No mínimo, tal prática permite minimizar o decréscimo ou manter a fertilidade natural do solo. E, no caso da realização de práticas corretivas e de adubação, a conservação do solo contribui para maximizar a eficiência dessas práticas. Ademais, neste último caso, reduz a eutroficação e contaminação de lagos e rios. É lamentável observar que a maioria dos agricultores não faz uso de práticas conservacionistas, em grande parte pela inexistência de políticas do poder público neste sentido. Sem dúvida, como acontece em países desenvolvidos, o poder público tem um importante papel a ser desempenhado, pois, conservar o solo é também conservar a água. Isto é, os problemas advindos do mau uso do solo extrapola o meio rural e afeta o suprimento de água e de energia elétrica nas cidades.

Conforme será discutido adiante, as práticas corretivas também acabam assumindo a conotação de práticas de adubação. A calagem, por exemplo, além de ser uma prática de correção da acidez do solo, constitui-se, numa prática de adubação com cálcio e magnésio quando do uso de calcário dolomítico.

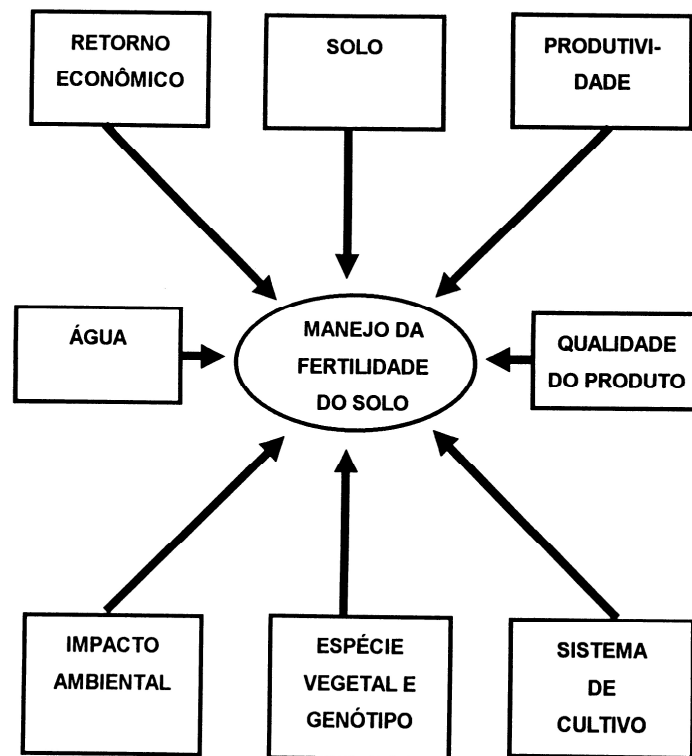
## 2.1. FATORES ENVOLVIDOS NO MANEJO DA FERTILIDADE DO SOLO

Ao realizar o manejo da fertilidade do solo, no tocante a recomendação de práticas corretivas ou de adubação, o técnico precisa estar atento para três fatores básicos (Figura 2.2). Considerando o nível tecnológico do agricultor, a forma com que ele faz uso do solo e com uma visão mais completa dos aspectos envolvidos na exploração vegetal, pode-se ampliar e especificar melhor os fatores envolvidos no manejo da fertilidade do solo (Figura 2.3).



**Figura 2.2. Fatores básicos a serem considerados para a correta recomendação de práticas corretivas e de adubação.**

---



**Figura 2.3.** Fatores envolvidos no manejo da fertilidade do solo, enfatizando aspectos ligados ao agricultor e aspectos ligados a exploração vegetal.

No que diz respeito ao fator solo, torna-se necessário considerar que os ganhos em produtividade e, por consequência, o retorno econômico do manejo da fertilidade do solo apenas são maximizados quando se abrange, em realidade, toda a complexidade deste fator. Neste sentido, tem-se que levar em consideração a profundidade efetiva, o grau de compactação, condições de drenagem, e, de forma direta, os aspectos químicos do solo.

O adequado conhecimento das exigências nutricionais, em termos de quantidades e época de exigência, e, da capacidade de adaptação a condições adversas do solo das diferentes espécies vegetais, bem como dos diferentes genótipos dentro de uma mesma espécie é de crucial importância no manejo da fertilidade do solo. Afinal, toda e qualquer recomendação, obviamente, é para atender a planta. Assim, oportunamente, serão discutidos aspectos relacionados com a quantidade e tipo de calcário a ser utilizado para espécies e genótipos de uma mesma espécie, dada à grande variação na tolerância à acidez do solo entre as plantas. Também, nos mais variados exemplos, o mesmo acontece com a prática da adubação, que tem suas especificidades relacionadas com as exigências nutricionais, o porte e ciclo do genótipo.

O fator água afeta grandemente o manejo da fertilidade do solo, por tratar-se de fator de extrema importância na produtividade vegetal. A maximização da resposta a adubação requer uma adequada disponibilidade de água. Assim, por exemplo, uma recomendação de adubação nitrogenada em cobertura terá de ser compatibilizada com a

precipitação, podendo até não ser realizada, em uma condição mais prolongada de veranico na época de realização da mesma.

Por outro lado, na agricultura moderna, a irrigação altera sobremaneira o manejo da fertilidade do solo. Como podem ser conseguidas produtividades mais elevadas, há aumento na demanda de nutrientes. E, se for feita opção pela fertirrigação, tem-se que considerar importantes aspectos na prática da adubação, relacionados com a escolha dos nutrientes a serem aplicados via irrigação, com a escolha dos fertilizantes a serem utilizados e com o parcelamento das adubações.

Também, na agricultura moderna o sistema de cultivo promove alterações no manejo da fertilidade do solo. No sistema de plantio direto, quando comparado com o plantio convencional, o técnico terá de atentar para certas peculiaridades do manejo da fertilidade do solo, desde a forma de se proceder a calagem antes da instalação do sistema até a escolha do fertilizante nitrogenado visando maior eficiência da adubação em cobertura sobre a palhada.

A produtividade esperada, definida em última instância pelo nível tecnológico do agricultor, é outro importante fator a ser considerado no manejo da fertilidade do solo. Inclusive, nos boletins de recomendação de adubação, de uma forma ou de outra, este fator aparece com destaque.

Algumas vezes, a qualidade do produto colhido chega a assumir maior importância do que a produtividade. Um exemplo diz respeito a produção de frutas para o mercado externo, que necessitam apresentar qualidade visual – aspecto externo –, resistência ao armazenamento e transporte. Afim de se obter a qualidade esperada na fisiologia pós-colheita, as frutas precisam ser bem nutridas, notadamente em potássio. Os exemplos se sucedem quanto ao papel da nutrição no teor de metabolitos – proteínas, óleo, açúcares, vitaminas e outros – no produto colhido e no teor de minerais em pastagens e forrageiras. E, de outro lado, quanto à presença de contaminantes, notadamente em hortaliças, quando do uso de resíduos industriais e urbanos como fertilizantes.

Em muitos países, inclusive no Brasil, tem-se aumentado o uso de resíduos industriais, lixo e lodo de esgoto tratados, os quais servem como fertilizantes. Produtos desta natureza, muitas vezes, podem promover acúmulo de metais pesados no solo ou, até mesmo em águas subterrâneas. Também, o uso de fertilizantes nítricos de forma indiscriminada pode se constituir em indesejável contaminação de águas subterrâneas com nitrato. Enfim, no manejo da fertilidade do solo, cada vez mais, precisa-se considerar o impacto ambiental pelo uso de corretivos e de fertilizantes minerais ou orgânicos.

Dentre os fatores destacados na Figura 2.3, o adequado conhecimento dos aspectos químicos e físicos do **solo** pode ser considerado como o ponto de partida no manejo da fertilidade do mesmo. Neste sentido, entende-se por adequado conhecimento, a análise mais completa possível do solo, realizada em profundidade no perfil do mesmo.

De forma mais direta e específica, tal conhecimento tem de ser buscado numa adequada avaliação da fertilidade do solo, fazendo-se uso dos métodos de avaliação, notadamente da análise química do solo (Figura 2.4). Este é o único método que permite

o conhecimento adequado da capacidade de um dado solo de suprir nutrientes para as plantas antes do plantio. Portanto, é o mais usado em todo o mundo.

Enfim, antes de qualquer atuação em termos do manejo da fertilidade, é preciso ter a noção exata de que o solo é um dos sistemas mais complexos da natureza, variando grandemente no tempo e espaço em seus aspectos físicos, biológicos e químicos.

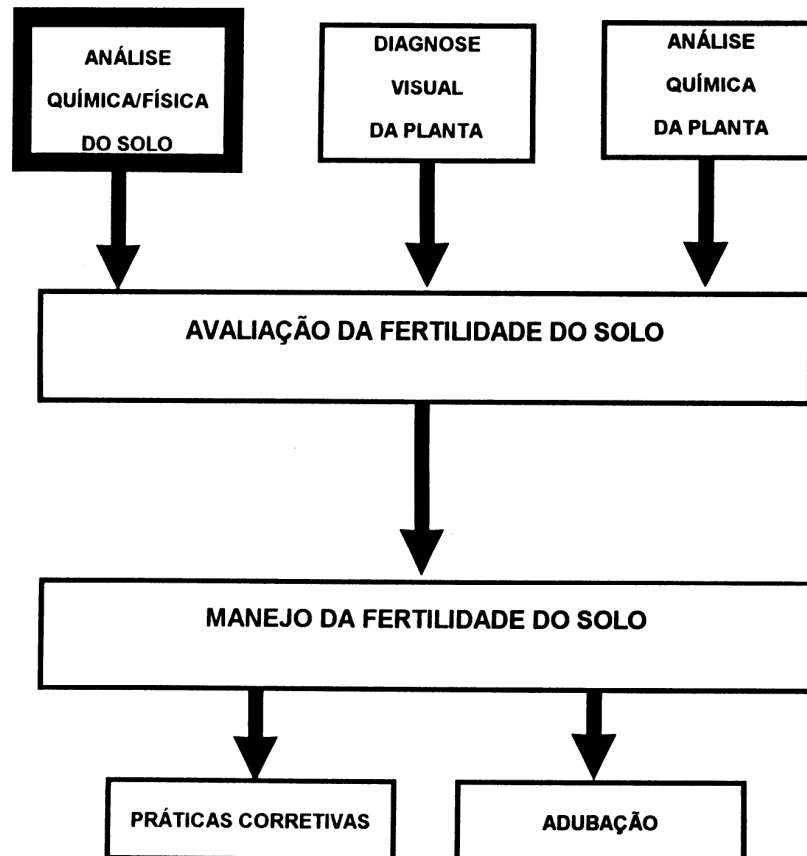


Figura 2.4. Métodos de avaliação da fertilidade do solo para fins de manejo – recomendação de práticas corretivas e de adubação.

## **INTERAÇÃO NUTRIENTE - SOLO**

---

O sistema solo é bastante complexo, composto de quatro fases bem distintas – sólida, líquida, gasosa e viva. O objetivo deste capítulo é fazer uma breve revisão das interações entre nutrientes e o sistema solo, enfocando a importância de cada uma das fases do solo.

Para maior aprofundamento no estudo da dinâmica de cada nutriente no solo, o que será feito para cada um deles em capítulos seguintes, é preciso, de forma generalizada, ressaltar os aspectos das interações entre nutriente e solo.

No que tange ao suprimento de nutrientes às plantas, maior ênfase será dada para as interações com a fase líquida e sólida que são, respectivamente, a fonte imediata e o reservatório dos nutrientes. Por outro lado, não se pode deixar de considerar o papel das fases gasosa e viva, que implicam em processos de oxi-redução e processos biológicos de importância na disponibilidade dos nutrientes.

### **3.1. O AR DO SOLO**

A existência de partículas sólidas no solo, de diferentes tamanhos e formatos, resulta na existência de espaços vazios ou poros entre as partículas. Se as partículas unitárias formam agregados através da ação de agentes agregantes como matéria orgânica e óxidos de ferro e de alumínio que promovem a estruturação do solo, originam poros ainda maiores.

O espaço vazio do solo é variavelmente ocupado por água ou por ar. A composição do ar existente nos poros do solo difere da do ar atmosférico basicamente por apresentar uma maior concentração de CO<sub>2</sub>, produzido pela respiração das raízes e na decomposição da matéria orgânica.

Para a grande maioria das espécies vegetais, há necessidade de uma boa aeração do solo, pois, o oxigênio do ar do solo é essencial para a respiração das raízes e microrganismos. Através da respiração gera-se energia para vários processos metabólicos, inclusive para a absorção de nutrientes. Portanto, um solo mal aerado pode não expressar todo o potencial de suprimento de nutrientes, porque o mesmo não permite

---

geração de energia nas raízes para absorção dos nutrientes. Nesta situação, com base no conceito de disponibilidade discutido no Capítulo 1, o nutriente não é disponível.

Sabe-se que as plantas diferem quanto a sensibilidade ao suprimento de oxigênio. O arroz pode ser cultivado em condições de completa inundação do solo, devido a sua capacidade de oxigenar a raiz, e, até mesmo, a rizosfera. Por sua vez, o fumo é tão sensível ao decréscimo da pressão parcial de oxigênio no solo que a inundação de algumas horas causa sérios danos ou completa perda da lavoura.

Em termos de interação dos nutrientes com a fase gasosa, pensando-se no suprimento direto de nutrientes às plantas, não há qualquer importância desta fase, dado a inexistência de nutrientes na forma gasosa. A exceção fica por conta do nitrogênio, que apresenta-se no solo também na forma de gás  $N_2$ . Todavia, nenhuma espécie vegetal é capaz de absorver essa forma gasosa. A importância do gás nitrogênio fica restrita ao processo de sua fixação biológica por organismos do solo, com o posterior fornecimento de formas minerais às plantas. De maior importância para a produção vegetal é a fixação simbiótica realizada por bactérias do gênero *Rhizobium*, que transferem o gás  $N_2$ , após sua transformação em forma mineral, para as raízes de leguminosas. O cultivo da soja sob fixação sim biótica do nitrogênio já é uma realidade, eliminando a prática da adubação nitrogenada para tal cultura.

Foi destacada a importância do ar do solo para o suprimento de gás oxigênio às raízes, para a manutenção do processo de absorção dos nutrientes – importante fator a afetar a disponibilidade dos mesmos. Entretanto, é preciso destacar também que a falta de oxigênio tem conseqüências diretas na dinâmica de certos nutrientes, em alguns casos aumentando sua disponibilidade, em outros, diminuindo-a.

O predomínio de condições redutoras no solo, devido a redução crescente na concentração de oxigênio, promove mudança no metabolismo microbiano, passando de aeróbico para anaeróbico. Se o metabolismo for aeróbico, o receptor de elétrons é o oxigênio, que é reduzido a água. Na ausência crescente de oxigênio, outras substâncias ou íons – nitrato, sulfato e metais – passarão a ser os receptores de elétrons, sofrendo redução. No Quadro 3.1. é apresentada a seqüência das reações de redução no solo.

Inicialmente, observa-se no Quadro 3.1. que a inundação do solo promove consumo de íons  $H^+$ . Tal consumo promove elevação do pH do solo, com conseqüente insolubilização de íons alumínio. Portanto, em solos inundados, a elevação do pH pode aumentar a disponibilidade de fósforo e de molibdênio, pela liberação desses nutrientes ligados a ferro e a alumínio.

---

**Quadro 3.1. Seqüência termodinâmica de reações de redução em solos e potenciais de oxi-redução correspondentes (Fonte: Ponnampuruma, 1977).**

Reações	Potencial de oxi-redução corrigido a pH 7,0	
	Eo (V)	pEo
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	0,814	13,80
$2NO_3^- + 12H^+ + 10e^- \rightarrow N_2 + 6H_2O$	0,741	12,66
$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	0,401	6,80
$F(OH)_3 + 3H^+ + e^- \rightarrow Fe^{2+} + 3H_2O$	-0,185	-3,13
$SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e^- \rightarrow H_2S + 4H_2O$	-0,214	-3,63
$CO_2 + 8H^+ + 8e^- \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	-0,244	-4,14
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	-0,413	-7,00

Todavia, observa-se ainda no Quadro 3.1. que pequenos decréscimos na concentração de oxigênio promove a redução do nitrato – prontamente disponível às plantas – para formas gasosas, que são perdidas por volatilização. Conforme será destacado no Capítulo 11, esta redução do nitrato em solos inundados, compactados pelo trânsito excessivo de máquinas ou, até mesmo, em solos aerados com anaerobiose localizada, representa uma das principais formas de perdas do nitrogênio do sistema solo. Enfim, é importante pela diminuição na disponibilidade deste nutriente.

Com a intensificação das condições de redução, observa-se no Quadro 3.1. que manganês e, a seguir, ferro são reduzidos. As formas divalentes destes dois nutrientes são muito mais solúveis e são as formas absorvidas pelas plantas. Portanto, com a diminuição da aeração do solo as suas disponibilidades são aumentadas. Todavia, conforme será discutido no Capítulo 17, os micronutrientes em excesso são altamente tóxicos às plantas. Em solos com alto teor de óxido de ferro, o arroz cultivado sob inundação pode sofrer sérios danos pela toxidez de ferro. E, por exemplo, no caso do manganês, culturas mais sensíveis como a soja podem ter problemas em solos ricos em óxidos de manganês, sob anaerobiose. Neste último caso, não há necessidade de inundação total, mas, anaerobiose momentânea, o que é facilmente obtido em solos mais compactados e com precipitação mais elevada.

### 3.2. A SOLUÇÃO DO SOLO

Já foi ressaltada a importância da aeração do solo, que, para uma boa produção vegetal, não necessita ocupar muito mais do que 50% do volume de poros do solo. Isto porque, há necessidade também de uma boa disponibilidade de água no solo, em função do destacado papel que a mesma exerce no crescimento e desenvolvimento das plantas.

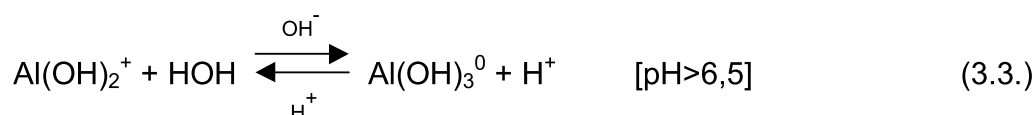
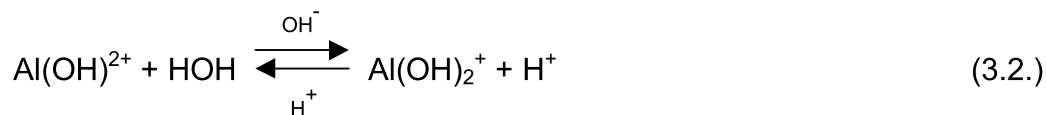
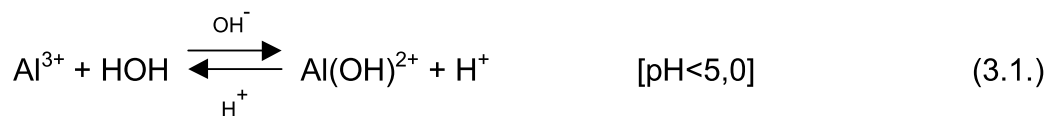


Com respeito ao suprimento de nutrientes às plantas, não se pode considerar a fase líquida do solo como água pura, mas sim uma solução, na qual estão dissolvidos diversos solutos, principalmente os nutrientes. A solução do solo representa a fonte imediata de nutrientes às plantas, ou seja, a absorção pelas raízes ocorre apenas a partir da solução do solo.

Alguns nutrientes apresentam-se na solução em formas catiônicas enquanto outros em formas aniônicas, que são as únicas formas absorvidas pelas plantas. As principais formas são as seguintes:  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{MoO}_4^{2-}$ ,  $\text{HMoO}_4^-$ . O boro representa uma exceção pois encontra-se na solução do solo na forma neutra  $\text{H}_3\text{BO}_3^0$ .

Além dos nutrientes, precisa-se considerar a presença de íons  $\text{H}^+$  e  $\text{OH}^-$ , que definem o pH da solução do solo, o qual se constitui no principal fator a afetar a disponibilidade dos nutrientes, conforme será mostrado no estudo de cada nutriente.

Também, precisa-se considerar a presença de elementos tóxicos, principalmente do alumínio em solos ácidos. Este elemento, em função do pH da solução, apresenta-se nas formas solúveis  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$  ou  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ , de acordo com as reações 3.1. a 3.3. E, ainda, em solos salinos o sódio pode apresentar-se em elevados teores na solução do solo, na forma  $\text{Na}^+$ .



Os mais diversos compostos orgânicos, resultantes da atividade microbiana ou da exsudação das raízes, são de grande importância na solução do solo, notadamente para a disponibilidade de nutrientes. Os micronutrientes catiônicos podem apresentar-se na solução do solo em formas complexadas ou quelatadas com radicais orgânicos. Nestas formas, a solubilidade e, conseqüentemente, o transporte até a superfície radicular, são aumentados sobremaneira. Portanto, nessas formas, a disponibilidade dos mesmos é maior.

Embora a solução do solo seja a fonte imediata de nutrientes para as plantas, o teor dos mesmos na fase líquida é muito baixo, mesmo em solos férteis. No caso do fósforo, por exemplo, seu teor na solução é quase desprezível.

Além do baixo teor de nutrientes, a solução do solo está sujeita a variações de concentração, mesmo a curtas distâncias, e apresenta-se irregularmente distribuída nos poros do solo.

Portanto, é muito difícil determinar a real concentração de nutrientes na solução do solo. Devido a isto, e considerando que o suprimento de nutrientes às plantas fica quase que exclusivamente na dependência da fase sólida do solo, as avaliações de disponibilidade de nutrientes não envolvem análise da solução do solo.

A capacidade do solo em suprir nutrientes às plantas está, em termos práticos, ligada ao teor de nutriente disponível na fase sólida. Há necessidade de reposição dos nutrientes da solução, à medida que são absorvidos pelas plantas, através da liberação contínua dos mesmos da fase sólida. Em geral, com o que existe apenas na solução, a planta não consegue adquirir a quantidade de nutriente demandada para um dia sequer de crescimento.

### **3.3. OS COMPONENTES SÓLIDOS DO SOLO**

A fase sólida do solo é representada pelos componentes minerais ou inorgânicos e pelos componentes orgânicos.

Os componentes minerais representam a maior parte da fase sólida dos solos bem drenados. Apenas em condições de má drenagem, onde o acúmulo de matéria orgânica é superior à decomposição, é que os componentes orgânicos podem predominar. Mas, os solos orgânicos são de ocorrência restrita. Todavia, conforme será ressaltado adiante, apesar do predomínio dos componentes minerais, os componentes orgânicos, mesmo em pequenas quantidades, são de extrema importância no sistema solo.

Em termos de suprimento de nutrientes às plantas pelos componentes minerais, tem-se que os minerais primários, mais associados às frações areia e silte, apenas liberam nutrientes para a solução através da intemperização. Entretanto, trata-se de uma liberação muito lenta e depende do mineral primário predominante. Em solos tropicais é muito comum o predomínio de quartzo na fração grosseira, mineral muito resistente ao intemperismo, que não contribui em nada com o suprimento de nutrientes para a solução do solo. Em solos mais jovens e em camadas mais profundas de solos, a presença de minerais primários, tais como feldspatos e micas, pode representar uma importante fonte de nutrientes mais a longo prazo.

Situação semelhante à reportada para os minerais primários, quanto ao suprimento de nutrientes para a solução do solo, experimentam os componentes orgânicos do solo, representados pela matéria orgânica ainda não decomposta. A matéria orgânica não decomposta, quando adicionada ao solo, libera nutrientes para a solução através da decomposição, que, apesar de ser um processo bem mais rápido que o da intemperização dos minerais primários, tem de ser visto como uma liberação em potencial.

---

Quando considera-se que a quantidade de nutriente existente na solução do solo é suficiente para atender a demanda da planta de um ou pouco mais dias, dependendo do teor do nutriente na solução e da cultura instalada, precisa-se entender como a fase sólida pode ressuprir a solução no dia a dia de crescimento da lavoura. O ressuprimento da solução a curtíssimo prazo é feito pelos minerais secundários da fração argila – minerais de argila e óxidos de ferro e de alumínio – e pela matéria orgânica bem decomposta – húmus.

Os minerais secundários e as frações húmicas da matéria orgânica apresentam-se, normalmente, como colóides e, como tal, são os principais responsáveis pela atividade química dos solos. Basicamente, a atividade química deve-se a uma propriedade fundamental dos sistemas coloidais, que é o desenvolvimento de cargas elétricas.

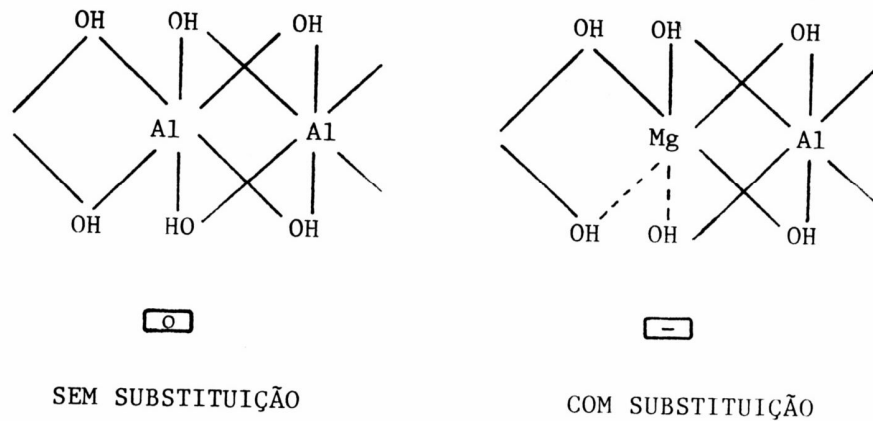
Com a existência de cargas elétricas na superfície dos colóides, a fase sólida torna-se capaz de reter os cátions e ânions liberados para a solução pelo intemperismo dos minerais primários ou pela decomposição da matéria orgânica ou, ainda, adicionados na solução através da adubação. Uma vez retidos – adsorção – nas cargas elétricas do sistema solo, os nutrientes podem ser prontamente liberados – dessorção – para a solução, à medida que as raízes vão absorvendo os mesmos. Sem a existência das cargas elétricas, os nutrientes seriam perdidos para camadas mais profundas, com a percolação da água, através do processo de lixiviação.

### 3.4. DESENVOLVIMENTO DE CARGAS ELÉTRICAS EM SOLOS

Os colóides do solo podem desenvolver tanto cargas negativas quanto positivas. Entretanto, há o predomínio de cargas negativas, as quais podem ser permanentes ou variáveis.

As cargas negativas permanentes existem na estrutura dos minerais de argila, notadamente no tipo 2:1, devido a substituições isomórficas. Na estrutura dos cristais de montmorilonita, vermiculita ou illita, alguns átomos de  $\text{Si}^{4+}$  dos tetraedros são substituídos por  $\text{Al}^{3+}$  e alguns átomos de  $\text{Al}^{3+}$  dos octaedros são substituídos por  $\text{Mg}^{2+}$ . Tais substituições resultam em excesso de cargas negativas na superfície dos cristais, conforme esquematizado na Figura 3.1.

---



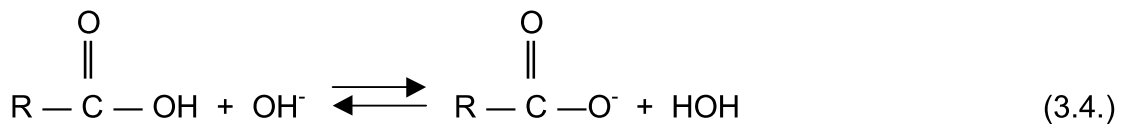
**Figura 3.1 Representação esquemática do desenvolvimento de carga negativa permanente em mineral de argila, em função de substituição isomórfica na camada octaédrica.**

A illita, montmorilonita e vermiculita apresentam elevada densidade de carga negativa permanente, resultando na capacidade de retenção de cátions de 30-50, 80-120 e 100-150  $\text{cmol}/\text{dm}^3$ , respectivamente. Infelizmente, esses três minerais de argila são raros em solos do Brasil, notadamente nos latossolos.

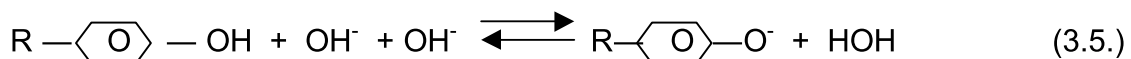
As cargas variáveis, assim denominadas por terem seu desenvolvimento afetado pelo pH do solo, podem ser negativas ou positivas.

Os colóides orgânicos, com a elevação do pH do solo, apresentam aumento na densidade de cargas negativas, devido à dissociação das oxidrilas da superfície, por exemplo, nos grupos carboxílicos e fenólicos, conforme apresentado nas reações 3.4. e 3.5.

O íon  $\text{H}^+$  liga-se ao oxigênio na formação da oxidrila através de ligação covalente, que é muito forte. Portanto, neste caso, a carga ocupada pelo íon  $\text{H}^+$  apenas é liberada – desenvolvida – para retenção de outro cátion da solução do solo, através da neutralização direta, ou seja, em reação com  $\text{OH}^-$  da solução, para formar água.



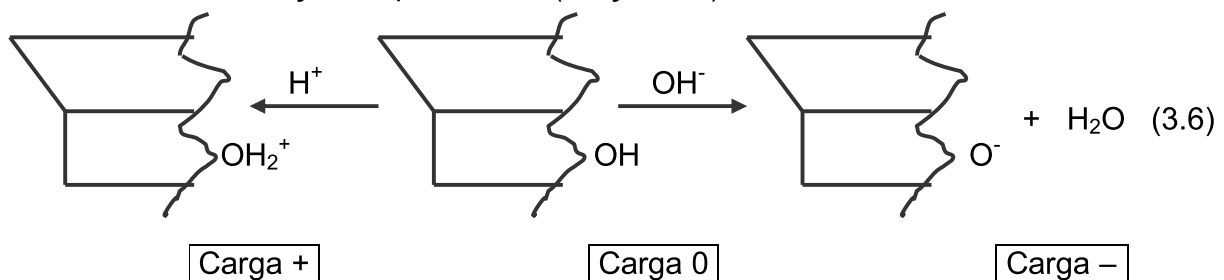
Grupos Carboxílicos



Grupos Fenólicos

A densidade de carga negativa nos colóides orgânicos é elevada e muito variável, dado a grande variedade de compostos orgânicos existentes no solo. Apresenta valores de retenção de cátions da ordem de 200 a 400  $\text{cmol}_e/\text{dm}^3$ . Com valores desta magnitude, a matéria orgânica, mesmo em pequenas quantidades no solo, é a principal responsável pela capacidade de retenção de cátions nos solos brasileiros, principalmente quando faz-se uso da calagem.

A caulinita, mineral de argila de ocorrência mais generalizada nos solos brasileiros, tem uma densidade de carga negativa muito reduzida. Com isto, a capacidade de retenção de cátions é de 3 a 15  $\text{cmol}_e/\text{dm}^3$ . As cargas desenvolvidas são do tipo variável também devido a dissociação de oxidrilas da superfície – nas arestas da estrutura do mineral – com a elevação do pH do solo (reação 3.6).



Os óxidos de ferro e de alumínio também apresentam cargas variáveis, em função do pH do solo. Todavia, esses minerais secundários podem desenvolver tanto, cargas negativas quanto positivas (Figura 3.2.) com a elevação do pH ocorre a dissociação das oxidrilas e, conseqüentemente, o desenvolvimento de cargas negativas. Por outro lado, com a acidificação do solo, ocorre a protonação das oxidrilas com o conseqüente desenvolvimento de cargas positivas.

Esses óxidos são abundantes na fração argila dos solos brasileiros. Todavia, a densidade de carga por eles desenvolvidas é muito baixa. Portanto, como apenas estes colóides é que desenvolvem carga positiva, conclui-se que a retenção de ânions em solos, via adsorção a cargas positivas, é muito menos expressiva que a retenção de cátions.

Os óxidos de ferro e de alumínio, além de contribuírem muito pouco para o desenvolvimento de cargas elétricas no solo, podem, na verdade, reduzir a densidade de cargas negativas de minerais de argila, através do bloqueio de cargas negativas. O desbloqueio de cargas negativas ocupadas por óxidos de alumínio pode ser conseguido com a elevação do pH do solo, conforme mostra a figura 3.3.

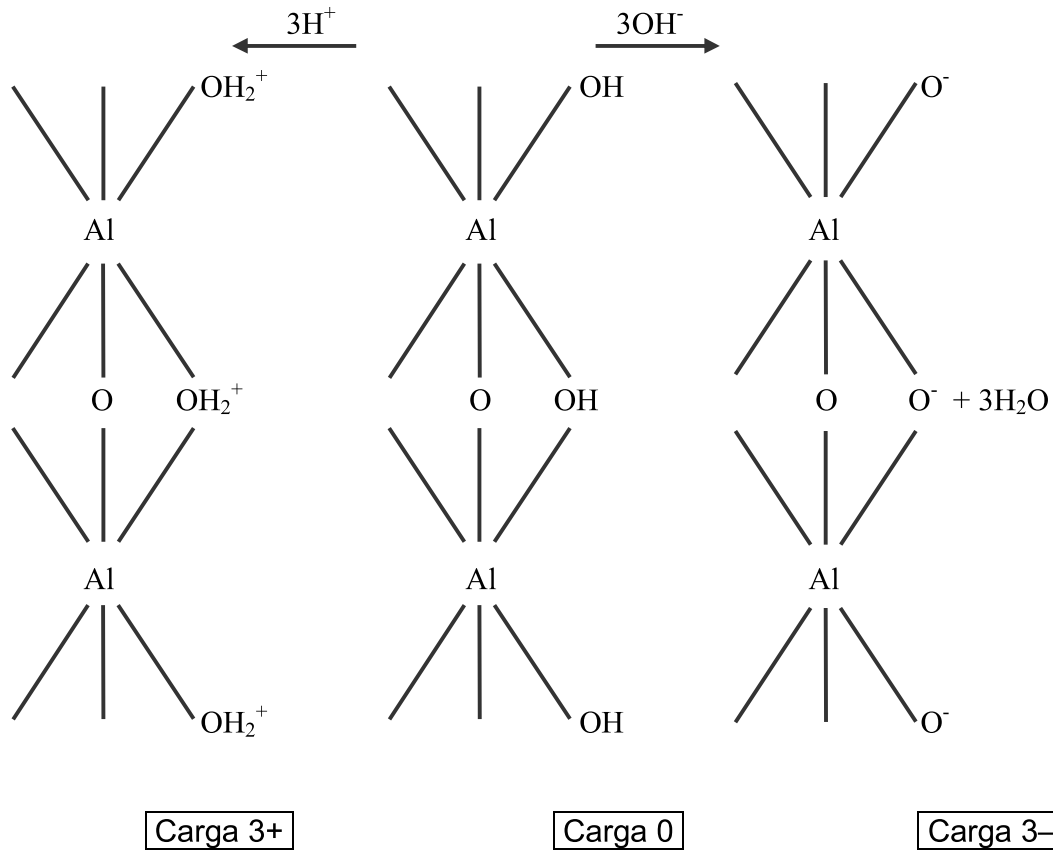


Figura 3.2. Representação esquemática do desenvolvimento de cargas positivas e negativas variáveis na gibbsite.

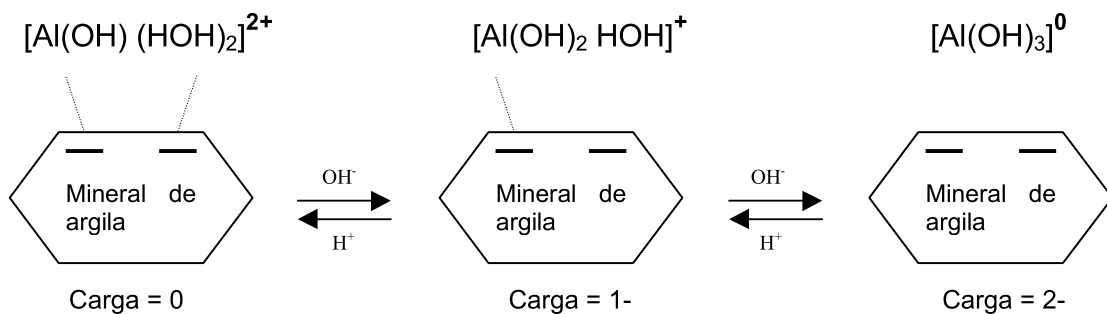


Figura 3.3. Representação esquemática do bloqueio e desbloqueio de cargas negativas de minerais de argila por óxidos de alumínio.

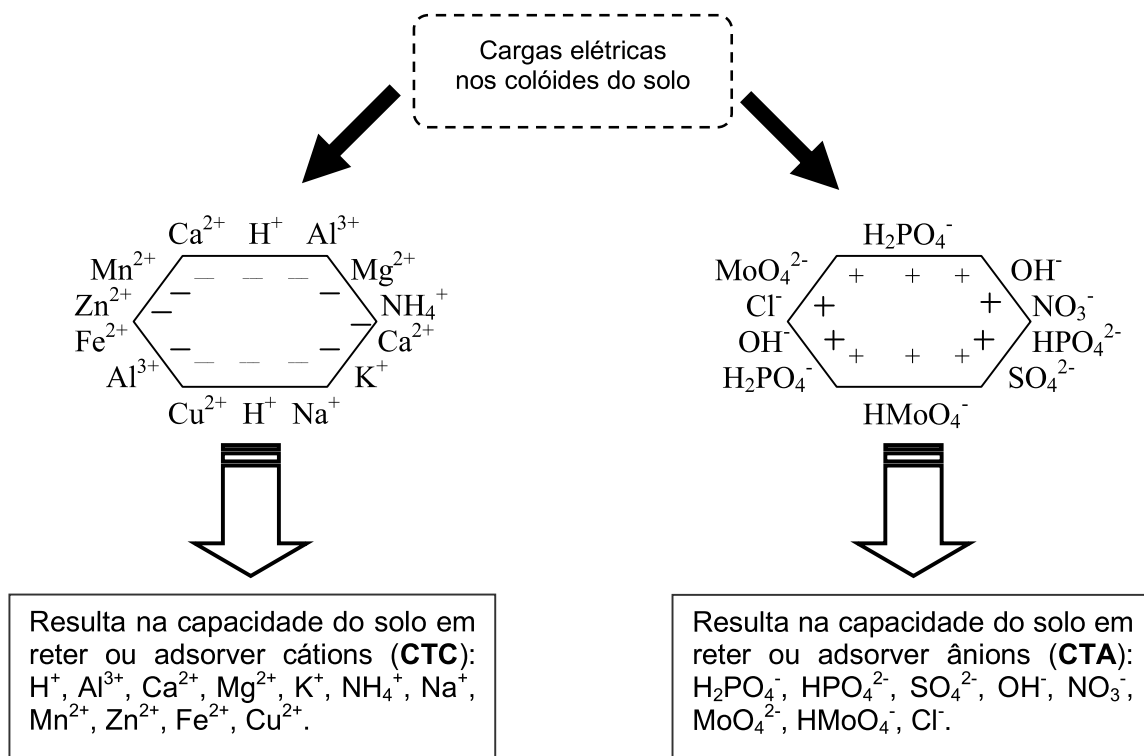
### 3.5. RETENÇÃO E TROCA DE ÍONS NO SOLO

Conforme já destacado, uma característica fundamental dos solos diz respeito a capacidade dos colóides em desenvolver cargas negativas ou positivas. O

desenvolvimento de cargas promove a adsorção de cátions e de ânions da solução do solo, os quais tendem a ser trocáveis com outros cátions e ânions presentes em solução.

Assim, na avaliação da capacidade do solo em suprir nutrientes às plantas, precisa-se considerar a relação entre a fase líquida e a sólida. A primeira representa a fonte imediata, de onde os nutrientes são absorvidos. A segunda representa o grande reservatório de nutrientes, ressuprindo a solução do solo à medida que os nutrientes são absorvidos da solução pelas raízes.

O esquema a seguir, resume o que foi dito até então para a retenção de íons no solo:



A retenção de íons pela fase sólida do solo não envolve apenas a adsorção em cargas elétricas desenvolvidas na superfície dos colóides. No caso dos cátions Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e Na<sup>+</sup> a adsorção às cargas negativas é direta, ocorrendo apenas ligação eletrostática. Neste caso, esses cátions são trocáveis com cátions da solução, num processo reversível e estequiométrico, definindo a Capacidade de Troca de Cátions – CTC do solo.

O cátion H<sup>+</sup> apresenta uma relação muito específica com a superfície dos colóides, uma vez que o mesmo liga-se fortemente à superfície, através de ligação covalente. Neste caso, o cátion H<sup>+</sup> não é trocável e apenas libera a carga negativa ocupada de forma indireta, ou seja, através da neutralização com oxidrila adicionada na solução. Portanto, a calagem, entre outros benefícios, promove aumento da CTC do solo.

No caso dos ânions, a retenção na fase sólida assume certas particularidades, principalmente devido ao comportamento do ânion fosfato. No caso dos ânions  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{Cl}^-$  a adsorção às cargas positivas é direta, ocorrendo apenas ligação eletrostática. Neste caso esses ânions são trocáveis com outros da solução, num processo reversível e estequiométrico, definindo a Capacidade de Troca de Ânions – CTA do solo.

No entanto, o  $\text{HMoO}^-$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , notadamente o fosfato, ligam-se fortemente à superfície por ligação covalente, sendo dificilmente trocados por outros ânions normalmente existentes na solução do solo. No caso do fósforo, o fenômeno é de extrema importância por reduzir a disponibilidade do nutriente, sendo comumente chamado de **Fixação** de fosfato.

No caso da existência de grande quantidade de óxidos de ferro e de alumínio, independente da existência de carga positiva, o íon fosfato é retido por troca com oxidrilas. Portanto, no caso de ânions, em função da baixa quantidade de cargas positivas no solo e ao grande domínio do fosfato sobre os demais ânions, quanto a capacidade de retenção às superfícies dos colóides, torna-se irrelevante falar-se em troca de ânions no solo, da forma dinâmica como ocorre para os cátions. Como a fixação de fosfato será tratada de forma específica no Capítulo 12, no momento a maior ênfase é para a capacidade de troca de cátions no solo.

A troca de cátions no solo é um processo reversível, instantâneo e, principalmente, estequiométrico. A capacidade de troca de cátions é dada pela quantidade de cátions retidos, por unidade de peso ou volume de solo. Nas publicações lançadas até o início dos anos 90, usava-se expressar quantitativamente os cátions e a CTC em meq/100g ou meq/100cm<sup>3</sup>. Com a adequação ao sistema internacional, passou-se a utilizar a unidade em milimol de carga por volume de solo – mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> de solo. Há equivalência entre milimol de carga e miliequivalente. Em termos práticos, 1 mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> de um cátion qualquer corresponde a 1 meq/100cm<sup>3</sup> multiplicado por 10, devido a alteração de 100cm<sup>3</sup> para dm<sup>3</sup> na expressão do volume de solo. Um mmol<sub>c</sub> de um cátion é igual ao peso atômico do mesmo (g) dividido pela sua valência, dividido por 1000. Assim, 1 mmol<sub>c</sub> de K<sup>+</sup> é igual a 39 mg, enquanto 1 mmol<sub>c</sub> de Ca<sup>2+</sup> é igual a 20 mg. Em relação ao aspecto estequiométrico, 39 mg de K<sup>+</sup> podem deslocar 20 mg de Ca<sup>2+</sup> e vice-versa.

Em função do que já foi visto para o desenvolvimento de cargas no solo é preciso estar atento para o fato de que a CTC do solo é influenciada pelos seguintes fatores: a) Mineralogia do solo; b) textura do solo; c) teor de matéria orgânica do solo e d) pH do solo. Portanto, em solos mais arenosos ou com predomínio de argilas de baixa atividade, o manejo da matéria orgânica e a prática da calagem podem ser muito importantes para aumentar a capacidade dos solos de reter cátions.

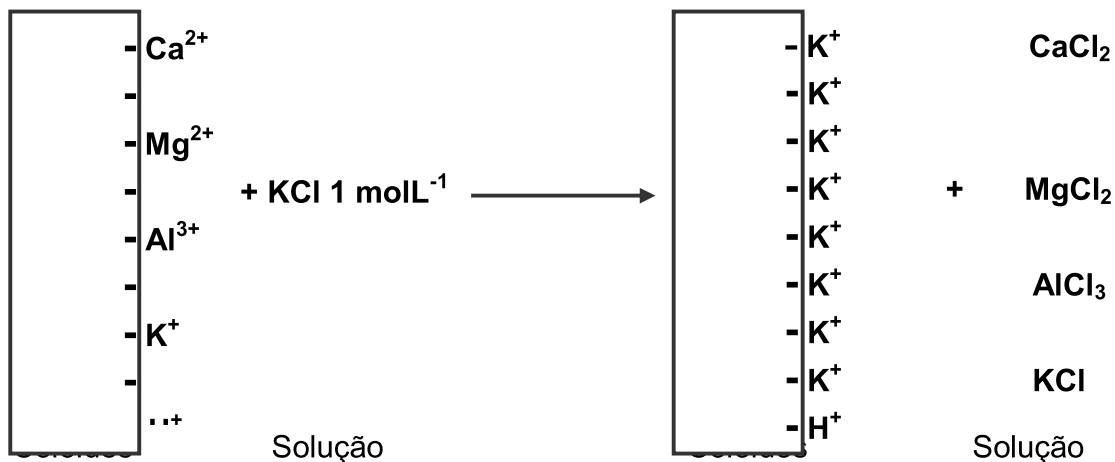
Apesar do processo ser estequiométrico, os cátions trocáveis não são retidos com a mesma força pelos colóides. A ordem preferencial de retenção ou série liotrópica é dada por:





Excetuando-se os íons  $H^+$  por razões já expostas, o principal fator determinante da preferência de adsorção é a carga do cátion. No caso de cátions com igual carga, a preferência de adsorção é para o cátion com menor raio quando no estado hidratado. Ou seja, quanto maior o raio ou tamanho do cátion hidratado, maior a distância entre o cátion e a superfície do colóide, menor a força de adsorção e maior a facilidade de dessorção.

Apesar da série preferencial de troca, é preciso atentar para o fato de que, por força da lei de ação das massas, pode-se saturar o complexo de troca com qualquer cátion, deslocando os demais cátions trocáveis para a solução. A concentração de um determinado cátion na solução é o primeiro fator a condicionar a possibilidade de permuta com cátions adsorvidos aos colóides. Este princípio básico é que permite, por exemplo, a determinação dos teores de  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  trocáveis tratando-se o solo com excesso de  $K^+$ . Assim, no laboratório trata-se  $10\text{ cm}^3$  de solo com  $100\text{ ml}$  de  $KCl\ 1N$  e determina-se no sobrenadante – solução do solo – os teores de  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  trocáveis. A representação esquemática da reação de troca é dada na Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Representação esquemática da reação de troca quando o solo, em laboratório de análise química do solo, é tratado com  $KCl\ 1\ mol\ L^{-1}$

### 3.6. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE CTC

A capacidade de troca de cátions dos solos, conforme já discutido, é de grande importância na agricultura. Assim sendo, o conhecimento de alguns conceitos a ela relacionados são muito relevantes para o manejo da fertilidade do solo.

#### a) CTC efetiva

É representada pela letra “t”, e reflete a capacidade de troca de cátions efetiva do solo, ou melhor, a capacidade do solo em reter cátions em seu pH natural. Qualquer que seja o valor de pH do solo, as cargas negativas ocupadas pelo  $H^+$  não estão disponíveis para retenção de outro cátion, por troca. Assim, a CTC efetiva, é dada por:

$$t \text{ (cmol}_e\text{/dm}^3\text{)} = \text{Al}^{3+} + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$$

Supondo-se o cultivo do solo ao valor do pH natural, a correta interpretação do valor da CTC efetiva fornece uma idéia das possibilidades de perdas de cátions por lixiviação, do potencial de salinidade e necessidade de parcelamento das adubações potássicas.

Um valor de  $t$  menor que  $2,3 \text{ cmol}_e\text{/dm}^3$  é baixo, segundo a Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais-CFSEMG (CFSEMG, 1999), sendo indicativo de solo arenoso, com baixo teor de matéria orgânica e, mesmo se mais argiloso, com predomínio de argilas de baixa atividade. Nesta condição, se for feita uma adubação pesada poderá ocorrer perdas de cátions por lixiviação e elevada salinidade para as sementes ou plântulas.

É importante observar que na definição da CTC efetiva aparece um cátion de caráter ácido – alumínio –, que, além de não ser essencial, é tóxico às plantas, e, três cátions de caráter básico – cálcio, magnésio e potássio – que são essenciais às plantas. Portanto, deve-se considerá-los distintamente, o que é feito com base nos dois conceitos a seguir:

#### b) Soma de bases

É representada pelas letras “SB”, e, como o próprio nome indica, reflete a soma de cálcio, magnésio e potássio trocáveis.

$$\text{SB (cmol}_e\text{/dm}^3\text{)} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$$

A soma de bases por si só não é um parâmetro muito importante, por englobar três bases e, por conseguinte, não dar uma idéia dos valores absolutos de cada uma delas. Para cada uma das bases, além dos teores absolutos, pode-se calcular a fração da CTC efetiva ocupada por cada uma, da seguinte forma:

$\% \text{ Ca} = (\text{Ca}^{2+} / T) \times 100$	$\% \text{ Mg} = (\text{Mg}^{2+} / T) \times 100$	$\% \text{ K} = (\text{K}^+ / T) \times 100$
---	---	--

Generalizando, para uma condição ideal de suprimento das bases, a percentagem de saturação de Ca, Mg e K na CTC potencial deve ser de 60-70, 10-20 e 2-5 %, respectivamente.

#### c) Percentagem de saturação de alumínio

É representada pela letra “m”, expressando a fração da CTC efetiva que é ocupada por alumínio trocável.

$$m \% = (\text{Al}^{3+} / t) \times 100$$

Quando se faz a interpretação de resultados da análise química de um dado solo, um dos pontos mais importantes é avaliar o teor de alumínio trocável. Acima de  $1,0 \text{ cmol}_e\text{Al}^{3+}\text{/dm}^3$ , o teor é considerado elevado pela CFSEMG e será prejudicial ao crescimento

da maioria das espécies vegetais. Todavia, considerando a variação da CTC entre os solos, o parâmetro que melhor expressa o potencial fitotóxico do alumínio é justamente o valor “m”. Diversos trabalhos mostram que para uma saturação de alumínio acima de 60% há um grande aumento na atividade de alumínio em solução. Nestas condições, para a grande maioria das espécies vegetais, o crescimento das raízes é praticamente paralisado.

Os conceitos até então discutidos estão relacionados com a CTC do solo em seu pH natural ou, de outra forma, com as condições prevalecentes no solo em seu pH natural. Todavia, sabe-se que muitas vezes o solo não será cultivado na sua condição natural de pH. Assim sendo, os dois conceitos a seguir aplicam-se para uma condição de solo com valor de pH ajustado para 7,0.

#### d) CTC potencial

É representada pela letra “T”, e reflete a capacidade do solo em reter cátions a pH 7,0. Portanto, é também conhecida por CTC a pH 7,0.

Sob o ponto de vista prático, é o valor da CTC de um solo, caso a calagem deste solo fosse feita para elevar o pH a 7,0. Partindo-se de um solo ácido, a elevação do pH para 7,0 promove a neutralização de cátions  $H^+$  que se encontram em ligações covalentes com o oxigênio de colóides orgânicos e de óxidos de ferro e de alumínio. Com isto, são desenvolvidas cargas negativas que existiam apenas em potencial.

Na análise química do solo, obtém-se o valor de T a partir da extração de  $H^+ + Al^{3+}$  com solução salina tamponada a pH 7,0. O valor de T pode ser calculado por:

$$T \text{ (cmol/dm}^3\text{)} = SB + (H^+ + Al^{3+})$$

ou

$$T = t + H^+$$

Finalmente, deve-se destacar que o ganho em CTC pela neutralização de  $H^+$  adsorvidos será tanto maior quanto mais baixo for o pH natural do solo e quanto maior for o teor de matéria orgânica e de óxidos de ferro e de alumínio do solo. Os colóides orgânicos são os principais responsáveis por tal ganho.

#### e) Percentagem de saturação de bases da CTC a pH 7,0

Este parâmetro, representado por “V”, reflete quantos por cento da CTC a pH 7,0 estão ocupados pelas bases existentes no solo. O valor de V será dado por:

$$V \% = (SB / T) \times 100$$

Supondo-se a elevação do pH do solo para 7,0, sem aumento no teor das bases Ca, Mg e K, a percentagem de saturação de bases no complexo de troca será reduzida, pois há aumento da CTC com o aumento de pH – CTC passa de t para T.

---

Portanto, visando ao manejo da fertilidade do solo, o aumento do pH do solo tem de ser feito com corretivos que adicionem bases ao solo, de forma a elevar também a saturação por bases. Esta é uma das razões do uso de calcário, pois, além de elevar o pH do solo, este corretivo adicionará cálcio e magnésio ao solo. Assim sendo, a percentagem de saturação de bases é um parâmetro muito usado para recomendação de calagem.

### 3.7. OS ORGANISMOS DO SOLO

Cada vez mais é reconhecido o papel dos microrganismos em alterar a disponibilidade de nutrientes no solo, ou seja, a capacidade dos microrganismos influenciarem a aquisição de nutrientes pelas plantas. Portanto, no estudo da fertilidade do solo, é preciso considerar o papel da fase biológica.

Os microrganismos em geral desempenham função fundamental na decomposição da matéria orgânica e, por conseqüência, na liberação de nutrientes para a solução do solo. Para o nitrogênio, por exemplo, este papel é de relevado destaque, devendo-se lembrar que além de aumentar a disponibilidade do nutriente, os microrganismos também podem promover imobilização de nitrogênio inorgânico no solo, reduzindo o suprimento imediato às plantas.

Alguns fungos infectam raízes de plantas, com mútuo benefício, formando estruturas denominadas micorrizas. As hifas do fungos micorrízicos ao crescer no solo, como “prolongamentos” das raízes, promovem aumento da área de absorção com acentuado incremento na disponibilidade de nutrientes, notadamente de fósforo, para a planta.

As bactérias também apresentam grande importância na nutrição das plantas. Por exemplo, participam de várias transformações do nitrogênio, do enxofre e de micronutrientes, alterando de forma significativa sua disponibilidade. De forma bem específica, merece destaque o fato de que algumas bactérias fixam o nitrogênio do ar do solo, em simbiose ou não com raízes, liberando-o em forma mineral aproveitável pela planta.

Os microrganismos apresentam uma importância direta na disponibilidade de nutrientes. Todavia, não se deve menosprezar o papel dos organismos superiores – cupins, formigas, minhocas, vegetais e o próprio homem.

As minhocas, por exemplo, além de produzirem um húmus de excelente qualidade, promovem uma melhoria da estrutura do solo, inclusive, os canais formados promovem uma maior troca gasosa entre a atmosfera e camadas mais profundas do solo, de grande importância no processo de aeração do solo.

---

## TRANSPORTE DE NUTRIENTES PARA AS RAÍZES

À medida que as plantas realizam a absorção e esgotam-se os nutrientes em solução, há um ressurgimento destes pela fase sólida. Um dos importantes fatores a afetar a disponibilidade dos nutrientes é o fator transporte. Conforme já discutido, a absorção de nutrientes pelas raízes ocorre a partir do contato destas com os nutrientes presentes na solução do solo. Assim, para serem absorvidos, os nutrientes precisam ser transportados até a superfície das raízes (Figura 4.1).

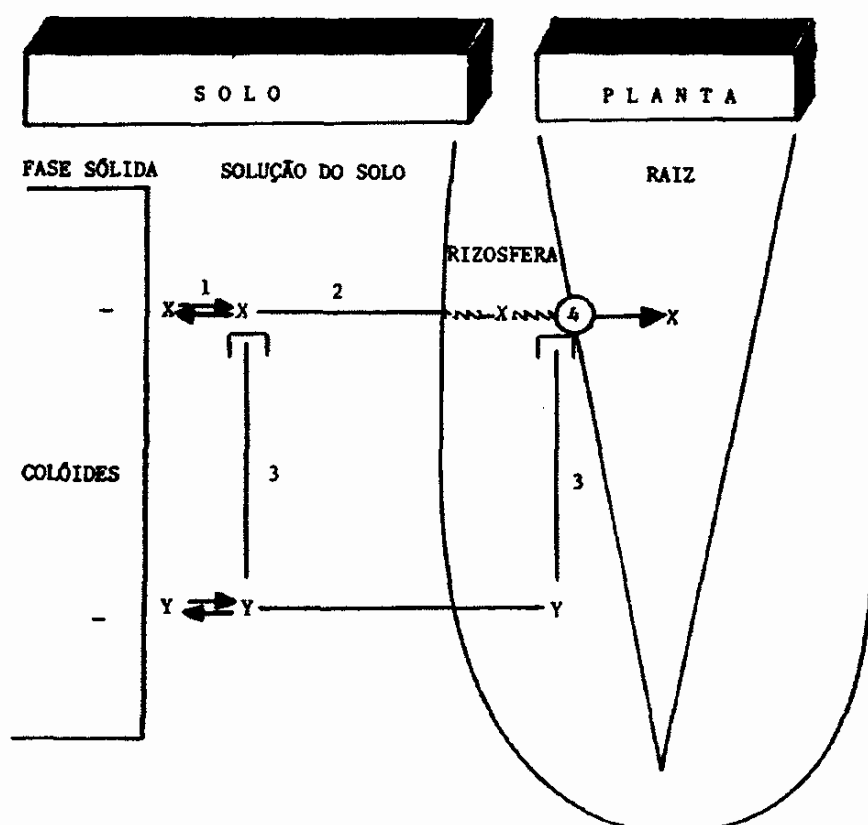


Figura 4.1. Representação esquemática dos principais fatores que afetam a disponibilidade de nutrientes (1 = poder tampão do solo, 2 = transporte até as raízes, 3 = interação com outros nutrientes, 4 = a planta).

#### 4.1. INTERCEPTAÇÃO RADICULAR

Ao crescer e penetrar o solo, as raízes entram em contato com os nutrientes presentes ao longo de sua trajetória. Inicialmente pensou-se que a simples interceptação do nutriente no solo pelas raízes em crescimento seria o suficiente para a aquisição dos nutrientes. Todavia, considerando que o volume de solo ocupado pelas raízes é muito pequeno – 0,4 a 2% – e que a quantidade requerida de nutrientes é muito maior que a quantidade no solo em direto contato com as raízes, concluiu-se que a contribuição da **Interceptação Radicular** é mínima.

Excluindo-se a Interceptação Radicular, os nutrientes na solução do solo podem ser transportados até a superfície das raízes – superfície externa da plasmalema de células da epiderme ou de células corticais – por dois mecanismos: **Fluxo de Massa e Difusão**.

#### 4.2. FLUXO DE MASSA

É o transporte de nutrientes com o fluxo convectivo da solução do solo até a superfície das raízes, ocasionado pelo gradiente de potencial de água entre o solo e a raiz, em função da transpiração das plantas.

A água é quase que constantemente absorvida no período diurno, portanto, constantemente movendo-se em direção às raízes e arrastando consigo os nutrientes nela dissolvidos.

O transporte de nutrientes por fluxo de massa pode ser dado por:

$$F = V \cdot C_l \quad (4.1)$$

onde:

F = Transporte ou fluxo de nutrientes por fluxo de massa – solução ( $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ solo} \cdot \text{s}^{-1}$ )

V = Fluxo de solução ( $\text{cm}^3 \cdot \text{solução} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ solo} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$C_l$  = Concentração do nutriente na fase líquida ou solução ( $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3} \text{ solução}$ )

Em estudos envolvendo as relações hídricas em plantas, a absorção de água tem sido calculada tanto em termos de fluxo médio de água para as raízes – 0,5 a  $2,0 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ água cm}^{-2} \text{ solo s}^{-1}$  – quanto em termos da taxa de transpiração – 200 a 600 g  $\text{H}_2\text{O g}^{-1}$  planta. Assim, considerando o consumo total de água pela planta e a concentração do nutriente na solução pode-se calcular a contribuição do fluxo de massa para o transporte de nutrientes até a superfície das raízes. Assumindo uma concentração de fósforo na solução do solo de 0,15 mg/litro e uma quantidade de água transpirada de 3 milhões litros/ha, a contribuição do fluxo de massa é de 0,45 kg P, o que é menos de 2% da demanda de uma cultura.

---

A contribuição tem-se mostrado variável, dependendo do nutriente, solo, espécie vegetal e idade da planta. Em geral, nos solos de melhor fertilidade o fluxo de massa pode ser importante para o suprimento de cálcio, magnésio e de boa parte do nitrogênio. Para o fósforo e potássio – o primeiro por se apresentar na fase líquida em baixíssima concentração e o segundo por além de apresentar em baixa concentração na fase líquida, ser muito exigido pelas plantas – a contribuição do fluxo de massa é de pequena relevância.

Em condições de campo, a precipitação ou o ciclo de irrigação exercem grande influência na contribuição do fluxo de massa para o total de nutriente transportado até as raízes. Quando o potencial de água no solo é alto – por exemplo, mantido na capacidade de campo – o fluxo de massa é irrestrito, mantendo um potencial de água similar na superfície radicular.

O balanço entre a taxa de transporte de nutrientes até as raízes por fluxo de massa e a taxa de absorção pelas raízes define gradientes de concentração entre um dado ponto na solução e a superfície radicular. A Figura 4.2. mostra possíveis gradientes de concentração para os nutrientes magnésio e fósforo, que apresentam demanda mais ou menos igual pelas plantas.

Portanto, ambos apresentam quase igual taxa de remoção da superfície radicular, ou seja, taxa de absorção. A grande diferença entre esses dois nutrientes, quanto ao transporte por fluxo de massa até a superfície radicular, relaciona-se com a concentração dos mesmos na solução do solo. Por ser muito menor para o fósforo, a sua taxa de chegada – transporte por fluxo de massa – até a superfície das raízes é muito menor que a sua taxa de remoção – absorção –, criando um gradiente de concentração após um certo tempo de absorção. No caso do magnésio, alguns resultados sugerem até a possibilidade de acúmulo na superfície das raízes, criando-se um “gradiente ao contrário.

Em termos genéricos, com base na situação apresentada na Figura 4.2., diz-se que o fluxo de massa contribuiu com toda a demanda de magnésio, enquanto que para o fósforo não. Em realidade, a situação apresentada para o magnésio aconteceria apenas em solos com elevada disponibilidade neste nutriente. E, para o fósforo, a contribuição do fluxo de massa para seu transporte até as raízes é desprezível. Portanto, este nutriente fica na dependência quase total do outro mecanismo de transporte, a Difusão.

---

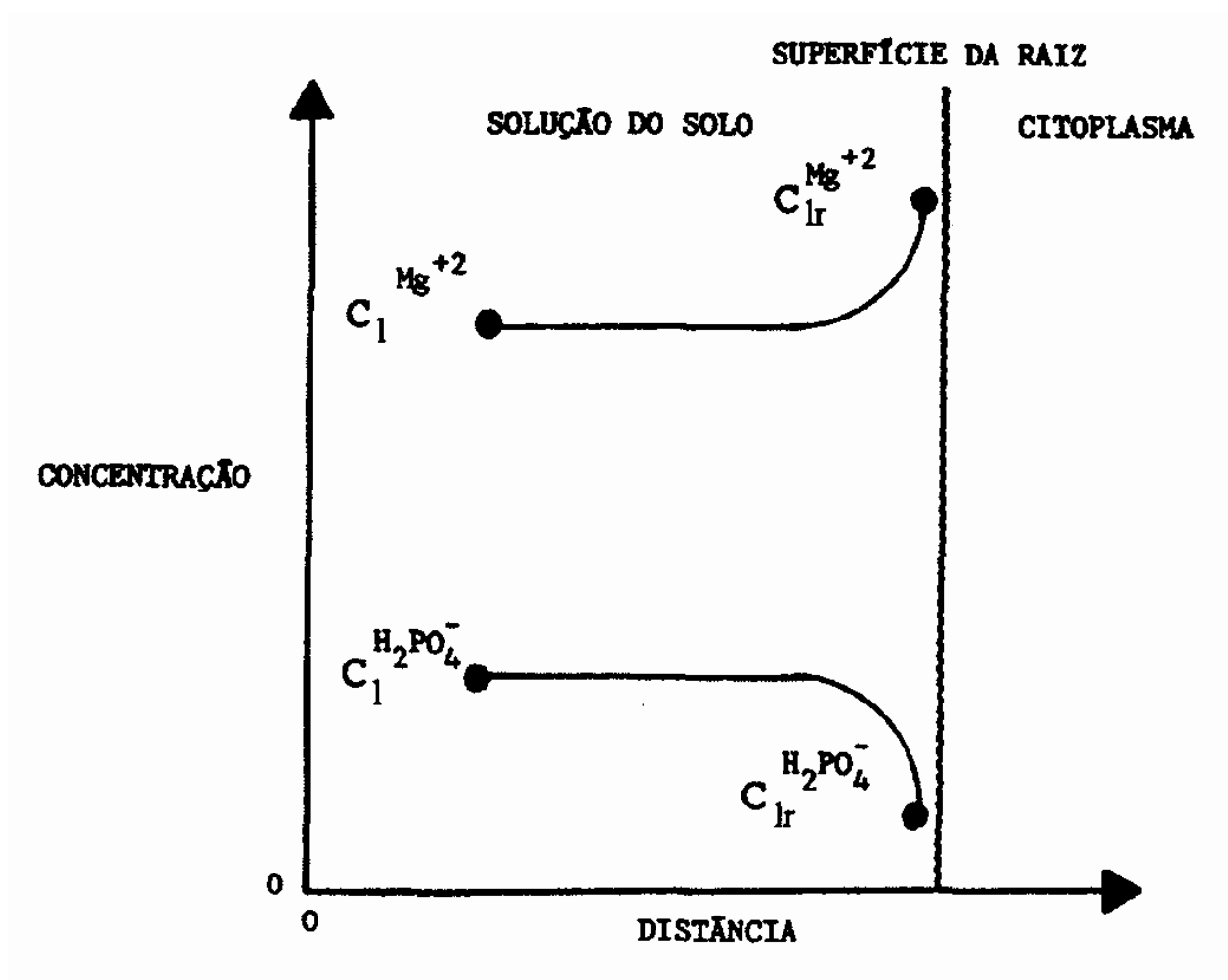


Figura 4.2. Representação esquemática de possíveis gradientes de concentração estabelecidos pelo fluxo de massa para o magnésio e fósforo entre um dado ponto na solução do solo ( $C_1$ ) e a superfície externa da raiz ( $C_{lr}$ ).

### 4.3. DIFUSÃO

É o transporte de nutrientes ao acaso num sistema aquoso, devido ao gradiente de concentração criado entre a solução do solo e a superfície das raízes (Figura 4.2.), o qual induz à difusão predominantemente no sentido da menor concentração. Portanto, na verdade, o transporte por fluxo de massa e por difusão podem ocorrer simultaneamente.

Contrário ao fluxo de massa, a difusão é um processo de transporte lento e que ocorre mais nas vizinhanças da superfície radicular – 0 a 10 mm. Assim sendo, é grandemente influenciado por fatores do solo e da planta – crescimento e morfologia radicular.



Segundo a lei de Fick (1855) a difusão de qualquer íon num sistema aquoso é dada por:

$$D = D_1 \cdot (dc/dx) \quad (4.2)$$

onde:

$D$  = Taxa de difusão do íon ( $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$D_1$  = Coeficiente de difusão do íon na água pura ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$dc/dx$  = Gradiente de concentração ( $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{cm}^{-1}$ )

Para o sistema solo, em que a água é substituída por um sistema trifásico – sólido, líquido e gasoso –, há necessidade de nova fórmula.

Em primeiro lugar é preciso atentar para o fato de que a difusão de nutrientes no solo ocorre essencialmente na fase líquida – solução do solo. Em segundo lugar, ressalta-se o fato de que não é possível medir, em termos práticos, o gradiente de concentração entre um dado ponto na solução e a superfície da raiz. Entretanto, é fácil perceber que o gradiente de concentração – força motora da difusão – apenas será mantido com o tamponamento do nutriente na solução do solo. Com essas considerações, o coeficiente de difusão de um dado íon “i” no solo é dado por:

$$D_{\text{solo}}^i = D_1^i \cdot \theta \cdot f \cdot (dc_i^i/dc_s^i) \quad (4.3)$$

onde:

$D_{\text{solo}}^i$  = Coeficiente de difusão do íon “i” no solo ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$D_1^i$  = Coeficiente de difusão do íon “i” na água pura ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\theta$  = Conteúdo volumétrico de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{ água} \cdot \text{cm}^{-3} \text{ solo}$ )

$f$  = Fator de impedância ou fator de transmissão ou fator de continuidade ( $0 < f < 1$ )

$C_i$  = Concentração do íon “i” na solução do solo

$C_s$  = Concentração do íon “i” na fase sólida do solo, em forma disponível.

O fator de impedância diz respeito à tortuosidade do caminho a ser percorrido pelo íon, ou seja, diz respeito a distância efetiva da difusão, que é afetada pela textura, teor de umidade, viscosidade da água, reações de adsorção e de repulsão dos íons e grau de compactação do solo. Solos mais arenosos, com menor teor de umidade ou mais compactados apresentarão maior tortuosidade – menor valor de  $f$  –, portanto, menor difusão. O valor de  $f$  é especialmente determinado em estudos específicos sobre difusão. Em termos práticos, pode-se considerar o valor de  $f$  igual ao de  $\theta$ , dado a grande influência de  $\theta$  na tortuosidade do caminho de difusão.

O Quadro 4.1. apresenta coeficientes de difusão de alguns nutrientes na água pura e no solo. O coeficiente de difusão na água é apresentado para mostrar os efeitos da tortuosidade, viscosidade da água, reações de adsorção ou de repulsão de íons pelos colóides do solo e do poder tampão do solo no coeficiente de difusão.

**Quadro 4.1. Faixa de variação para o coeficiente de difusão de alguns nutrientes no solo, segundo diversos autores. O coeficiente de difusão na água é apresentado como comparação.**

Nutriente (íon)	$D_i^i$ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$D_{\text{solo}}^i$ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
$\text{K}^+$	$1,98 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$ a $2 \cdot 10^{-6}$
$\text{NO}_3^-$	$1,90 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-7}$ a $1 \cdot 10^{-5}$
$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$8,9 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-14}$ a $4 \cdot 10^{-9}$

A disponibilidade de nutrientes tais como fósforo, potássio e zinco é grandemente afetada pelo fator transporte, dado a dependência da difusão para o suprimento dos mesmos até as raízes. Para o fósforo, a sua quase total dependência na difusão é uma séria limitação na aquisição deste nutriente pelas plantas.

Em termos práticos, a difusão de um dado nutriente pode ser aumentada através da adubação e/ou irrigação, conforme mostra a fórmula 4.3, apresentada para cálculo do coeficiente de difusão do íon no solo. O Quadro 4.2. mostra o efeito da adubação com fósforo no coeficiente de difusão. Apesar de seu efeito positivo, precisa-se ressaltar que a difusão apenas foi aumentada significativamente com a aplicação de doses mais elevadas de fósforo, notadamente no solo Wellston. Este solo apresenta maior capacidade de fixação de fosfato que o solo Raub, de forma que os aumentos em  $C_i$  em relação a  $C_s$ , são mais difíceis de serem conseguidos. Portanto, quanto maior o poder de fixação de fósforo, maior é a dificuldade de se estabelecer um acentuado gradiente entre a solução e a superfície da raiz.

**Quadro 4.2. Efeito da adição de fósforo em parâmetros que influenciam a taxa de suprimento deste nutriente para as raízes das plantas (Fonte: Anghinoni e Barber, 1980).**

Solo	P adicionado (mg P/kg solo)	$C_i$ ( $\mu\text{mol/L}$ )	$D_{\text{solo}}^P$ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
Raub	0	2,9	1,79
	60	6,2	1,83
	120	14,1	3,29
	240	53,9	5,41
	480	182,1	11,24
Wellston	0	1,9	0,43
	140	3,1	0,43
	280	9,0	0,60
	560	62,3	2,02
	1120	611,8	10,28

Por outro lado, dado a grande influência do teor de água do solo na difusão, a prática da irrigação tem-se mostrado de grande importância em aumentar a disponibilidade de nutrientes, notadamente daqueles com elevada dependência no transporte por difusão. Segundo Ruiz et al. (1988), ao estudarem a importância do teor de água no solo para a aquisição de fósforo pelas plantas, a incorporação de doses relativamente menores de fósforo, com um manejo adequado de água para assegurar as melhores condições para a difusão, apresenta um efeito positivo mais acentuado que o decorrente da incorporação de grandes quantidades de fósforo, com oscilações pronunciadas do conteúdo de água. Silveira e Moreira (1990) estudaram a resposta do feijoeiro a doses de fósforo e lâminas de água de irrigação. A adubação com fósforo foi realizada no sulco de plantio, utilizando-se as doses de 0, 25, 50, 100, 200 e 400 kg/ha de  $P_2O_5$ , na forma de superfosfato triplo. As lâminas de água corresponderam a 187, 277, 354 e 416 mm/ciclo. A produção de grãos e o conteúdo de fósforo na planta aumentaram com o incremento da dose do fósforo e da lâmina de água. O Quadro 4.3. mostra que houve resposta mais acentuada sobre o rendimento de grãos pelo efeito das lâminas de água do que pelas doses de fósforo e, em baixa lâmina de água, a resposta à aplicação de fósforo foi pequena. Observa-se ainda no Quadro 4.3. que um mesmo rendimento de grãos pode ser conseguido por diferentes combinações de doses de fósforo e lâminas de água.

**Quadro 4.3. Rendimento de grãos de feijão, em função das diferentes doses de  $P_2O_5$  e lâminas de água aplicadas no solo.**

Lâmina de água (mm/ciclo)	Doses de $P_2O_5$ (kg/ha)					
	0	25	50	100	200	400
	kg / ha					
187	467	554	609	580	656	566
277	1357	1502	1556	1386	1614	1642
354	1449	1608	1839	1761	1609	2127
416	1476	1668	1853	1878	2184	2332

Conforme já ressaltado, a difusão é um processo lento. Normalmente, a distância linear que um íon move-se por difusão com o tempo é dada por:

$$d = (2 \cdot D_{\text{solo}}^i \cdot t)^{0,5} \quad (4.4)$$

onde:

d = distância linear percorrida pelo íon "i" por difusão

$D_{\text{solo}}^i$  = coeficiente de difusão do íon “i” no solo

t = tempo em segundos

Assim, com base no Quadro 4.1., para os nutrientes nitrogênio, fósforo e potássio pode-se ter as seguintes situações:

• Nitrogênio:  $D_{\text{solo}}^{\text{NO}_3^-} = 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

$$d = (2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 8,64 \cdot 10^4 \text{ s})^{0,5} = 1,7 \text{ cm} \cdot \text{dia}^{-1}$$

• Potássio:  $D_{\text{solo}}^{\text{K}^+} = 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

$$d = (2 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 8,64 \cdot 10^4 \text{ s})^{0,5} = 0,13 \text{ cm} \cdot \text{dia}^{-1}$$

• Fósforo:  $D_{\text{solo}}^{\text{H}_2\text{PO}_4^-} = 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

$$d = (2 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 8,64 \cdot 10^4 \text{ s})^{0,5} = 0,004 \text{ cm} \cdot \text{dia}^{-1}$$

Dados desta natureza tem sérias implicações na disponibilidade de nutrientes e na prática da adubação.

Em termos de disponibilidade é preciso, portanto, ampliar este conceito e considerar o “nutriente posicionalmente disponível”. Por exemplo, algumas avaliações indicam que as raízes de milho guardam entre si, em média, uma distância de 0,7 cm. Assim sendo, um íon nitrato localizado a igual distância de duas raízes seria disponível no tempo 0,27 dias, supondo-se seu transporte apenas por difusão. Para o potássio esse tempo seria de cerca de 3 dias, enquanto que para o fósforo de 90 dias.

No sentido de reduzir a grande limitação imposta pela difusão na disponibilidade de nutrientes, principalmente do fósforo, a própria planta pode exercer papel de relevada importância. Desta forma, a morfologia e crescimento radicular bem como a associação com fungos micorrízicos podem reduzir sobremaneira o caminho a ser percorrido pelo fósforo.

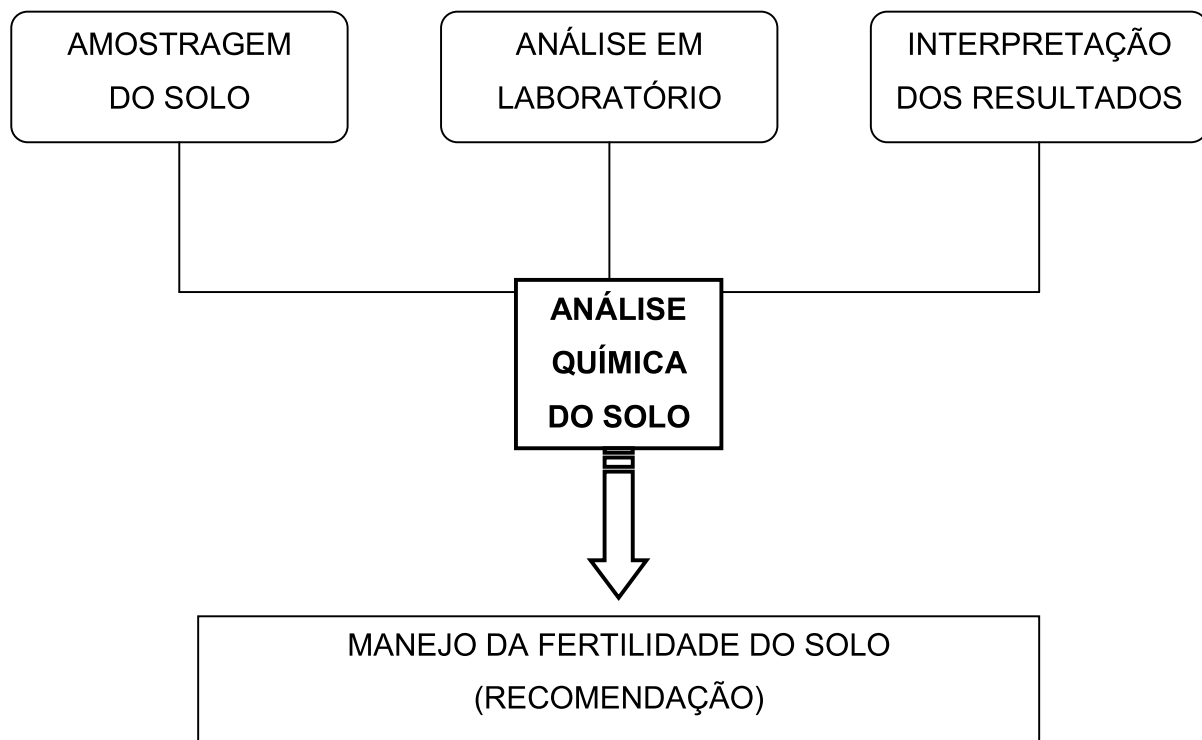
Em termos da prática da adubação, o transporte por difusão tem implicações na localização de fertilizantes. Assim, nutrientes tais como fósforo, potássio e zinco devem ser, preferencialmente, aplicados de forma localizada próximo à região de crescimento das raízes. Por sua vez, nitrogênio, cálcio, magnésio, enxofre e boro podem ser aplicados a lanço.

O ponto de partida para uma correta avaliação da fertilidade do solo a análise de amostra representativa do solo da área a ser cultivada. Esta prática é indispensável quando se pensa em efetivamente aumentar a produtividade das mais diversas culturas, e, como consequência a produção e os lucros.

Infelizmente, esta tecnologia simples, barata e de crucial importância, não é utilizada pela maioria dos agricultores brasileiros. Carniel (1994) constatou que 84% dos agricultores da microregião Campo das Vertentes de Minas Gerais nunca fizeram uso desta tecnologia. Infelizmente, a necessidade da análise de solo muitas vezes ainda é desconsiderada, até mesmo por técnicos. O correto uso desta tecnologia é uma excelente forma de valorização do profissional da produção vegetal. Apenas através da completa análise do solo é possível definir as doses mais adequadas de calcário e de fertilizantes para atingir a Produtividade Máxima Econômica (PME).

De certa forma, o processo de análise química do solo pode ser dividido em três etapas, até se chegar ao uso deste método de avaliação da fertilidade para recomendação de práticas corretivas e/ou de adubação (Figura 5.1). Para uma correta recomendação, o técnico tem um importante papel em todas as três etapas, notadamente na amostragem do solo e na interpretação dos resultados.

---



**Figura 5.1. Etapas do processo de análise química do solo visando o manejo da fertilidade do solo, expresso pela recomendação de práticas corretivas e de adubação.**

## **5.1. AMOSTRAGEM DO SOLO**

A amostragem do solo para avaliação da fertilidade é a parte mais crítica de todo o processo de análise do solo, visto que uma pequena porção de terra representará alguns hectares, e não há meios para se corrigir uma amostragem mal feita.

Apesar de a amostragem do solo ser uma tarefa relativamente simples, ela deve ser executada com bastante critério, visto que, os solos são naturalmente heterogêneos, e essa heterogeneidade tende a aumentar com o cultivo dos mesmos.

Os métodos analíticos e os laboratórios de análises de solo estão em constante evolução, mas nada disso adianta se a amostragem não for representativa da área que se queira avaliar quanto as suas características químicas, físicas e biológicas.

### **5.1.1. Área Homogênea**

Em uma única propriedade agrícola, mesmo de extensão reduzida, pode se ter diferentes tipos de solos, sob os mais variados aspectos. Portanto, há necessidade da área a ser amostrada representar um solo homogêneo quanto a sua capacidade de suprir nutrientes.

Na definição de cada área homogênea, utiliza-se características do solo e de uso do mesmo, tais como: cor, textura, topografia, vegetação natural, drenagem e manejo de lavouras anteriores – práticas corretivas adubação, rotação de culturas, cultura anterior, manejo da palhada e produtividade.

Não se recomenda considerar como homogênea uma área superior a 10 hectares (CFSEMG, 1999). Em alguns casos, em área virgem, admite-se como área homogênea uma área superior a 10 hectares. De qualquer forma, o técnico precisa fazer uma avaliação criteriosa nesta definição.

Para cada propriedade tem-se que fazer um croqui ou mapa com as áreas homogêneas, que deve ser guardado junto com os resultados da análise do solo, para posteriores acompanhamentos da evolução da fertilidade do solo com o tempo (Raij, 1985).

### 5.1.2. Número de Amostras Simples

Existem dois tipos de amostras. A amostra simples, que é coletada em vários pontos dentro de uma mesma área homogênea, e, a amostra composta, obtida a partir da mistura das amostras simples. Portanto, é a amostra composta – com cerca de 300 g – que é enviada ao laboratório para análise, devendo ser a mais representativa possível da área homogênea correspondente.

É consenso entre os pesquisadores em fertilidade do solo (Malavolta, 1981; Raij, 1991), que cada amostra composta, para uma mesma profundidade, deve ser obtida a partir da mistura de 15 a 20 amostras simples. Este é portanto o número ideal de pontos a serem amostrados em cada gleba homogênea.

### 5.1.3. Local e Profundidade de Amostragem

O conhecimento do solo apenas até 20 cm de profundidade – camada arável – é de valor muito limitado para avaliar a fertilidade do solo, tanto para instalação da lavoura quanto para culturas perenes já instaladas, pois, as raízes exploram o solo em profundidades muito maiores.

Visando a implantação da lavoura, notadamente de culturas perenes, o solo deve ser amostrado, pelo menos, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Idealmente, pode-se também retirar amostra na profundidade de 40-60 cm. Mesmo os solos já cultivados, devem ser amostrados também abaixo da camada de 0-20 cm.

Análises em profundidade, abaixo da camada arável, são importantes para avaliar os seguintes aspectos:

- a) ocorrência de barreiras químicas (deficiência de cálcio e/ou excesso de alumínio) para o normal aprofundamento do sistema radicular. Portanto, é um procedimento indispensável para a correta recomendação de calagem e de gessagem;
  - b) acúmulo de nutrientes móveis, principalmente  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$  e B, nos solos sob cultivo intenso.
-

c) Descoberta de possível existência de camadas compactadas ou pedregosas.

Na implantação do sistema de plantio direto, visando ao correto manejo da fertilidade em termos da correção da acidez subsuperficial, a amostragem além da camada de 0-20 cm torna-se mandatória.

É importante lembrar que em quaisquer situações, onde não haja revolvimento do solo pela aração ou gradagem e incorporação de corretivos e fertilizantes, a camada mais superficial tende a apresentar características bastante diferenciadas em relação às camadas mais profundas do solo.

No plantio direto, o uso de altas quantidades de nitrogênio, notadamente na forma de sulfato de amônio, promove acidificação intensa nas camadas superficiais do solo (0 a 10 cm). Portanto, sugere-se a coleta de duas amostras em locais adjacentes para cada amostra simples. A primeira amostra, coletada de 0 a 10 cm, seria usada principalmente para determinação da acidez e recomendação de calagem. A segunda amostra, coletada de 0-20cm, seria usada para recomendação de adubação. O mesmo procedimento pode ser adotado para pastagens instaladas, que tem recebido grandes quantidades de nitrogênio.

No caso de culturas perenes já instaladas, ainda há diferentes recomendações quanto ao local de amostragem. Malavolta (1989) recomenda para pomares implantados de citros a retirada, em cada área homogênea, de 20 subamostras no meio da faixa adubada, na profundidade de 0-20 cm e 20 subamostras, no mesmo local, na profundidade de 20-40 cm.

Na cafeicultura, a aplicação localizada de fertilizantes nitrogenados na projeção da copa, resulta em acidificação localizada. A arruação, que consiste em puxar os resíduos para o meio da rua, antes da colheita, concentra solo com resíduos de fertilizantes ou solo mais fértil no meio da rua, caso não se proceda a esparramação após a colheita. Para o café em lavouras implantadas, a CFSEMG (1999) recomenda fazer amostragem anual da área adubada, na projeção da copa, e periodicamente (a cada 4 anos) da área nas entrelinhas ou meio da rua, especialmente quando se pretende avaliar a possibilidade de aplicação de calcário localizado em faixa na projeção da copa. Portanto, seriam duas amostras compostas por área homogênea. Ou, se se pretende correção da área toda, pode-se fazer apenas uma amostra composta, coletando metade das amostras simples na área adubada e a outra metade no meio da rua.

Quaggio (1994) recomenda que a amostragem somente na projeção da copa das plantas perenes seja revisada, pois, pelo menos para o citros, este local não representa o ambiente radicular. Este autor obteve maior correlação entre os resultados de análise do solo e de folhas e maior facilidade para interpretação dos resultados quando amostrou-se na projeção da copa e no meio da rua, obtendo-se apenas uma amostra composta por área homogênea.

---



Logicamente, a aplicação de fertilizantes orgânicos a lanço, a realização de adubação líquida ou da fertirrigação em toda a área, bem como o uso de plantio mais adensado, como por exemplo para o café, inevitavelmente levam a realização de uma amostragem única.

#### **5.1.4. Época de Amostragem**

Visando à implantação da lavoura, tanto de cultura anual quanto de perene, a amostragem do solo deve ser feita cerca de seis meses antes do plantio. Além de possíveis atrasos no laboratório, é preciso considerar que a prática da calagem, cuja recomendação depende de resultados da análise do solo, necessita ser feita com bastante antecedência – pelo menos três meses – do plantio. Ademais, de posse dos resultados e com certo tempo disponível, o agricultor pode planejar a aquisição de calcário e fertilizantes em condições mais favoráveis, em termos de preço e entrega do produto, por exemplo.

Em pastagens já estabelecidas, sugere-se proceder a amostragem cerca de três meses antes do máximo crescimento vegetativo.

No caso de culturas perenes, a amostragem pode ser feita cerca de dois meses após a última adubação de produção, ou, logo após a colheita. De qualquer forma, precisa ser feita também com a devida antecedência, dada à possibilidade de se ter que aplicar calcário novamente, o que necessita ser feito com boa antecedência das adubações da próxima safra.

No caso de cultivo intenso, sob irrigação, a amostragem pode ser feita a qualquer época, desde que se tome o cuidado de evitar a retirada de amostras nos sulcos de plantio, para não superestimar a fertilidade do solo.

A amostragem do solo não deve ser feita em condições de solo muito úmido, entre outras razões, pela dificuldade de se obter uma adequada mistura das amostras simples.

#### **5.1.5. Frequência de Amostragem**

Segundo Raij et al. (1985) a análise do solo deve ser repetida em intervalos que podem variar de um a quatro anos. A variação neste intervalo depende do poder tampão do solo, da quantidade e tipo de fertilizante utilizado, do manejo da palhada, do número de cultivos por ano e das produtividades obtidas. Por exemplo, áreas cultivadas intensamente com duas a três culturas por ano, sob irrigação, devem ser analisadas anualmente.

A princípio, tanto em culturas anuais quanto perenes em fase de produção, o agricultor deveria considerar seriamente a análise do solo, como prática a ser feita anualmente. Isto porque, diante de todo o investimento a ser feito com corretivos e fertilizantes, a análise do solo torna-se de crucial importância e de custo irrisório. Enfim, o técnico tem de estar consciente dos riscos de se fazer recomendações de práticas

---

corretivas e/ou de adubação com base em resultados de análise do solo realizada há mais de um ano.

#### **5.1.6. Procedimentos na Amostragem**

O local de retirada de cada amostra simples deve ser limpo, não deixando restos de plantas, sem contudo, revirar o solo. Existem equipamentos apropriados para a coleta de solo para análise, tais como trados, sondas e outros. Quando se utilizar a pá de corte ou enxadão, abrir um buraco de 20 cm de profundidade (para o caso de amostragem de 0-20 cm), cortar num dos lados uma fatia de cima para baixo até o fundo, eliminando as porções laterais. Prosseguir desse modo, caminhando em ziguezague até limitar a área homogênea, coletando em torno de 20 amostras simples por profundidade para se fazer uma amostra composta. Após homogeneização das amostras simples, retirar de 200 a 300 g de terra que será enviada ao laboratório, devidamente identificada (CFSEMG, 1999).

A CFSEMG (1999) recomenda ainda, não se retirar amostras próximo a casas, brejos, voçorocas, árvores, sulcos de erosão, formigueiro e caminho de pedestres. As amostras não devem ser colocadas em recipientes usados ou sujos, tanto durante o processo de coleta de amostras simples quanto para envio da amostra composta ao laboratório.

Raij (1991) indica que se a terra estiver molhada, convém secá-la ao ar antes de colocá-la na embalagem para a remessa ao laboratório. De qualquer forma, conforme já ressaltado, a amostragem deve ser feita quando o solo estiver menos úmido.

Segundo Siqueira et al. (1989), quando se utiliza trados para a amostragem do solo, a amostra deve ser colocada diretamente no balde ou saco receptor. O uso do calador requer uma espátula para a retirada do cilindro de solo amostrado. Quando se usa o trado holandês, deve se retirar o material excedente com uma faca, deixando-se somente uma fatia central do cilindro de solo coletado, reduzindo assim, o tamanho da amostra, e facilitando a retirada do material do trado com as mãos.

### **5.2. ANÁLISE EM LABORATÓRIO**

Uma análise completa para avaliação da fertilidade do solo deve incluir as seguintes determinações: pH, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, zinco, manganês, cobre, ferro, boro, alumínio, hidrogênio mais alumínio, teor de matéria orgânica e análise granulométrica (textura).

Em países desenvolvidos, também é determinado o teor de nitrogênio mineral residual, notadamente de nitrato, como índice da disponibilidade de nitrogênio no solo. Apesar de alguns laboratórios do Brasil terem condições de realizar tal análise, a interpretação de resultados para nossas condições ainda não está definida. Por isto, a

---

determinação do teor de matéria orgânica, entre outros benefícios, pode dar uma idéia da capacidade do solo de suprir nitrogênio para as plantas, conforme proposto por Siqueira et al. (1989).

A determinação de molibdênio ainda apresenta problemas analíticos e de interpretação.

A determinação da percentagem de areia, silte e argila (análise granulométrica) é de grande importância na avaliação da fertilidade do solo e, por consequência, no manejo da fertilidade do solo. Entretanto, essa análise é feita uma única vez, ou seja, não há necessidade de repetição da análise textural sempre que for feita análise química da área.

Em solos sob suspeita de salinidade deve-se analisar o teor de sódio e determinar a condutividade elétrica.

A participação do técnico na análise do solo propriamente dita, praticamente, se resume na escolha de um laboratório confiável e com capacidade de realizar todas as determinações necessárias – capacidade de fazer uma análise completa.

### 5.3. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DO SOLO

#### 5.3.1. Variação em Métodos de Análise

Considerando os diferentes procedimentos analíticos empregados nos diversos laboratórios do Brasil e a possibilidade de consulta a boletins de recomendação de corretivos e de fertilizantes de diferentes estados e, até mesmo, de outros países, é preciso atentar para as seguintes situações:

##### a) Determinação do pH

A acidez ativa do solo é mais comumente medida pelo índice de pH em água. Todavia, seu valor pode ser reduzido pela maior presença de sais, pela adição recente de fertilizantes ou pela mineralização da matéria orgânica de amostras úmidas mantidas por tempo mais longo em recipientes fechados – sacos plásticos usados para envio ao laboratório.

Alguns laboratórios, objetivando contornar possíveis problemas neste sentido, determinam a acidez ativa em solução salina, principalmente em  $\text{CaCl}_2$  0,01M, que permite manter constante a concentração salina, comparável a concentrações de soluções de solo de alta fertilidade. Em média, o pH em  $\text{CaCl}_2$  0,01M é cerca de 0,5 unidades menor que o pH em água.

Esta diferença na metodologia analítica do pH, que resulta em resultados nem sempre facilmente comparáveis, não traz maiores problemas de interpretação dos resultados, visto que o valor de pH, normalmente, não é usado para fins de recomendação de calagem.

---

### **b) Determinação do fósforo disponível**

No Brasil, a maioria dos laboratórios determina o teor de fósforo disponível através do uso do extrator ácido formado pela mistura de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,025 N + HCl 0,05 N. É o extrator ou método de Mehlich ou Carolina do Norte.

Na interpretação dos resultados obtidos por este extrator ácido, leva-se em consideração a textura do solo. Muitas vezes isto é considerado uma desvantagem no uso deste extrator, considerando que, muitas vezes, não se tem análise textural da área. Todavia, é difícil imaginar qualquer atuação do técnico em termos de manejo da fertilidade de um dado solo sem conhecer a sua textura.

Também, o uso de extratores ácidos é criticado por promover a solubilização de grande quantidade de fósforo ligado a cálcio, superestimando a disponibilidade de fósforo em solo adubado com fosfato natural, fertilizante constituído de fosfato de cálcio de baixa solubilidade. Todavia, antes de compartilhar de tal crítica, o técnico tem de atentar para o fato de que o uso de fosfato natural de baixa solubilidade não tem sido indicado para adubação convencional, por representar fonte não renovável, com reduzida abundância no Brasil e de baixa eficiência agrônômica.

Em todos os laboratórios do Estado de São Paulo o teor de fósforo disponível é determinado pelo uso da resina trocadora de ânions, que parece extrair apenas as formas de P disponível (Raij, 1991). Trata-se de um método ainda pouco empregado – no mundo, o uso da resina tem-se restringido ao estado de São Paulo.

Estes dois métodos fornecem resultados diferentes, de forma que não são comparáveis, necessitando, portanto, de procedimentos distintos – uso de tabelas específicas – para interpretação.

### **c) Determinação da disponibilidade de micronutrientes catiônicos**

No Brasil, o teor disponível de micronutrientes catiônicos tem sido determinado pelo uso de HCl 0,1N (Rio Grande do Sul e Santa Catarina), do extrator Mehlich (Minas Gerais) e DTPA (São Paulo).

Em todos os casos existem ainda dificuldades para interpretação da fertilidade do solo e indicação apropriada de fertilizantes com base nos resultados de análise. Em parte, isto se deve ao fato de que os estudos envolvendo micronutrientes são de desenvolvimento relativamente recente no país.

## **5.3.2. Unidades de Expressão dos Resultados**

Em conformidade com o sistema internacional de unidades, as unidades atualmente em uso nos laboratórios de análise do solo do Brasil são:  $\text{mg}/\text{dm}^3$ ,  $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$  e  $\text{g}/\text{kg}$ . Entretanto, bibliografias importantes publicadas anteriormente à década de 90 apresentam as antigas unidades ppm,  $\text{meq}/100 \text{ cm}^3$  e %.

Para os íons trocáveis usa-se o milimol de carga ( $\text{mmol}_c$ ) ou centimol de carga ( $\text{cmol}_c$ ) por  $\text{dm}^3$ . Considerando que o  $\text{mmol}_c$  é a massa atômica do cátion dividida pela

---

sua carga, tem-se que  $\text{mmol}_c$  tem o mesmo valor do miliequivalente (meq). Assim sendo, se necessária a conversão de  $\text{meq}/100 \text{ cm}^3$  (unidade antiga) para  $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$  (sistema internacional) basta multiplicar por 10, simplesmente devido ao aumento de 10 vezes no volume de solo (Quadro 5.1). No estado de Minas Gerais, a CFSEMG (1999) recomenda adotar-se a unidade  $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ , para a qual a conversão é direta.

No caso do fósforo, enxofre e micronutrientes, ao invés de ppm, passa-se a usar  $\text{mg}/\text{dm}^3$ , mantendo-se o valor na transformação (Quadro 5.1).

No caso dos teores de C, N total e matéria orgânica e análise granulométrica a representação em % é transformada para g/kg, com fator de conversão de 10. Em Minas Gerais, tem-se usado dag/kg (decagrama por kg) como unidade equivalente a % (Quadro 5.1).

Também, considerando-se o sistema internacional, a condutividade elétrica da solução é expressa em Siemen por metro (Quadro 5.1).

**Quadro 5.1. Unidades antigas e atuais usadas para representar resultados de análises de solos e fatores de conversão.**

Representação antiga	Representação atual	Fator de conversão
$\text{meq}/100 \text{ cm}^3$	$\text{mmol}_c/\text{dm}^3$	10
$\text{meq}/100 \text{ cm}^3$	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ (Minas Gerais)	1
ppm	$\text{mg}/\text{dm}^3$	1
%	g/kg (ou $\text{g}/\text{dm}^3$ )	10
%	dag/kg (Minas Gerais)	1
mmho/cm	S/m	0,1

### 5.3.3. Classes de Fertilidade

Para a interpretação dos resultados de análise de solo emitidos por um dado laboratório existem tabelas elaboradas, normalmente, por pesquisadores do estado em que está inserido o laboratório. Logicamente, tais tabelas, especificando os limites de classes de teores de nutrientes refletem os métodos em uso no estado, bem como todo o avanço do conhecimento gerado pelos pesquisadores envolvidos em fertilidade do solo no referido estado. Mais adiante, no estudo das recomendações de adubação, para o que também existem tabelas preparadas regionalmente, será enfatizado que, desde que o método de análise seja o mesmo, o técnico pode fazer a interpretação dos resultados e emitir sua recomendação com base na consulta a tabelas de diferentes estados.

Em Minas Gerais, a CFSEMG (1999) estabeleceu os critérios para interpretação de resultados de análises de solo, que são apresentados nos Quadros 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6.

**Quadro 5.2. Classes de interpretação para a acidez ativa do solo (pH)\*.**

Classificação química						
Ac. Muito elevada	Acidez elevada	Acidez media	Acidez fraca	Neutra	Alcalinidade fraca	Alcalinidade elevada
< 4,5	4,5 - 5,0	5,1 - 6,0	6,1 - 6,9	7,0	7,1 - 7,8	> 7,8
Classificação agrônômica**						
Muito baixo	Baixo	Bom	Alto	Muito alto		
< 4,5	4,5 - 5,4	5,5 - 6,0	6,1 - 7,0	> 7,0		

\* pH em H<sub>2</sub>O, relação 1:2,5, TFSA:H<sub>2</sub>O. \*\* A qualificação utilizada indica adequado (bom) ou inadequado (muito baixo e baixo ou alto e muito alto).

O princípio geral de separação das classes, a grosso modo, baseia-se numa produção relativa de 0-70%, 71-90%, 91-100%, e > 100% respectivamente, para os níveis muito baixo, baixo, médio e, alto ou muito alto.

Para certas culturas, como por exemplo café, em face de estudos mais avançados de correlação e calibração, tem-se alterações nestes critérios de interpretação no que diz respeito aos limites para as classes de teores dos nutrientes.

**Quadro 5.3. Classes de interpretação de fertilidade do solo para a matéria orgânica e para o complexo de troca catiônica.**

Característica	Unidade	Classificação				
		Muito baixo	Baixo	Médio*	Bom	Muito Bom
Carbono orgânico (C.O.)	dag/kg	≤ 0,40	0,41-1,16	1,17-2,32	2,33-4,06	> 4,06
Matéria orgânica (M.O.)	"	≤ 0,70	0,71-2,00	2,01-4,00	4,01-7,00	> 7,00
Cálcio trocável (Ca <sup>2+</sup> )	cmol <sup>c</sup> /dm <sup>3</sup>	≤ 0,40	0,41-1,20	1,21-2,40	2,41-4,00	> 4,00
Magnésio trocável (Mg <sup>2+</sup> )	"	≤ 0,15	0,16-0,45	0,46-0,90	0,91-1,50	> 1,50
Acidez trocável (Al <sup>3+</sup> )**	"	≤ 0,20	0,21-0,50	0,51-1,00	1,01-2,00	> 2,00
Soma de bases (SB)	"	≤ 0,60	0,61-1,80	1,81-3,60	3,61-6,00	> 6,00
Acidez potencial (H + Al)**	"	≤ 1,00	1,01-2,50	2,51-5,00	5,01-9,00	> 9,00
CTC efetiva (t)	"	≤ 0,80	0,81-2,30	2,31-4,60	4,61-8,00	> 8,00
CTC pH 7 (T)	"	≤ 1,60	1,61-4,30	4,31-8,60	8,61-15,00	> 15,00
Saturação por Al <sup>3+</sup> (m)**	%	≤ 15,0	15,1-30,0	30,1-50,0	50,1-75,00	> 75,0
Saturação por bases (V)	"	≤ 20,0	20,1-40,0	40,1-60,0	60,1-80,0	> 80,0

O limite superior desta classe indica o nível crítico. \*\* A interpretação destas características, nestas classes, deve ser alta e muito alta em lugar de bom e muito bom.

Com relação aos Quadros 5.4 e 5.5, cabe destacar a introdução pela CFSEMG (1999) da determinação do fósforo remanescente – P-rem – como critério auxiliar na interpretação da disponibilidade de fósforo e enxofre. Tal determinação consiste em se medir o teor de P disponível – P remanescente – após certo tempo de contato entre uma amostra do solo com solução de  $\text{CaCl}_2$  contendo 60 mg de P/L (Alvarez V. et al., 2000), como forma de inferir sobre a capacidade tampão do solo. Dessa maneira, no Quadro 5.4 por exemplo, quanto menor o valor de P-rem, de forma análoga à presença de maiores teores de argila, maior a capacidade do solo promover a fixação de fosfatos – maior capacidade tampão. Portanto, o valor de P-rem depende da ocorrência e poder de fixação de fósforo de certos constituintes do solo, os quais afetam intensamente a disponibilidade de P, conforme será detalhado no Capítulo 12.

**Quadro 5.4. Classes de interpretação da disponibilidade para o fósforo de acordo com o teor de argila do solo ou do valor de fósforo remanescente (P-rem) e para o potássio**

Característica	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Bom	Muito bom
	(mg/dm <sup>3</sup> )				
	.....Fósforo disponível (P).....				
Argila (%)					
60 – 100	≤ 2,7	2,8-5,4	5,5-8,0	8,1-12,0	> 12,0
35 – 60	≤ 4,0	4,1-8,0	8,1-12,0	12,1-18,0	> 18,0
15 – 35	≤ 6,6	6,7-12,0	12,1-20,0	20,1-30,0	> 30,0
0 – 15	≤ 10,0	10,1-20,0	20,1-30,0	30,1-45,0	> 45,0
P-rem (mg/L)**					
0 – 4	≤ 3,0	3,1-4,3	4,4-6,0	6,1-9,0	> 9,0
4 – 10	≤ 4,0	4,1-6,0	6,1-8,3	8,4-12,5	> 12,5
10 – 19	≤ 6,0	6,1-8,3	8,4-11,4	11,5-17,5	> 17
19 – 30	≤ 8,0	8,1-11,4	11,5-15,8	15,9-24,0	> 24,0
30 – 44	≤ 11,0	11,1-15,8	15,9-21,8	21,9-33,0	> 33,0
44 – 60	≤ 15,0	15,1-21,8	21,9-30,0	30,1-45,0	> 45,0
	.....Potássio disponível (K).....				
	≤ 15	16-40	41-70	71-120	> 120

\* Método Mehlich-1. \*\* P-rem = Fósforo remanescente, concentração de fósforo da solução de equilíbrio após agitar durante 1 h a TFSA com solução de  $\text{Ca Cl}_2$  contendo 60 mg/L de P, na relação 1:10.

**Quadro 5.5. Classes de interpretação da disponibilidade para enxofre de acordo com o valor de fósforo remanescente (P-rem).**

P-rem (mg/L)	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Bom	Muito bom
	(mg/dm <sup>3</sup> )				
	.....Enxofre disponível (S) <sup>*</sup> .....				
0 – 4	≤ 1,7	1,8-2,5	2,6-3,6	3,7-5,4	> 5,4
4 – 10	≤ 2,4	2,5-3,6	3,7-5,0	5,1-7,5	> 7,5
10 – 19	≤ 3,3	3,4-5,0	5,1- 6,9	7,0-10,3	> 10,3
19 – 30	≤ 4,6	4,7-6,9	7,0-9,4	9,5-14,2	> 14,2
30 – 44	≤ 6,4	6,5-9,4	9,5-13,0	13,1-19,6	> 19,6
44 – 60	≤ 8,9	9,0-13,0	13,1-18,0	18,1-27,0	> 27,0

Método do Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.

**Quadro 5.6. Classes de interpretação da disponibilidade para os micronutrientes.**

Micronutriente	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio <sup>*</sup>	Bom	Muito bom
	.....(mg/dm <sup>3</sup> ).....				
Zinco disponível (Zn)	≤ 0,4	0,5-0,9	1,0-1,5	1,6-2,2	> 2,2
Manganês disponível (Mn)	≤ 2	3-5	6-8	9-12	> 12
Ferro disponível (Fe)	≤ 8	9-18	19-30	31-45	> 45
Cobre disponível (Cu)	≤ 0,3	0,4-0,7	0,8-1,2	1,3-1,8	> 1,8
Boro disponível (B)	≤ 0,15	0,16-0,35	0,36-0,60	0,61-0,90	> 0,90

O limite superior desta classe indica o nível crítico.

Nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, que apresentam metodologias analíticas iguais às realizadas em Minas Gerais, extrator Mehlich para P e K e extrator KCl 1N para Ca e Mg, “Comissão de Fertilidade do Solo RS e SC (1994)” estabeleceu as seguintes classes e limites de fertilidade (Quadros 5.7, 5.8 e 5.9).



**Quadro 5.7. Interpretação geral dos resultados de análise do solo para o Rio Grande do Sul e Santa Catarina.**

Classes	pH em água	Matéria Orgânica	Ca	Mg	K
		dag/kg	.....cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> .....		mg/dm <sup>3</sup>
Limitante	-	-	-	-	≤ 20
Muito baixo	≤ 5,0	-	-	-	21-40
Baixo	5,1 -5,5	≤ 2,5	≤ 2,0	≤ 0,5	41-60
Médio	6,6-6,0	2,6-5,0	2,1-4,0	0,6-1,0	61-80
Suficiente	-	-	-	-	81-120
Alto	>6,0	>5,0	>4,0	>1,0	>120

**Quadro 5.8. Interpretação dos resultados de fósforo “extraível” do solo para as principais culturas no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina.**

Interpretação do P no solo (Níveis)	Classes de Solos*					
	1	2	3	4	5	6
	.....mg/dm <sup>3</sup> .....					
Limitante	≤ 1,0	≤ 1,5	≤2,0	≤ 3,0	≤ 4,0	-
Muito baixo	1,1-2,0	1,6-3,0	2,1-4,0	3,1-6,0	4,1-8,0	-
Baixo	2,1-4,0	3,1-6,0	4,1-9,0	6,1-12,0	8,1-16,0	≤ 3,0
Médio	4,1-6,0	6,1-9,0	9,1-14,0	12,1-18,0	16,1-24,0	3,1-6,0
Suficiente	>6,0	>9,0	>14,0	>18,0	>24,0	>6,0
Alto	>8,0	>12,0	>18,0	>24,0	>30,0	-

\* Classe 1: >55% argila; Classe 2: 41-55% argila; Classe 3: 26-40% argila; Classe 4: 11-25% de argila; Classe 5: <10% argila; Classe 6: solos alagados (arroz irrigado por inundação).

**Quadro 5.9. Interpretação dos resultados de análise de solo para enxofre, cobre, zinco e boro, para os solos e condições do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.**

Classes	Enxofre <sup>1</sup>	Cobre <sup>2</sup>	Zinco <sup>2</sup>	Boro <sup>3</sup>
	.....mg/dm <sup>3</sup> .....			
Baixo	<2,0	<0,15	<0,20	<0,1
Médio	2,0-5,0	0,15-0,40	0,20-0,50	0,1-0,3
Suficiente	>5,0 <sup>4</sup>	>0,40	> 0,5	>0,3

1. Extraído com fosfato de cálcio com 500 mg P/dm<sup>3</sup>;

2. Extraídos com HCl 0,1 M;

3. Extraído por água quente;

4. 10 mg/dm<sup>3</sup> para leguminosas e culturas mais exigentes em enxofre, como brássicas

Em São Paulo, a partir de 1983, a interpretação da análise de solo foi alterada, visando adaptá-la ao método de análise pelo uso de resina trocadora de ânions e de cátions (Raij e Quaggio, 1983; Raij et al., 1996). E, para os micronutrientes catiônicos, foi adotado o extrator DTPA (Quadros 5.10 e 5.11).

**Quadro 5.10. Limites de interpretação da análise de solo adotados pelo Instituto Agrônomo de Campinas para fósforo e potássio.**

Teor	Produção Relativa (%)	P-resina (mg/dm <sup>3</sup> )				K-trocável (mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )
		Florestais	Perenes	Anuais	Hortaliças	
Muito baixo	0-70	0-2	0-5	0-6	0-10	0,0-0,7
Baixo	71-90	3-5	6-12	7-15	11-25	0,8-1,5
Médio	91-100	6-8	13-30	16-40	26-60	1,6-3,0
Alto	>100	9-16	31-60	41-80	61-120	3,1-6,0
Muito Alto	>100	>16	>60	>80	>120	>6,0

**Quadro 5.11. Limites de interpretação adotados pelo Instituto Agrônomo de Campinas para os macronutrientes secundários e micronutrientes.**

Nutriente	Unidade	Teor		
		Baixo	Médio	Alto
Cálcio	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	<3	4-7	>7
Magnésio	"	<4	5-8	>8
Enxofre	mg/dm <sup>3</sup>	<6	5-10	>10
Boro <sup>1</sup>	"	<0,20	0,21-0,60	>0,60
Cobre <sup>2</sup>	"	<0,2	0,3-0,8	>0,8
Ferro <sup>2</sup>	"	<4	5-12	>12
Manganês <sup>2</sup>	"	<1,2	1,3-5,0	>5,0
Zinco <sup>2</sup>	"	<0,5	0,6-1,2	>1,2

1. Extraído com água quente;

2. Extraídos com DTPA

Não são fornecidas, em São Paulo, classes de teores para matéria orgânica e outros valores fornecidos pela análise de solo, que são acidez potencial, soma de bases e capacidade de troca de cátions. Isso porque não se encontrou um critério lógico, em termos de fertilidade do solo, que relacione essas variáveis com produtividade ou necessidade de diferenciar o manejo (Raij, 1991).

Finalizando, uma vez mais torna-se necessário enfatizar que é inadmissível conceber qualquer atuação do técnico no sentido de interpretar os resultados do laudo da análise do solo sem se preocupar ou ter participado das etapas de amostragem do solo e escolha do laboratório. Ou seja, é discutível qualquer recomendação de calagem e de adubação a partir de um laudo de análise do solo, de cuja obtenção o técnico não tenha completo domínio.

Os valores de pH dos solos variam grandemente, numa faixa entre 3 e 10. A reação do solo é o fator que, em geral, mais afeta a disponibilidade dos nutrientes às plantas. Sabe-se que a maior disponibilidade ocorre na faixa de pH entre 6,0 e 7,0. Sob acidez ou alcalinidade excessiva, entre outros problemas para as plantas, tem-se uma baixa disponibilidade de nutrientes. Portanto, antes da adubação e, na verdade, antes do preparo do solo, deve-se procurar saber as condições de acidez do solo.

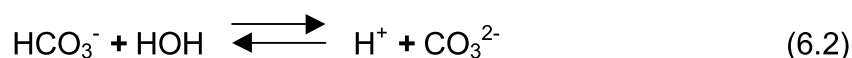
No Brasil, o maior problema relacionado à reação do solo diz respeito ao fato de que cerca de 70% dos solos cultivados apresentam acidez excessiva. Assim, a prática da calagem torna-se de vital importância no manejo da fertilidade do solo.

### 6.1. ORIGEM DA ACIDEZ DOS SOLOS

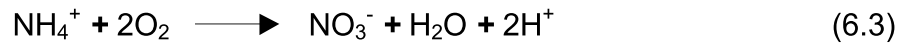
Em resumo, a acidificação do solo consiste na remoção dos cátions básicos –  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  – do sistema solo, substituindo-os por cátions ácidos –  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+$ .

Em primeiro lugar, precisa-se considerar que o material de origem do solo influencia o grau de acidez do mesmo. Os solos serão naturalmente ácidos quando a rocha de origem for pobre em bases ou, então, mesmo quando rica em bases, houve intenso processo pedogenético (intemperismo). Neste último caso, uma condição de precipitação mais intensa, ao longo dos anos, promove grande lixiviação das bases, permanecendo no complexo de troca, predominantemente, os cátions hidrogênio e alumínio. Essa é a situação apresentada por muitos latossolos originados de rochas básicas.

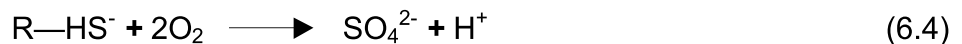
A decomposição da matéria orgânica gera acidez de diversas formas. O  $\text{CO}_2$  produzido, em solos com pH acima de 5,2, promove acidificação, segundo as reações:



A decomposição da matéria orgânica também produz  $\text{NH}_4^+$ , que pode acidificar o solo através da reação de nitrificação:

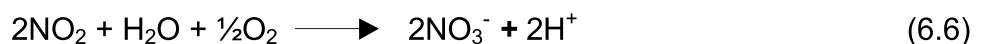
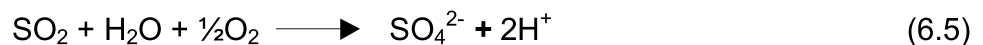


E, por fim, a oxidação do enxofre por bactérias autotróficas, partindo-se de compostos resultantes da decomposição da matéria orgânica por bactérias heterotróficas, também resulta na produção de íons  $\text{H}^+$  conforme a seguir:



A emissão de óxidos de enxofre e de nitrogênio por refinarias de petróleo, termoelétricas, siderurgias e outras fontes poluidoras da atmosfera resulta na chuva ácida, representando mais um processo de acidificação dos solos.

Os óxidos de enxofre e de nitrogênio carregados para o solo pela chuva sofrem oxidação formando ácidos fortes, da seguinte forma:

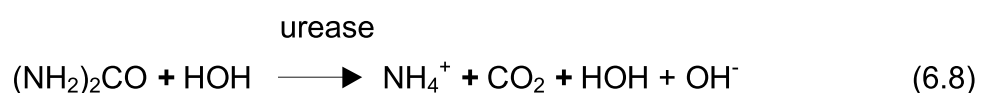


O fenômeno da precipitação ácida pode ocorrer a grandes distâncias a partir do local onde os óxidos são emitidos para a atmosfera, dependendo da geografia, relevo e regime de ventos, sendo responsável por alguns desastres ambientais e agrícolas. A precipitação ácida, é verdade, fica mais restrita a região próxima da grande fonte poluidora. No Brasil, a degeneração da Mata Atlântica na região de Cubatão, anos atrás, foi um exemplo.

Os fertilizantes aplicados ao solo, após reação dos mesmos, produzem significativa alteração no pH do solo. Muitas vezes a alteração fica restrita à região próxima do grânulo, pela menor mobilidade da molécula. Por exemplo, o fosfato monocálcico hidrolisa produzindo valores de pH de cerca de 1,5 na região do grânulo, em função da seguinte reação:



A maior alteração do pH do solo é promovida pelos fertilizantes nitrogenados amoniacais, ou por aqueles que resultam na formação de amônio no solo, como é o caso da uréia. O amônio adicionado ou formado no solo gera acidez conforme a reação 6.3. Na verdade, no caso da uréia, a sua hidrólise resulta, inicialmente, numa elevação do pH na proximidade do grânulo para cerca de 8 a 9, conforme a reação abaixo:



O aumento de pH é muito localizado, mas pode ter implicações na atividade biológica, segundo discussão a ser feita no Capítulo 11. Além de localizado, tal aumento é transitório, pois o amônio produzido vai gerar muita acidez (reação 6.3). De qualquer forma, no balanço geral, a uréia é menos acidificante que o sulfato de amônio, justamente devido ao aumento de pH, inicialmente produzido pela hidrólise da uréia.

O Quadro 6.1. mostra as alterações produzidas na acidez do solo em função do sistema de preparo do solo, da rotação de cultura e da adubação com sulfato de amônio. Apenas o milho foi adubado, incluindo-se a adubação ou não com sulfato de amônio.

**Quadro 6.1. Resultados analíticos para a acidez ativa e acidez trocável, em função do sistema de preparo do solo, sucessão de cultura e da adubação com sulfato de amônio, após sete anos de cultivo (Paiva, 1990).**

Preparo do Solo	Sucessão de cultura	Nitrogênio aplicado no milho (kg/ha)	pH em água	Al <sup>3+</sup> (cmolc/dm <sup>3</sup> )
Plantio convencional	Milho/pousio	0	5,6	0,15
		90	5,0	0,78
	Milho/tremoço	0	5,0	0,35
		90	4,6	1,05
Plantio Direto	Milho/pousio	0	5,5	0,18
		90	5,0	0,90
	Milho/tremoço	0	5,1	0,40
		90	4,7	1,20
Solo antes do cultivo	-	-	6,8	0,1

Finalmente, deve-se considerar que as próprias plantas podem alterar o pH do solo. As raízes alteram o pH através da liberação de íons H<sup>+</sup> ou OH<sup>-</sup>, em função do balanço entre a absorção de cátions e ânions, dado a necessidade do balanço eletroquímico tanto no citoplasma das células da raiz quanto na solução do solo. A maior influência na relação de absorção entre cátions e ânions é exercida pelo nitrogênio, que é um nutriente absorvido em grandes quantidades e o único que pode ser absorvido na forma catiônica ou aniônica. Uma maior absorção da forma nítrica causa uma elevação do pH da solução, enquanto que a maior absorção da forma amoniacal resulta no abaixamento do pH. No caso de leguminosas, cultivadas sob fixação de N<sub>2</sub>, há também uma tendência de acidificação do solo (Quadro 6.1.). Neste último caso, a absorção de cátions, notadamente de potássio, suplanta a absorção de ânions.

Esse efeito das raízes tende a ser mais importante ao redor das mesmas. Ou melhor, as raízes tendem a criar um microambiente de pH na sua vizinhança (Rizosfera), o qual pode diferir em muito do pH do solo adjacente.

Tal efeito é um complicador a mais para o entendimento do conceito de disponibilidade de nutrientes, conforme discutido no Capítulo 1. Por exemplo, a nutrição amoniacal num solo com pH 7,5 pode resultar na acidificação da rizosfera para pH 6,0, aumentando em mais de 1000 vezes a disponibilidade de ferro. Para todos os efeitos, através dos métodos convencionais de avaliação do pH do solo, a acidez desse solo seria considerada como sendo apenas igual a 7,5, dificultando a interpretação da disponibilidade de ferro.

Ainda relacionado com as plantas, deve-se considerar que o próprio processo da colheita representa uma importante fonte de acidificação dos solos. Qualquer material vegetal – folhas, caule, grãos, flor e tubérculos – colhido é muito rico em bases, que são, portanto, constantemente removidas do sistema solo. Por exemplo, a colheita de cerca de 1,0 ton/ha de grãos de feijão promove a remoção de aproximadamente 40 kg/ha de bases.

## 6.2. COMPONENTES DA ACIDEZ DOS SOLOS

A raiz das plantas, de forma direta, é afetada apenas pelas condições prevalecentes na solução do solo. Portanto, dado a importância da acidez do solo para o crescimento das raízes e, por conseqüência, das plantas, torna-se importante destacar que, na verdade, a acidez diz respeito à solução do solo. Todavia, considerando a grande influência exercida pela fase sólida sobre a solução do solo, torna-se mais importante ainda considerar que a acidez do solo é algo mais complexo, além da simples atividade de íons  $H^+$  na solução.

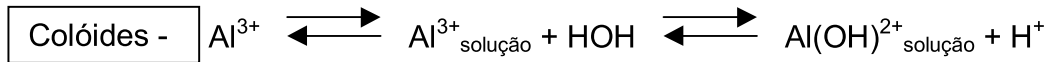
Com base nas considerações feitas no estudo de troca iônica no solo, sabe-se que os íons  $H^+$  do sistema solo estão predominantemente retidos na fase sólida. A fração de íons  $H^+$  na solução do solo representa a Acidez Ativa. Apesar da fração de  $H^+$  livres na solução ser muito reduzida, ela é quimicamente ativa e, entre outros aspectos, exerce grande efeito na disponibilidade dos nutrientes.

A acidez ativa é medida pelo índice pH sendo mais comum a determinação do pH em água ou  $CaCl_2$ . Todavia, seu valor fica sujeito a certas variações, principalmente em função da presença de sais no solo, que reduzem o valor do pH. Por isso, alguns laboratórios, ao invés da água, usam a solução de  $CaCl_2$  0,01M, que permite manter constante a concentração salina, comparável à concentração das soluções de solos de alta fertilidade. O pH em  $CaCl_2$  0,01M é cerca de 0,5 unidades menor que o pH em água, em média.

Por mais ácido que seja um solo, é extremamente fácil corrigir a acidez ativa. Bastaria alguns quilos de calcário por hectare. Entretanto, à medida que se neutraliza os íons  $H^+$  da solução, a fase sólida direta ou indiretamente libera  $H^+$  para a solução. Os íons  $H^+$  (diretamente) e os íons  $Al^{3+}$  (indiretamente), adsorvidos nos colóides da fase sólida, resultam na Acidez Potencial.

---

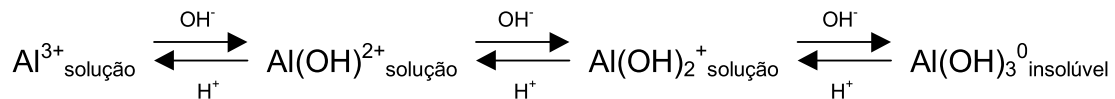
O alumínio é um componente de destaque na acidez dos solos. Em primeiro lugar, o alumínio é causa da acidez excessiva de certos solos, pois, ao ser deslocado dos sítios de adsorção para a solução este cátion hidrolisa produzindo íons  $H^+$  conforme esquematizado na Figura 6.1.



**Figura 6.1. Representação esquemática da hidrólise do alumínio trocável, quando deslocado para a solução do solo.**

Portanto o alumínio trocável gera acidez ativa, que existia em potencial. De outra forma, o alumínio representa parte da acidez potencial, denominada Acidez Trocável.

É importante ressaltar que ao tentar-se elevar o pH do solo, através da injeção de oxidrilas na solução – via calagem, por exemplo –, o alumínio consome sucessivamente oxidrilas até precipitar-se na forma  $Al(OH)_3$ , em valores de pH acima de cerca de 6,0. A Figura 6.2. ilustra os três estágios da hidrólise de alumínio.



**Figura 6.2. Representação esquemática da hidrólise do alumínio, em seus três estágios, em função do pH da solução. Cada  $Al^{3+}$  deslocado para a solução gera 3  $H^+$  ou, de outra forma, consome 3  $OH^-$  para sua neutralização.**

Além de gerar acidez ativa, o alumínio trocável, em qualquer uma das suas formas iônicas solúveis, é um elemento altamente fitotóxico. Entre outros problemas, o alumínio atua no meristema apical da raiz, cessando a divisão celular, portanto, paralisando o crescimento das raízes.

Dado ao destacado papel do alumínio na acidez dos solos, tanto por gerar acidez quanto por ser fitotóxico, seu teor no solo representa parte da acidez potencial, denominada Acidez Trocável ou Acidez Nociva. Assim, a partir do resultado da análise química do solo, o teor de alumínio trocável ou a percentagem de saturação de alumínio dão uma idéia da acidez trocável ou nociva.

Sabe-se que os íons  $H^+$  não participam das reações normais de troca iônica, isto é, não são trocáveis. A ligação covalente do  $H^+$  com os colóides requer alta energia para ser desfeita, que é conseguida apenas através da reação de neutralização com íons  $OH^-$  introduzidos na solução do solo. Os íons  $H^+$  da fase sólida constituem a outra parte da acidez potencial, denominada Acidez Não-trocável. Essa acidez praticamente não causa qualquer problema para o crescimento das plantas. Na prática, em solos com maior teor de matéria orgânica, que apresentam grande quantidade de íons  $H^+$  adsorvidos nos grupamentos



carboxílicos e fenólicos, essa acidez representa apenas o gasto de uma maior quantidade de calcário para elevar o pH do solo, em função de um maior poder tampão.

Segundo o que já foi visto, em valores de pH acima de cerca de 6,0 ainda existe acidez ativa e acidez não-trocável, mas não acidez trocável ou nociva, pois todo o alumínio já foi precipitado na forma  $\text{Al(OH)}_3$ . Em termos práticos, nessa condição não há mais efeito desfavorável da acidez para as plantas. A continuada neutralização da acidez não-trocável, com a conseqüente neutralização da acidez ativa na faixa de pH 6 a 7, traria como benefício maior aumento da CTC do solo e aumento da atividade de certos microrganismos.

### 6.3. PODER TAMPÃO DOS SOLOS

A capacidade ou poder tampão do solo diz respeito à resistência do solo em ter o valor de seu pH alterado, quando tratado com base ou com ácido. Quanto maior a acidez potencial maior será o poder tampão do solo. Assim, solos mais argilosos ou com argila de maior atividade ou solos com maiores teores de matéria orgânica possuem maior poder tampão do que solos mais arenosos ou argilosos com argila de baixa atividade ou solos com menores teores de matéria orgânica.

Se a um dado solo forem adicionadas quantidades crescentes de calcário e for medido o pH resultante após a reação do corretivo, são obtidas curvas de neutralização. A Figura 6.3. mostra curvas de neutralização para dois solos, como tendência geral, com poder tampão bem contrastantes. Num solo com baixo poder tampão, é preciso estar atento para o fato de que a aplicação de pequenas doses de calcário em excesso podem elevar o pH para acima de 7,0, o que acarreta a redução da disponibilidade de vários nutrientes, notadamente de micronutrientes.

---

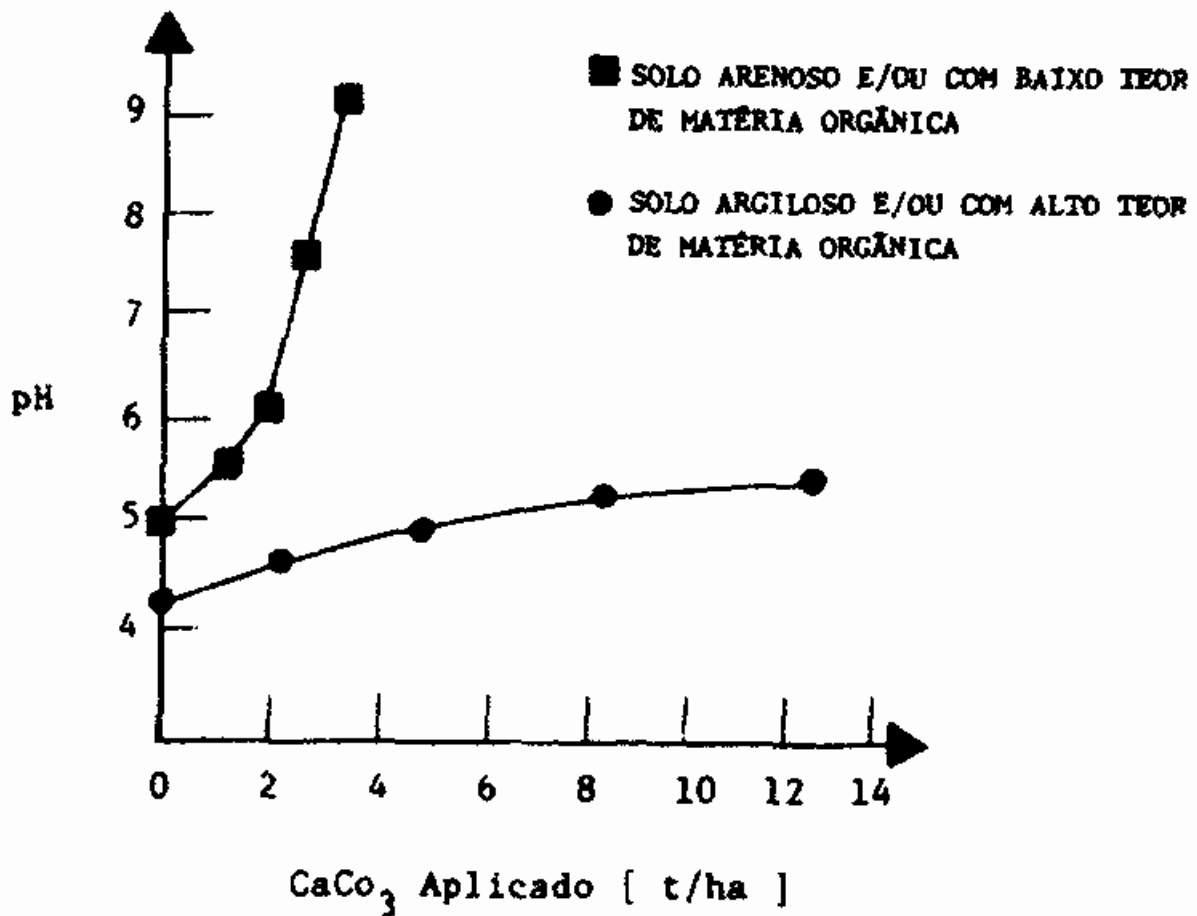


Figura 6.3. Representação de curvas de neutralização, como tendência geral, de dois solos com poder tampão bastante distintos.

Muitas vezes o conceito de poder tampão é mais focado no sentido do aumento do pH do solo, ou seja, partindo-se de um solo com pH ácido, qual seria a sua resistência em ter seu pH elevado. Este enfoque está ligado à determinação da necessidade de calcário para elevar o pH a um valor desejado. Por outro lado, deve-se lembrar sempre que a resistência que o solo oferece em ter seu pH elevado é idêntica àquela para ter seu pH diminuído. Portanto, considerando as causas de acidificação dos solos, principalmente pelo uso de fertilizantes nitrogenados e pela remoção das bases pelas colheitas, é preciso estar atento para a resistência que o solo oferece em ter seu pH decrescido. Isto tem implicações, inclusive, na frequência de análise química do solo para avaliar a sua acidez. Como enfatizado, quanto menor o poder tampão do solo, menor será a dose de calcário necessária para se atingir o pH desejado. Porém, menor também será o espaço de tempo entre uma amostragem e outra, pois o processo de acidificação ocorre mais rapidamente, havendo, portanto, necessidade de calagens mais freqüentes.

#### 6.4. CAUSAS DO MENOR CRESCIMENTO DAS PLANTAS EM SOLOS ÁCIDOS E ALCALINOS

O crescimento da maioria das plantas é drasticamente reduzido, tanto sob acidez quanto alcalinidade excessivas. Em qualquer uma das condições, normalmente, são várias as causas da baixa produção vegetal. Ademais, é preciso considerar que as causas variam com o próprio pH do solo, com a textura e mineralogia, com o teor e tipo de matéria orgânica, com a força iônica da solução do solo e com a espécie vegetal ou, até mesmo, com o genótipo dentro de uma mesma espécie.

As principais causas do baixo crescimento das plantas em solos ácidos são as seguintes:

##### a) Toxidez por $H^+$ , $Mn^{2+}$ e $Al^{3+}$

Os efeitos diretos de íons  $H^+$  no crescimento das plantas é difícil de ser determinado em condições de solo, pois vários outros fatores atuam simultaneamente aos íons  $H^+$ . Estudos em solução nutritiva ou em areia pura mostram que os íons  $H^+$  causam problemas apenas se o pH da solução cai abaixo de 4,5. Nestas condições, o excesso de íons  $H^+$  ao que tudo indica, desloca o Ca da plasmalema, alterando sua permeabilidade e reduzindo o crescimento de raízes. Relacionado a essa competição com o  $Ca^{2+}$ , deve-se destacar que o aumento da concentração de cálcio na solução alivia os efeitos prejudiciais dos íons  $H^+$  conforme mostra o Quadro 6.2. Com base em resultados desta natureza, explica-se, pelo menos em parte, os efeitos benéficos do uso do gesso em solos ácidos. O gesso não eleva o pH da solução, mas aumenta a concentração de cálcio na mesma. Ademais, deve-se destacar que o cálcio é o nutriente mais importante para o crescimento de raízes.

**Quadro 6.2. Efeito da concentração de íons  $H^+$  e de  $Ca^{2+}$  em solução nutritiva no crescimento de raiz de soja (Lund, 1970)**

Concentração de Cálcio (mg/dm <sup>3</sup> )	Comprimento da raiz principal (mm)	
	pH 4,5	pH 5,6
0,05	24	461
0,5	270	453
2,5	422	455

Além do efeito na permeabilidade de membranas e no crescimento de raízes, a atividade de íons  $H^+$  na solução do solo afeta diretamente as leguminosas crescendo com fixação de  $N_2$ . Uma elevada atividade reduz a sobrevivência e multiplicação de bactérias no solo, reduz o processo de infecção e estabelecimento do nódulo e, também, a eficiência da simbiose.

Solos muito ácidos, com material de origem rico em manganês, podem apresentar elevados teores de manganês solúvel, também tóxico para as plantas, quando absorvido em quantidades excessivas. Sob condições de solo ácido, a forma inerte de manganês  $MnO_2$  é reduzida para forma  $Mn^{2+}$ . Portanto, o teor de Mn disponível na solução depende de reações de oxiredução, afetadas, entre outros fatores, pelo pH do solo.

A disponibilidade de  $Mn^{2+}$  na solução do solo, em função do pH, tem comportamento bem semelhante à disponibilidade de  $Al^{3+}$ . Em síntese, o aumento do pH implica na redução da disponibilidade. O pH necessário para neutralizar o  $Mn^{2+}$  tóxico é cerca de 0,5 unidade maior que aquele exigido para o alumínio, portanto, em torno de 6,5. Obviamente, para o manganês, dado a sua essencialidade, a elevação do pH muito além desse valor é totalmente indesejável.

A toxidez de manganês em solos ácidos é muito menos generalizada que a de alumínio, pois a de manganês ocorre apenas em solos originários de material de origem ricos nesse nutriente. Por exemplo, em latossolos originários de rochas básicas, a possibilidade de ocorrência de toxidez de manganês é muito maior do que em solos originários de arenito. Na verdade, esses últimos são mais predispostos à deficiência de manganês do que à toxidez.

O manganês, ao contrário do alumínio, não afeta as raízes diretamente, mas sim a parte aérea. Frequentemente, dada à interação do manganês com outros nutrientes, a sua toxidez pode manifestar-se no início como deficiência induzida de cálcio, magnésio e, em especial, de ferro e, posteriormente, como toxidez propriamente dita. Esta manifesta-se primeiramente nas folhas mais novas, através de pontuações de cor marrom ao longo das nervuras, devido ao acúmulo de óxidos de manganês, envoltas por zonas cloróticas. As folhas das dicotiledôneas, muito sensíveis à toxidez de manganês, se deformam ficando encarquilhadas.

Dentre as principais causas do pouco crescimento das plantas em solos ácidos está a toxidez causada pelo alumínio, que é o cátion mais abundante na crosta terrestre, com participação na estrutura de vários minerais primários e secundários. A liberação do alumínio da fase sólida, tanto por dissolução de óxidos hidratados quanto por substituição do alumínio do interior das camadas octaedrais dos minerais, está diretamente ligada ao processo de acidificação do solo, ou seja ação dos ions hidrogeniônicos. Assim, com a acidificação dos solos, o  $Al^{3+}$  tende a constituir um dos principais cátions na nuvem de contra-ions dos colóides do solo.

Conforme já visto, o alumínio em solo ácido, dependendo do seu estágio de hidrólise, pode apresentar-se na solução em diversas formas iônicas (Figura 6.2). Qualquer uma das formas solúveis, podem atingir a superfície das raízes. Dos elementos químicos normalmente presentes no solo, o alumínio é o que apresenta maior potencial fitotóxico.

Ainda não se conhece com exatidão as bases bioquímicas da fitotoxidez de alumínio. O que se sabe é que sua ação é mais pronunciada no sistema radicular, o que torna as

raízes, indistintamente, mais grossas e curtas (Foy, 1974). Como consequência da diminuição na proliferação de raízes, há redução na capacidade de exploração de água e de nutrientes presentes no perfil do solo, bem como redução na síntese de reguladores de crescimento nas partes novas das raízes, os quais, portanto, deixam de ser transportados para a parte aérea. Basicamente, essa alteração marcante no sistema radicular se deve ao efeito do alumínio no processo de divisão celular, ou seja, o alumínio ligando ao fosfato na molécula do DNA, reduz a atividade de replicação e de transcrição.

Em consequência do grande espectro de atuação do alumínio nos processos metabólicos das plantas, os sintomas de toxidez ocasionados por este elemento tendem a ser expressos de várias formas. Conforme já ressaltado, os primeiros sintomas aparecem nas raízes, as quais tornam-se curtas, engrossadas, quebradiças e adquirem coloração escura. A extremidade delas fica amarronzada e o sistema radicular como um todo é desprovido de ramificações finas, além de apresentar aparência coralóide.

A toxidez de alumínio na parte aérea é caracterizada por uma sensível redução no crescimento das plantas e por sintomas semelhantes àqueles da deficiência de nutrientes, notadamente fósforo e cálcio (Foy, 1974). O alumínio além de reduzir drasticamente a disponibilidade de fósforo na solução, devido a reação de precipitação, diminui sensivelmente sua aquisição por acentuar o papel da difusão, dado ao menor crescimento das raízes. No caso do cálcio, sabe-se que sua absorção ocorre apenas nas partes novas das raízes, justamente a região afetada pelo alumínio.

O teor de alumínio trocável tem sido usado como indicador do potencial fitotóxico do alumínio no solo. Todavia, considerando a variação de CTC entre solos, um melhor indicador tem sido a percentagem de saturação de alumínio (m%). Nesta avaliação, é preciso considerar que as espécies de plantas ou, até mesmo, cultivares dentro de uma mesma espécie têm demonstrado comportamento diferencial quanto à susceptibilidade à toxidez ocasionada pelo alumínio. O Quadro 6.3. apresenta os níveis críticos da percentagem de saturação de alumínio no solo para algumas espécies vegetais, no qual se observa acentuada variação no comportamento de espécie para espécie.

**Quadro 6.3. Níveis críticos da percentagem de saturação de alumínio no solo para algumas espécies vegetais.**

Espécie Vegetal	m (%)	Espécie Vegetal	m (%)
Algodão	10	Cevada	30
Alfafa	15	Trigo	30
Aveia	15	Milho	30
Soja	20	Arroz	45
Feijão	20	Eucalipto	88

Fonte: Neves et al. (1982) e Fageria et al. (1988)

O reduzido crescimento de raiz em solos ácidos, devido principalmente ao excesso de alumínio e/ou a deficiência de cálcio, representa um dos principais fatores limitantes ao crescimento das plantas nestas condições.

Em trabalho conduzido por Vale et al., (1993), onde procurou-se avaliar o efeito da acidez, do excesso de alumínio e da deficiência de cálcio no crescimento de raízes de quinze espécies florestais nativas, do algodão e do milho (estas duas espécies incluídas para efeito comparativo pois são espécies bem mais conhecidas quanto a sensibilidade à acidez), observou-se comportamento muito diferenciado quanto a adaptação ao elevado teor de alumínio (Figura 6.4.). No referido estudo, o crescimento relativo foi calculado atribuindo-se o valor 100% para o crescimento em solo ácido tratado com  $\text{Ca(OH)}_2$  para elevar o pH a 6,06 e o estresse de alumínio foi obtido no mesmo solo natural tratado com  $\text{CaCl}_2$  para elevar o teor de cálcio para  $1,0 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ .

Conforme esperado, dado ao elevado teor de alumínio trocável do solo estudado, a raiz do algodão não cresceu nestas condições (Figura 6.4.). No caso do milho, apesar de se usar o híbrido BR-201, relativamente resistente à acidez, o crescimento foi muito afetado. O eucalipto, espécie florestal muito estudada e também utilizada para efeito comparativo neste estudo – por ser reconhecidamente resistente à toxidez de alumínio –, apresentou o comportamento esperado. Dentre as espécies florestais nativas, o comportamento frente ao alumínio variou entre aquele observado para o milho e para o eucalipto.

Há de se destacar a importância de se definir a sensibilidade de espécies florestais nativas às diferentes condições de acidez do solo, notadamente com aquelas diretamente relacionadas com a correção efetivada pela prática da calagem, pois, muitas vezes, em programas de revegetação às margens de lagos e rios ou em cidades, pode não ser viável o uso de calcário.

---

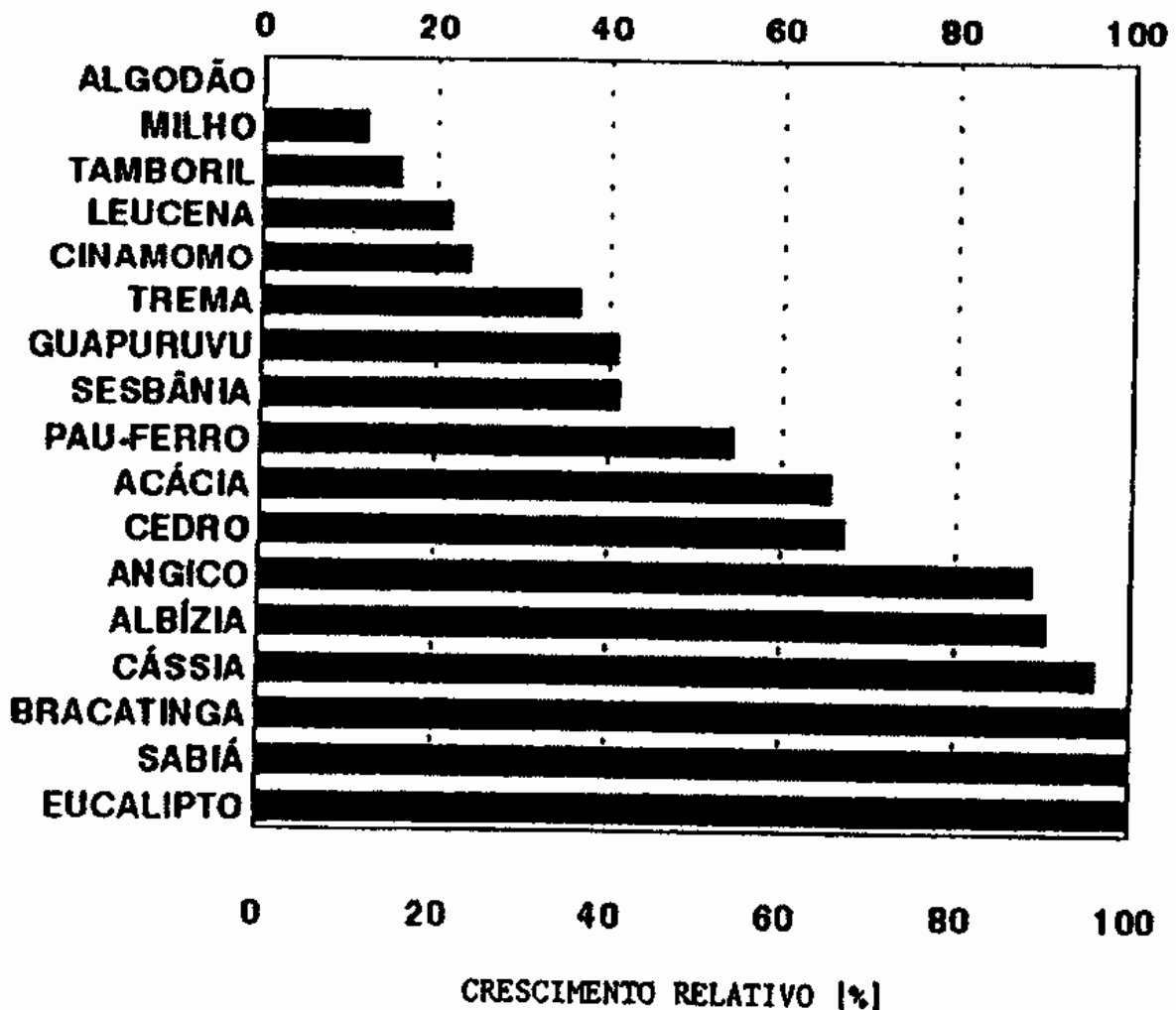


Figura 6.4. Crescimento relativo de raiz de algodão, milho e de espécies arbóreas em condição de estresse provocado pela toxidez de alumínio.

De importância na dinâmica do alumínio no solo, deve-se destacar a grande capacidade desse elemento em formar complexos com radicais orgânicos, o que reduz sobremaneira sua atividade em solução. Portanto, o pH não pode ser analisado isoladamente, quando se pretende determinar a atividade de alumínio em solução. Assim sendo, um solo com pH em torno de 5,5, pode ter uma atividade mínima de alumínio em solução, após a aplicação de grande quantidade de resíduo orgânico no solo. Ou, de outra forma, tem-se observado que o benefício da calagem em solos mais orgânicos – solos hidromórficos, por exemplo – é mais para suprir cálcio e magnésio, do que para neutralizar alumínio. E, nestes solos, desde que cálcio e magnésio não estejam em deficiência, consegue-se boas produções na faixa de pH 5,0 a 5,5, ou com saturação em bases na faixa de 40 a 50%. A Figura 6.5. mostra que, em solos orgânicos, os níveis de calagem para elevar a saturação em bases para 40-50% são suficientes para o cultivo do

feijão e milho verde e inferiores aos preconizados para essas culturas em solos minerais, conforme observado por Quaggio et al. (1985).

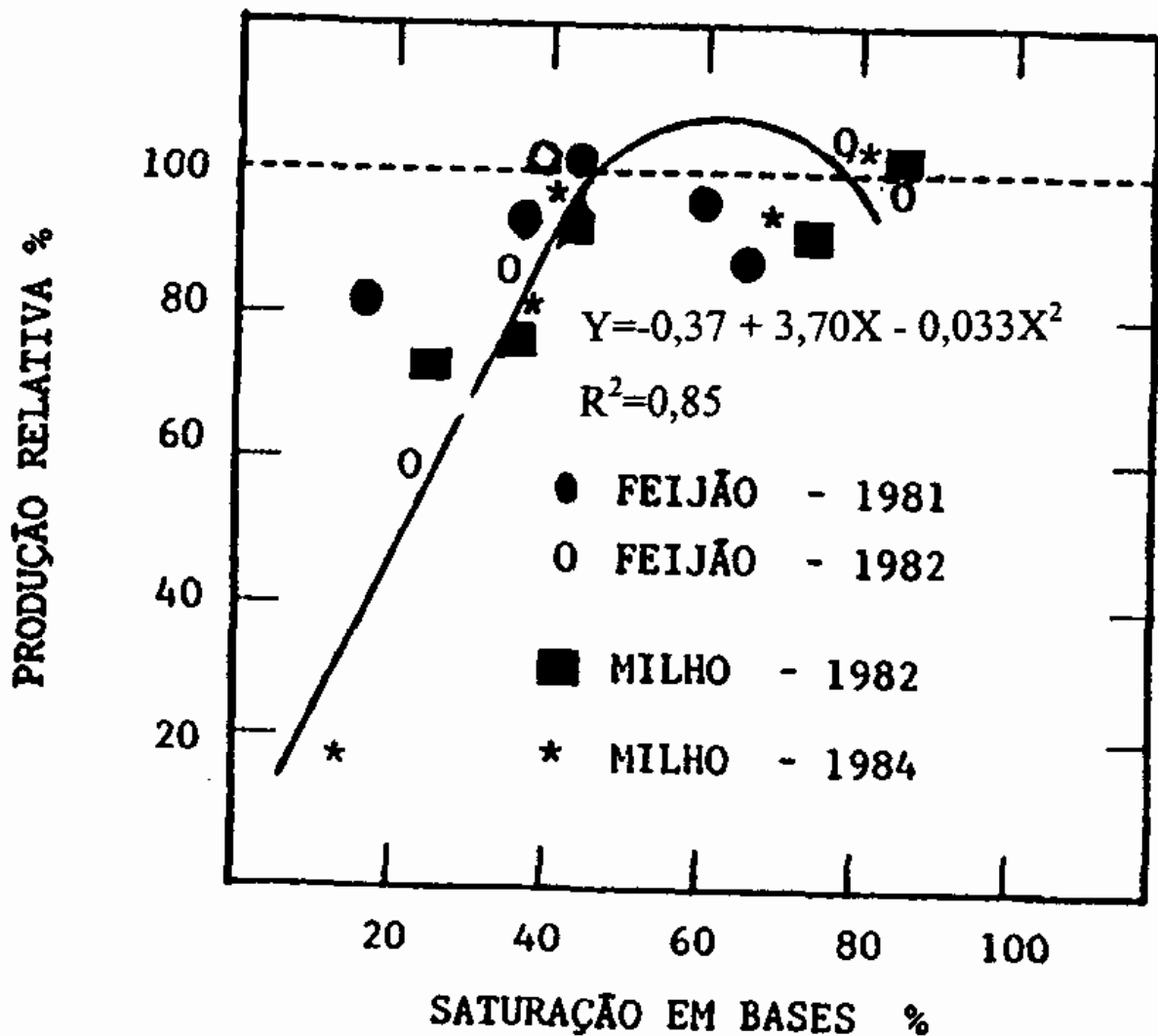


Figura 6.5. Curva de resposta à calagem das culturas de feijão e milho verde em solo orgânico do Vale do Ribeira.

Quanto à dinâmica do alumínio no solo, destaca-se ainda a grande reatividade deste elemento com ânions inorgânicos, notadamente com fosfato, fluoreto e sulfato. A reação com qualquer um destes ânions também reduz a atividade do alumínio em solução. A formação de pares iônicos ou complexos como sulfato de alumínio ou de fluoreto de alumínio tem sido propostos como possíveis mecanismos envolvidos na redução da atividade do alumínio em subsolos ácidos quando se faz a gessagem. No caso do fosfato, todavia, de valor mais prático, a principal implicação dessa reação de precipitação é a redução da disponibilidade de fósforo às plantas.



**b) Baixa disponibilidade de nutrientes**

Os solos ácidos, em geral, apresentam baixa disponibilidade de nutrientes. Em solos ácidos, além do efeito fitotóxico das formas catiônicas de alumínio, deve-se ressaltar que esse elemento, por apresentar elevada capacidade de adsorção aos colóides do solo, promove a perda de cátions essenciais às plantas – cálcio, magnésio e potássio –, através do processo de lixiviação.

Como ressaltado, o pH do solo constitui um dos fatores que mais influenciam a disponibilidade de nutrientes. Dessa forma, a acidez do solo limita o crescimento das plantas também por estar associada a uma baixa disponibilidade de nutrientes, especialmente de P, Ca e Mg (Figura 6.6).

A disponibilidade de molibdênio e de fósforo em solos ácidos, normalmente, é muito baixa, dado a fixação dos ânions molibdato e fosfato, a ser discutida adiante. E, ainda, dado a menor taxa de mineralização da matéria orgânica, além do baixo acúmulo da mesma, os solos ácidos são também deficientes em nitrogênio, enxofre e micronutrientes.

Como verifica-se na Figura 6.6, o condicionamento do solo para a obtenção de valores de pH entre 6,0 e 7,0, direta ou indiretamente favorece uma boa disponibilidade da maioria dos nutrientes, o que, obviamente, contribui para a maior produtividade das culturas em solos corrigidos.

---

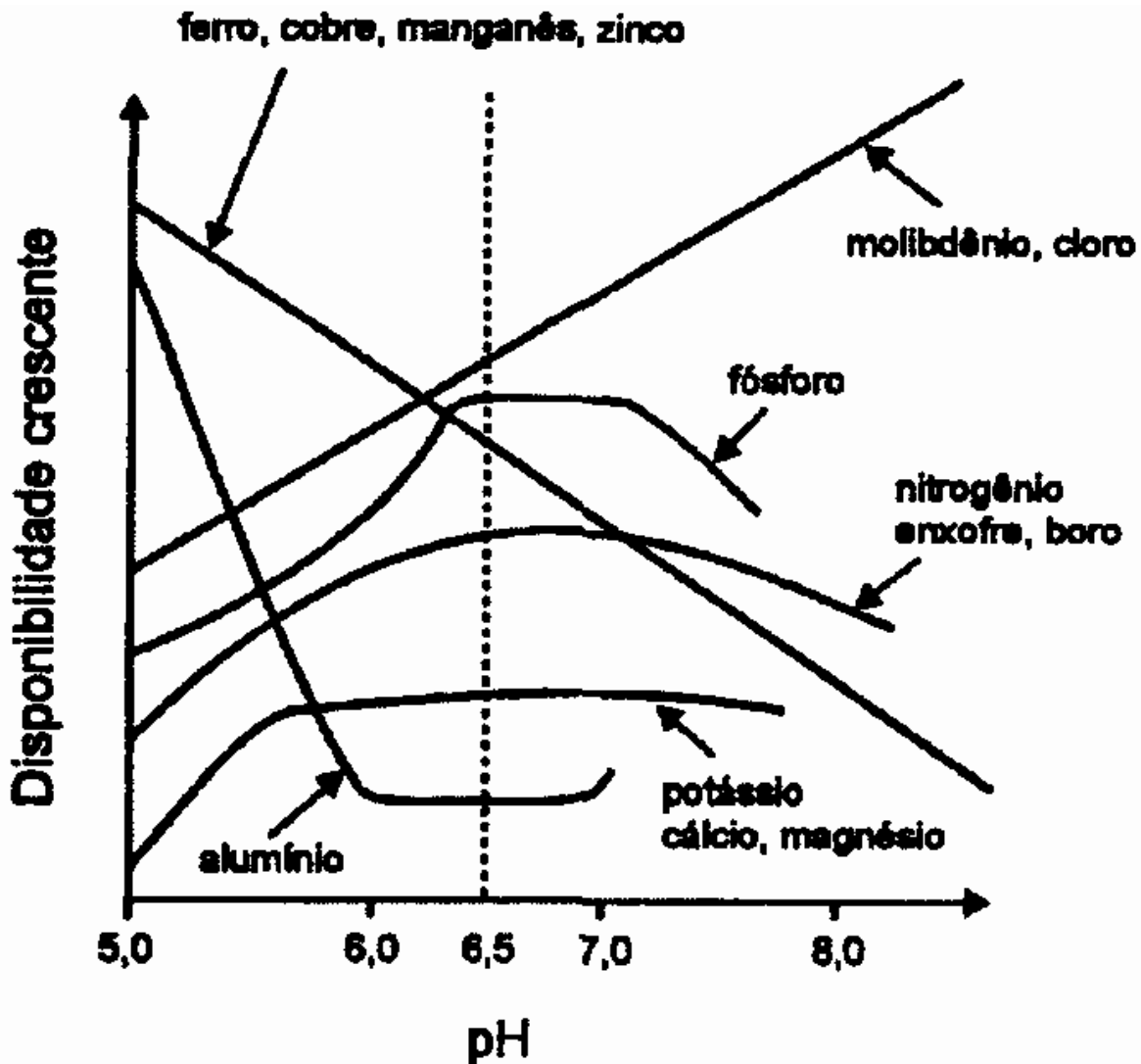


Figura 6.6. Disponibilidade de nutrientes em função do pH do solo (Malavolta, Vitti e Oliveira, 1997) .

#### c) Baixa eficiência no aproveitamento de fertilizantes

A acidez do solo exerce fundamental papel no aproveitamento de nutrientes aplicados ao solo pelas plantas, ou seja, no uso eficiente de fertilizantes. A correção da acidez dos solos pela calagem é condição essencial para obter-se a maior relação benefício/custo, em decorrência da aplicação de fertilizantes. A eficiência máxima na aquisição de nutrientes aplicados na forma de fertilizantes é apenas conseguida na faixa de pH 6 a 7, na qual os nutrientes aplicados estarão mais disponíveis (Figura 6.6).

#### d) Baixa atividade biológica

Os microrganismos do solo, notadamente as bactérias, assim como as plantas, são muito sensíveis a qualquer toxidez ou baixa disponibilidade de nutrientes, conforme normalmente ocorre em solos ácidos. Assim, importantes processos, tais como a mineralização da matéria orgânica, fixação do  $N_2$  por leguminosas ou nitrificação, são

---

afetados sob condições de solo ácido. Por exemplo, a acidez do solo é o principal fator a afetar a sobrevivência e crescimento das bactérias fixadoras do N<sub>2</sub>.

Uma vez discutidas as principais causas do pouco crescimento das plantas em solos ácidos, é preciso lembrar que o crescimento da maioria das espécies vegetais é drasticamente reduzido, tanto sob acidez quanto alcalinidade excessivas.

As condições de alcalinidade elevada são muito menos comuns na agricultura brasileira. Na verdade, muitas vezes, tal condição ocorre devido a calagem mal recomendada, ou seja, uso excessivo de calcário. Portanto, trata-se de condição artificial.

Basicamente, a principal causa limitante do baixo crescimento das plantas em solos alcalinos é a baixa disponibilidade de micronutrientes catiônicos, notadamente de ferro, manganês e de zinco. Dentre os macronutrientes, o fósforo é o mais afetado (Figura 6.6).

---

A grande maioria dos solos brasileiros apresenta pH menor que 5,5, condição química esta que pode se desdobrar em uma ou mais, normalmente várias, condições de baixa fertilidade do solo altamente desfavoráveis para a obtenção de produtividades adequadas. Enfim, várias podem ser as causas da baixa produtividade da maioria das espécies vegetais em solo ácido.

A maneira mais fácil, correta e economicamente viável de corrigir a acidez do solo, notadamente na camada arável, diz respeito ao uso de calcário através da prática da calagem.

No Brasil, tem sido usado, anualmente, cerca de 12 milhões de toneladas de calcário, quantidade esta, no mínimo cinco vezes menor que a necessária (Malavolta, 1992). Tal fato, sem dúvida, representa um dos importantes fatores condicionantes da baixa produtividade vegetal em nosso país. Relacionado a isto, muito infelizmente, o que se observa no campo é que os agricultores valorizam muito mais a prática da adubação do que a calagem (Carniel, 1994). É um grande engano, pois, a prática da calagem apresenta uma série de benefícios, inclusive, ao corrigir a acidez do solo, aumenta-se a eficiência dos fertilizantes, conseqüentemente, aumentando o retorno econômico da adubação.

Dentre os benefícios de uma correta prática da calagem, destacam-se:

- Diminuição da toxidez de  $H^+$ ,  $Al^{3+}$  e  $Mn^{2+}$
  - Aumento da mineralização da matéria orgânica, conseqüentemente aumentando a disponibilidade de nutrientes, notadamente N, S, P e B.
  - Aumento da disponibilidade de cálcio e magnésio, por adição direta ao solo.
  - Aumento da disponibilidade de fósforo e molibdênio, presentes em formas fixadas e de menor disponibilidade no solo ácido.
  - Aumento da fixação não simbiótica e simbiótica do  $N_2$ .
  - Aumento da atividade também de bactérias nitrificadoras.
  - Aumento da CTC do solo, reduzindo problemas de salinidade e de lixiviação de cátions.
  - Aumento da eficiência da adubação.
-

- Aumento da preservação de áreas de floresta ou de áreas menos vocacionadas para a agricultura, em face da necessidade de menor área para obter a mesma produção.

O sucesso da calagem, como importante prática de manejo da fertilidade, depende de três aspectos técnicos:

- das características do corretivo utilizado;
- da dose de corretivo utilizada;
- da forma e época de aplicação do corretivo.

E, depende também de aspectos de ordem econômica, relacionados com o preço dos corretivos, com o custo do transporte, aplicação e de incorporação dos corretivos.

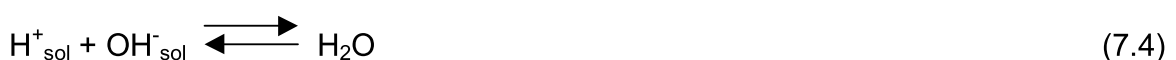
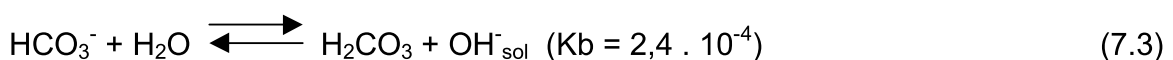
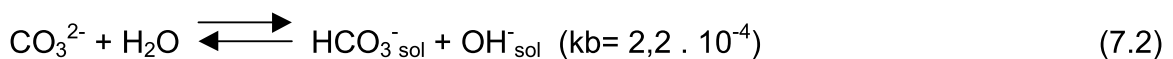
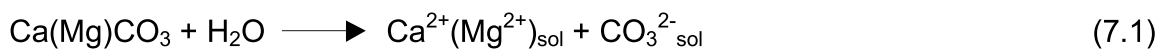
## 7.1. CARACTERÍSTICAS DOS CORRETIVOS

### 7.1.1. Natureza Química

Os materiais corretivos comumente usados na calagem são óxidos, hidróxidos, carbonatos ou silicatos de cálcio e/ou magnésio. É a união do útil ao agradável. Tanto o cálcio quanto o magnésio são essenciais para as plantas e, normalmente, se apresentam em baixa disponibilidade nos solos ácidos. Por outro lado, são compostos químicos que diminuem a atividade dos íons  $H^+$  e  $Al^{3+}$  na solução do solo, o que é benéfico para plantas e microrganismos.

#### a) Calcário

É o corretivo mais indicado e, portanto, mais usado na prática da calagem. É simplesmente obtido pela moagem de rochas calcárias, cujos constituintes químicos básicos são  $CaCO_3$  e  $MgCO_3$ . A ação neutralizante do calcário se deve às seguintes reações:



Portanto, o ânion acompanhante do cálcio ou do magnésio é o responsável pela neutralização. Deve-se observar que o valor da constante de ionização ( $K_b$ ) indica que o  $CO_3^{2-}$  é uma base fraca (Reação 7.2), isto é, a formação dos íons neutralizantes  $OH^-$  é

lenta. Esta é a razão, conforme será enfatizado adiante, da necessidade de se aplicar calcário com a devida antecedência ao plantio. Ademais, deve-se destacar a importância de um adequado teor de água no solo para reação do calcário (Reações 7.1 a 7.3) e de todo e qualquer corretivo.

Todo calcário é, relativamente, rico em cálcio. Todavia, nem todos apresentam teor adequado de magnésio, ou seja, o teor de  $\text{MgCO}_3$  é muito variável. Em função do teor de  $\text{MgCO}_3$ , os calcários são classificados em:

- Calcário calcítico – possui menos de 10% de  $\text{MgCO}_3$  ou menos de 5% de  $\text{MgO}$
- Calcário magnesiano – 10 a 25% de  $\text{MgCO}_3$  ou 5 a 12% de  $\text{MgO}$
- Calcário dolomítico – mais de 25% de  $\text{MgCO}_3$  ou mais de 12% de  $\text{MgO}$

O teor de magnésio de um calcário é uma característica muito importante a ser considerada no processo de escolha do mesmo, pois, se a interpretação da análise indicar que o solo está deficiente em magnésio é altamente recomendado a escolha de um corretivo mais rico neste nutriente. Se o teor de magnésio é muito baixo ou baixo (Quadros 5.3, 5.7 e 5.11) ou se o magnésio trocável representa menos de 5% da CTC a pH 7,0, é recomendável o uso de calcário dolomítico. Se isto não for feito, persistirá a necessidade de adubação com magnésio no plantio ou em cobertura, o que pode trazer certos problemas – disponibilidade de fertilizante magnesiano no mercado, dificuldade de aplicação e, principalmente, o alto custo do fertilizante em relação ao custo do calcário.

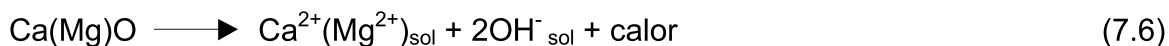
Para cada 1% de  $\text{MgO}$  em um calcário, quando se aplica 1 t/ha, incorporado de 0-20 cm, adiciona-se o equivalente a  $0,0248 \text{ cmol}_c \text{ Mg}^{2+}/\text{dm}^3$  solo. Essa informação é de grande aplicação prática, de forma a se calcular a contribuição do calcário aplicado para elevar o teor de magnésio do solo.

## b) Óxidos

Em termos práticos, a cal virgem agrícola representa o principal tipo de óxido usado na calagem. A cal é obtida pela queima ou calcinação completa do calcário, conforme mostra a reação 7.5.



A ação neutralizante dos óxidos se deve a reação abaixo (7.6), com a liberação de  $\text{OH}^-$  sendo imediata, dado ao caráter de base forte do  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ .



Apesar de ser corretivo de ação imediata, o que é vantajoso quando se deseja rápida neutralização, seu uso pode ser problemático, merecendo certos cuidados. O calor gerado pode danificar sementes, plântulas e microrganismos. Para evitar danos a

sementes e plantas, a cal precisa ser aplicada com certa antecedência. E, a completa mistura e reação do óxido com o solo pode ser dificultada, pois, logo após a aplicação, a água absorvida pode gerar a formação de grânulos endurecidos, que nada mais é do que uma capa de  $\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$ , retardando a reação.

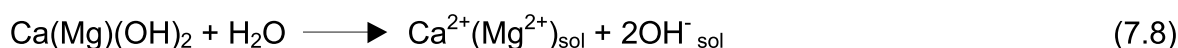
É importante destacar que a queima ou calcinação parcial do calcário resulta numa mistura constituída de  $\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$  não decomposto e de  $\text{Ca}(\text{Mg})\text{O}$ . Esta mistura constitui um tipo especial de calcário – o calcário calcinado. Sua ação neutralizante, portanto, é devida à base forte da parte do óxido e à base fraca da parte do carbonato. Enfim, seu PRNT é maior do que o do calcário comum, mas, menor do que o da cal virgem agrícola.

### c) Hidróxidos

A hidratação da cal virgem resulta na cal hidratada ou cal extinta, formada por  $\text{Ca}(\text{Mg})(\text{OH})_2$ , conforme reação 7.7.



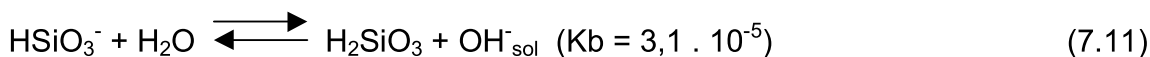
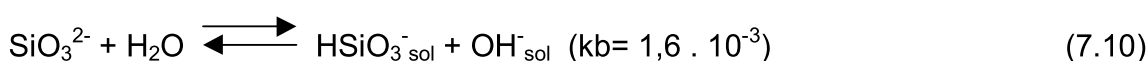
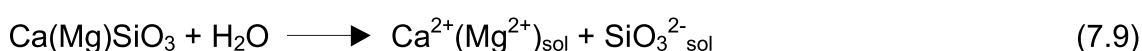
A sua ação neutralizante é imediata, pela dissolução do hidróxido (reação 7.8).



Apesar de ser menos cáustica, a cal hidratada é um fino pó branco de difícil e desagradável manuseio durante a aplicação no solo.

### d) Escórias de Siderurgia

Alguns sub-produtos da indústria do aço, contendo silicatos e óxidos de cálcio e/ou de magnésio, tem valor neutralizante. Sua ação neutralizante se deve ao efeito dos óxidos de Ca e Mg (reação 7.6), além das seguintes reações, muito semelhantes às do calcário:



A base  $\text{SiO}_3^{2-}$  também é fraca ( $K_b = 1,6 \cdot 10^{-3}$ ), mas é mais forte que a base  $\text{CO}_3^{2-}$  ( $K_b = 2,2 \cdot 10^{-4}$ ) do calcário.

## 7.2.2. Poder de Neutralização

O poder de neutralização (PN) do material corretivo é dado pela quantidade de ácido que o mesmo é capaz de neutralizar, o que depende de sua natureza química e grau de pureza. O  $\text{CaCO}_3$  puro é tomado como padrão, sendo seu poder de neutralização considerado como 100%. Com isto, o poder de neutralização é expresso em

---

“percentagem equivalente em carbonato de cálcio”, ou, %  $E_{CaCO_3}$ . O Quadro 7.1 mostra o poder de neutralização de materiais corretivos puros.

O peso equivalente do  $CaCO_3$  é 50, enquanto o do  $MgCO_3$  é de 42. Assim, 42 g de  $MgCO_3$  neutraliza a mesma quantidade de ácido que 50 g de  $CaCO_3$ . Portanto,  $MgCO_3$  neutraliza 1.19 vezes mais ácido que igual peso de  $CaCO_3$ . Daí, a %  $E_{CaCO_3}$  do  $MgCO_3$  ser de 119. O mesmo raciocínio e procedimento é usado para calcular o poder de neutralização das demais espécies (Quadro 7.1).

O poder de neutralização de um corretivo de acidez do solo é determinado analiticamente, fazendo-se a reação de uma amostra do mesmo com uma quantidade conhecida e em excesso de ácido clorídrico. Após a reação, determina-se o excesso de ácido e, por diferença, calcula-se a quantidade de ácido neutralizada pelo corretivo.

**Quadro 7.1. Poder de neutralização das principais espécies químicas presentes em corretivos da acidez do solo.**

Espécie Química	% $E_{CaCO_3}$ ou PN
$CaCO_3$	100
$MgCO_3$	119
$CaO$	179
$MgO$	248
$Ca(OH)_2$	135
$Mg(OH)_2$	172
$CaSiO_3$	86
$MgSiO_3$	100

A determinação analítica do poder de neutralização não possibilita caracterizar as espécies químicas presentes no corretivo. Pelo princípio da equivalência, considera-se como sendo o  $CaCO_3$ , que é tomado como padrão. Pode-se, por outro lado, calcular o valor do poder de neutralização, que aproxima razoavelmente do valor determinado analiticamente, a partir dos teores de cálcio e de magnésio. Por convenção, os teores de cálcio e de magnésio são expressos, respectivamente, como %  $CaO$  e %  $MgO$ . Assim, o equivalente em carbonato de cálcio calculado ou teórico é dado pela fórmula abaixo:

$$PN = E_{CaCO_3} = (\% CaO \cdot 1,79) + (\% MgO \cdot 2,48)$$

Por exemplo, para um calcário com 30% de  $CaO$  e 10% de  $MgO$ , tem-se:

$$PN = E_{CaCO_3} = (30 \cdot 1,79) + (10 \cdot 2,48)$$

$$\% E_{CaCO_3} = 78,5$$



Assim, 100 kg deste corretivo tem um poder neutralizante equivalente a 78,5 kg de  $\text{CaCO}_3$  puro.

A legislação brasileira exige para os calcários comuns, calcários calcinados, cal virgem e cal hidratada valores de PN de no mínimo 67%, 80%, 125% e 94%, respectivamente. Para ser considerada uma escória básica o PN mínimo exigido é de 60%.

### 7.2.3. Granulometria

A ação neutralizante ou eficiência dos corretivos também depende do tamanho das partículas, pois a velocidade de reação depende da área superficial de contato da partícula com o solo. Quanto menor a partícula maior é a velocidade de reação. A cal virgem e hidratada se apresentam na forma de pó, de forma que não há problemas quanto a granulometria. Por outro lado, para os calcários o fator granulometria é muito importante, pois o tamanho das partículas é variável, ou seja, contém partículas que variam desde pó até 2 mm de diâmetro (máximo permitido pela legislação).

No Quadro 7.2 são apresentadas as taxas de reatividade ou de eficiência relativa (ER) para as diferentes frações granulométricas considerando como referencial o tempo de três meses para reação, isto é, a eficiência relativa refere-se ao percentual de corretivo que reage em 3 meses.

**Quadro 7.2. Taxas de reatividade ou eficiência relativa das diferentes frações granulométricas dos corretivos, segundo a legislação brasileira.**

Fração Granulométrica		Eficiência Relativa (ER) (%)
Peneira Nº (ABNT)	Dimensão da partícula (mm)	
10	> 2	0
10-20	2 a 0,84	20
20-50	0,84 a 0,30	60
50	< 0,30	100

Com isto, dispondo-se da composição granulométrica de um corretivo, pode-se calcular sua reatividade, pela fórmula:

$$ER (\%) = (A \cdot 0,2) + (B \cdot 0,6) + (C \cdot 1,0)$$

onde:

A = percentual de partículas de 0,84 a 2 mm;

B = percentual de partículas de 0,3 a 0,84 mm;

C = percentual de partículas menor que 0,3 mm.

A título de exemplificação e de melhor interpretação da eficiência relativa, considere os diferentes calcários mostrados no Quadro 7.3.

**Quadro 7.3. Composição granulométrica de diferentes calcários com as respectivas eficiência relativa (ER) ou taxa de reatividade.**

Calcário	Dimensão das partículas (mm)			ER
	< 0,3	0,3 – 0,84	0,84 – 2,0	
	.....%.....			
A	60	20	30	78
B	80	15	-	89
C	100	0	0	100

No caso do calcário A, 78% das partículas reagem no período de 3 meses, ficando um resíduo de 32% das partículas para reação após esse período. Por exemplo, partículas entre 0,84 - 2 mm necessitam de tempo maior que 60 meses para reação completa (Tedesco et al., 1988). Um calcário de granulometria mais grosseira, como é o caso do calcário A, por apresentar maior efeito residual tende a ser ideal para aplicação antes de se adotar o sistema de plantio direto ou para aplicação adicional em cova, na implantação de culturas perenes.

Para o calcário B, 89% das partículas reagem no período de 3 meses, ficando apenas 11% de ação mais lenta, que será exercida após os 3 meses. Todavia, a reação do calcário B se completará em tempo bem mais curto que o calcário A, pois, no calcário B o restante das partículas tem menor granulometria que no calcário A.

O calcário C reage totalmente num período de 3 meses, pois passa totalmente na peneira nº 50. É um calcário tipo “filler”.

A legislação brasileira exige que os calcários devem ter no mínimo 95% das partículas com diâmetro menor que 2 mm (passar na peneira nº 10), no mínimo 70% das partículas com diâmetro menor que 0,84 mm (passar na peneira nº 20), e no mínimo 50% das partículas com diâmetro menor que 0,3 mm (passar na peneira nº 50).

As considerações feitas, na análise dos dados do Quadro 7.3, quanto ao resíduo de partículas que reagem no solo após 3 meses são de grande importância no manejo da calagem. Muitos agricultores, desconsiderando a ação neutralizante mais lenta, aplicam a mesma dosagem inicial a cada 2 – 3 anos. Com isto, progressivamente, estabelece-se uma condição de “supercalagem”, com sérios prejuízos para a produtividade, notadamente por desequilíbrios nutricionais e por desenvolvimento de patógenos prejudiciais às plantas. Apesar da grande variação, em função do manejo da lavoura, os resultados de pesquisa indicam que as necessidades em novas aplicações de calcário são bem inferiores do que os valores iniciais, equivalendo a uma “manutenção” de 20 a 60% da dose inicialmente aplicada. De qualquer forma, uma vez mais, ressalta-se que a análise química do solo é indispensável para a correta avaliação desta necessidade.

#### 7.2.4. Poder Relativo de Neutralização Total

O poder de neutralização total de um corretivo depende de sua natureza química, considerada no cálculo do poder de neutralização (PN), e de sua natureza física ou granulometria, a qual afeta a taxa de reatividade ou eficiência relativa (ER). Assim sendo, é dado pela fórmula:

$$\text{PRNT (\%)} = (\text{PN} \times \text{ER}) / 100$$

Por exemplo, um calcário com PN = 90% e ER = 70% terá PRNT = 63%. Isto indica que o seu PN de 90% está assim dividido:

- 70% de seu PN de 90% será expresso no período de 3 meses, em face da granulometria do mesmo, ou seja, o poder de neutralização total é de 63%, e,
- 30% de seu PN de 90%, equivalente a um poder de neutralização total de 27%, será expresso posteriormente.

Pela legislação atual, o calcário não pode ser comercializado com PRNT menor que 45%.

No cálculo da necessidade de calagem, em todo e qualquer método utilizado no Brasil, está implícito o uso de um calcário com PRNT = 100%. Mas, na prática, o calcário adquirido pelo agricultor raramente apresenta este valor. Assim sendo, é preciso fazer a devida correção, segundo a fórmula abaixo:

$$\text{Quantidade a aplicar} = (\text{Necessidade de Calagem} \times 100) / \text{PRNT}$$

Assim, para o exemplo anterior e supondo uma recomendação de 3,0 t/ha, tem-se:

$$Q_a = (3,0 \times 100) / 63 = 4,76 \text{ t/ha}$$

Portanto, ao aplicar 4,76 t/ha de um calcário com PRNT = 63%, tem-se que 63% de seu PN será expresso no período de 3 meses, em função da granulometria do mesmo, ou seja, 63% de 4,76 t/ha, equivale às 3 t/ha recomendadas (calculadas), com base em PRNT = 100%. O importante, conforme já destacado, é não perder de vista que um poder de neutralização total de 27% será expresso após esse período. Esse poder a médio prazo equivale, neste exemplo, a uma aplicação adicional de 1,28 t/ha de um calcário com PRNT igual a 100%.

### 7.3. ASPECTOS ECONÔMICOS DA CALAGEM

O calcário é um insumo relativamente barato, abundante e com jazidas de rochas calcárias mais ou menos bem distribuídas no Brasil. Entretanto, a calagem pode se tornar uma prática de custo elevado, pela exigência de maquinário apropriado e significância do custo de aplicação, incorporação, e, principalmente, pelo custo de transporte até a propriedade. Considerando os custos da calagem, mais diretamente ligados à distribuição e incorporação, aplicar menos de 1 t/ha de calcário é questionável do ponto de vista

econômico, quando da aplicação visando a instalação da lavoura. Nos casos de lavouras instaladas ou em plantio direto, quando não se faz incorporação, o mínimo, economicamente viável, pode estar em torno de 0,5t/ha.

A calagem precisa ser considerada como investimento, de forma que, no cálculo de sua economicidade, tem-se que considerar um período de amortização igual ao período de seu efeito residual – de 1 a 4 anos.

Na construção da fertilidade de solos de cerrado, a calagem representa de 12 a 15% dos custos envolvendo o manejo da fertilidade do solo (Sousa et al., 1993). Em condições comparáveis, considerando apenas o custo do corretivo e a correção a ser feita para cálculo da quantidade de calcário a ser aplicada (fórmula 7.15), o calcário mais econômico é aquele que apresentar menor custo efetivo, ou seja, menor custo por unidade de PRNT conforme a fórmula a seguir:

$$\text{Custo efetivo} = \text{Custo por tonelada} / \text{PRNT}$$

Na escolha do corretivo, é preciso estar muito atento para não se priorizar o aspecto econômico, em prejuízo de aspectos técnicos, pois a lucratividade desta prática pode ser totalmente comprometida. Ademais, é preciso estar atento também para a “Lei do Mínimo”, ou seja, o máximo retorno econômico da calagem depende da integração desta prática com os demais fatores da produção vegetal, a começar pela prática da adubação.

#### 7.4. CÁLCULO DA NECESSIDADE DE CALAGEM

A quantidade ou dose de corretivo a ser recomendada depende do método utilizado e do comportamento das espécies vegetais em relação à acidez.

A necessidade de calagem para neutralização da acidez do solo, de uma condição inicial até uma condição desejada, pode ser corretamente determinada a partir da incubação de amostras de solo com quantidades crescentes de carbonato de cálcio, obtendo-se as curvas de neutralização para cada solo. Todavia, este método é trabalhoso e demorado, sendo inadequado para uso em laboratórios de análise do solo.

Por outro lado, é o método padrão e, portanto, usado em pesquisa e na aferição e desenvolvimento de outros métodos mais adequados para laboratórios de rotina.

No Brasil, basicamente, são utilizados três métodos de determinação da necessidade de calagem (NC), conforme detalhados a seguir. Em todos, a necessidade de calagem calculada é para correção de uma camada referencial de 0-20 cm e subentende o uso de calcário com PRNT igual a 100%.

##### 7.4.1. Método do Tampão SMP

Este método baseia-se na elevação do pH do solo para um valor desejado, a partir da mistura do solo com uma solução tampão. A solução mais usada em todo o mundo é a SMP, em homenagem aos autores do método, Shoemaker, Mclean e Pratt (1961). A solução tampão SMP é constituída de trietanolamina, paranitrofenol, cromato de potássio,

acetato de cálcio e cloreto de cálcio, com pH inicial de 7,5. No laboratório, o solo é misturado com a solução SMP e, após agitação, determina-se o pH do sobrenadante, que nada mais é do que o  $\text{pH}_{\text{SMP}}$  ou índice SMP. Quanto menor o  $\text{pH}_{\text{SMP}}$  maior é a transferência de acidez do solo para a solução tampão, ou seja, mais ácido é o solo.

No Brasil, este método é usado nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Siqueira et al, 1989), permitindo, conforme a exigência da planta, elevar o pH do solo para 5,5, 6,0 ou 6,5 (Quadro 7.4).

**Quadro 7.4. Recomendações de calagem (PRNT = 100%) com base no índice SMP, para a correção da acidez dos solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.**

Índice SMP	pH em água a atingir		
	5,5	6,0	6,5
	.....Quantidade de calcário (t/ha).....		
≤4,4	15,0	21,0	29,0
4,5	12,5	17,3	24,0
4,6	10,9	15,1	20,0
4,7	9,6	13,3	17,5
4,8	8,6	11,9	16,7
4,9	7,7	10,7	14,2
6,0	6,9	9,7	12,9
6,1	6,2	3,8	11,7
5,2	5,5	8,0	10,6
5,3	4,9	7,2	9,6
5,4	4,4	6,5	8,7
5,5	3,8	5,8	7,9
5,6	3,3	6,1	7,0
6,7	2,8	4,5	6,2
5,8	2,3	3,9	5,5
5,9	1,9	3,3	4,8
6,0	1,4	2,3	4,1
6,1	1,0	2,2	3,4
6,2	0,6	1,7	2,7
6,3	0,2	1,2	2,1
6,4	0,0	0,6	1,6
6,6	0,0	0,2	0,7
6,6	0,0	0,0	0,0

Por muitos anos o pH ótimo para as plantas foi tomado como aquele próximo da neutralidade, mais especificamente na faixa de 6,5 a 7,0. Todavia, a calagem para elevar o pH para 5,6 ou 5,7 e reduzir a percentagem de saturação em alumínio para abaixo de 10% pode ser mais do que suficiente para a maioria das espécies vegetais (Tisdale et al., 1993). Na verdade, no caso dos latossolos da região de cerrado, a calagem para elevar o pH para próximo de 7,0 é um grande risco, pelas seguintes razões:

- Piora a estruturação do solo e, conseqüentemente, a aeração e percolação de água, pela substituição do  $Al^{3+}$  pelo  $Ca^{2+}$  nos colóides do solo;
- Reduz a disponibilidade de fósforo pela precipitação de fosfatos com cálcio;
- Reduz a disponibilidade e, conseqüentemente, a absorção de micronutrientes catiônicos, notadamente em solos com baixa disponibilidade inicial dos mesmos. Este é um problema sério, por exemplo, no caso do manganês em soja e do zinco em milho.

Para o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, as culturas são distribuídas de acordo com o pH mais indicado (Quadro 7.5), de forma que, a partir desta informação, seleciona-se o pH desejado para entrada no Quadro 7.4.

A observação feita para o arroz merece uma explanação. Sob condições de irrigação por alagamento, ocorre a elevação do pH do solo, ou seja, uma auto-calagem, sem contudo, adicionar cálcio e magnésio. Visando o suprimento destes nutrientes, a calagem é recomendada para elevar o pH para 5,5, como se fosse cultura de sequeiro. E, ainda, no caso particular de solos em que ocorre toxidez de ferro para o arroz, é recomendável o calcário nas doses necessárias para elevar o pH a 6,0, de forma a precipitar maior quantidade de ferro solúvel.

---

### Quadro 7.5. Distribuição das culturas em relação às recomendações de calagem para situações específicas de pH do solo.

Recomendações de calagem	Identificação das culturas
Calagem não recomendada*	arroz irrigado**, erva-mate, mandioca
Calagem para pH 5,5	abacaxizeiro, acácia negra, batatinha, bracatinga, eucalipto, pinus
Calagem para pH 6,0	abacateiro, abóbora, alface, alho, ameixeira, amendoim, arroz de sequeiro, aveia, bananeira, batata-doce, beterraba, brócolos, cana-de-açúcar, caqui, cebola, cenoura, cevada, chicória, citros, colza, couve-flor, ervilha, feijão, feno, figueira, fumo, girassol, gramíneas de estação fria, gramíneas de estação quente, leguminosas de estação fria, leguminosas de estação quente, linho, macieira, marmeleiro, melancia, melão, milho, misturas de gramíneas e leguminosas de estação fria, mistura de gramíneas e leguminosas de estação quente, moranga, morango, noqueira, pecan, painço, pepino, pereira, pessegueiro, pimentão, rabanete, repolho, soja, sorgo, silagem, tomate, tremoço, trigo, triticale, videira.
Calagem para pH 6,5	alfafa, aspargo

\* Poderá ser recomendado calcário como fonte de nutrientes (cálcio e/ou magnésio), dependendo das condições do solo.

\*\* Utilizar as recomendações de calagem para o pH 5,5 quando sob cultivo irrigado por inundação em solos com baixo teor de cálcio.

#### 7.4.2. Método Baseado nos Teores de Alumínio, Cálcio e Magnésio Trocáveis

Esse método originou da proposição de Coleman et al. (1958) e de Kamprath (1970) de que o alumínio é o maior problema em solos ácidos. A necessidade de calagem é dada, diretamente em t/ha, pelo teor de  $Al^{3+}$  trocável multiplicado pelo “fator de calagem” 1,5. O fator de calagem, segundo Kamprath (1970), se deve à imperfeição da mistura do calcário com o solo, o que requer uma aplicação mais elevada do que o valor teórico para neutralização do alumínio.

Mais tarde, observou-se que muitos solos ácidos apresentam baixo teor de alumínio trocável, mas necessitam calcário por apresentarem baixa disponibilidade de cálcio e de magnésio. Com isto, várias fórmulas para cálculo da necessidade de calagem foram surgindo ao longo dos anos, tanto visando neutralizar o alumínio, quanto elevar os teores de cálcio e magnésio.

A CFSEMG (1999) recomenda para o estado de Minas Gerais o uso da seguinte fórmula:

$$NC \text{ (t/ha)} = Y \cdot [Al^{3+} - (m_t \cdot t/100)] + [X - (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$$

onde,

$Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  = correspondem aos valores encontrados na análise de solo;

$m_t$  = indica a percentagem de saturação de alumínio tolerada pela cultura (Quadro 7.6);

$t$  = valor de CTC efetiva na análise do solo

$Y$  = representa o fator solo, mais especificamente seu poder tampão em função da textura, da seguinte forma:

$Y = 0,0-1,0$  (solos arenosos: menos de 15 % de argila);

$Y = 1,0-2,0$  (solos de textura média: 16 – 35 % de argila);

$Y = 2,0-3,0$  (solos argilosos: 35 – 60 % de argila);

$Y = 3,0-4,0$  (solos argilosos: mais de 60 % de argila).

$X$  = representa o fator planta, quanto ao requerimento de Ca e Mg, sendo o seu valor variável de 1,0 a 3,5, conforme a exigência da cultura (Quadro 7.6).

**Quadro 7.6. Valores  $m_t$ ,  $X$  e  $V_2$  para cálculo de calagem para diferentes culturas no estado de Minas Gerais, segundo a CFSEMG (1999).**

Cultura	$m_t$ (%)	$X$ (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	$V_2$ (%)
Abacaxi	15	2,0	50
Abóbora, moranga, pepino, melancia e alface	5	3,0	70
Alfafa	15	2,5	60
Algodão	10	2,5	60
Alho e cebola	5	3,0	70
Amendoim	5	3,0	70
Arroz	25	2,0	50
Banana	10	3,0	70
Batata e batata-doce	15	2,0	60
<i>Brachiaria brizantha</i>	25	1,5	45
<i>Brachiaria decumbens</i>	30	1,0	40
Cacau	15	2,0	50

Continua...



**...Continuação**

---

Café	25	3,5	60
Cana-de-açúcar	30	3,5	60
Capim andropogon	30	1,0	40
Capim elefante, coast-cross, colômbio e tifton	20	2,0	50
Capim gordura	30	1,0	40
Capim jaraguá	25	1,5	45
Cenoura e beterraba	5	3,0	65
Chá	25	1,5	40
Citros	5	3,0	70
Repolho, couve, brócolos e couve-flor	5	3,0	70
Crisântemo	5	3,0	70
Eucalipto	45	1,0	30
Gramados	5	3,0	70
Guandu	25	1,0	40
Leucena	15	2,5	60
Mamão	5	3,5	80
Mamona	10	2,5	60
Mandioca	30	1,0	40
Manga e abacate	10	2,5	60
Melancia	5	3,0	70
Melão	5	3,5	80
Milho, sorgo e trigo	15	2,0	50
Milho verde	10	2,5	60
Morango	5	3,0	70
Plantas ornamentais	5-10	2,0-3,0	60-70
Roseira	5	3,0	70
Seringueira	25	1,0	50
Soja, feijão e outras leguminosas	20	2,0	50
Tomate, pimentão, beringela e jiló	5	3,0	70
Trigo	15	2,0	50
Videira	5	3,5	80

---

Para o cultivo da soja em solos de cerrado, Sousa et al. (1992) fazem as seguintes recomendações:

- a) Para solos com teor de argila acima de 20% e teor de Ca + Mg menor que 2,0 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>, é utilizada a seguinte fórmula:  $NC \text{ (t/ha)} = (Al \cdot 2) + [2 - (Ca+Mg)]$
- b) Para solos com teor de argila acima de 20% e teor de Ca + Mg maior que 2,0 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>, pode-se utilizar a fórmula:  $NC \text{ (t/ha)} = Al \cdot 2$
- c) Para solos com teor de argila menor que 20%, a quantidade de calcário a ser utilizada é dada pelo maior valor encontrado em uma das fórmulas:

$$NC \text{ (t/ha)} = Al \cdot 2 \quad \text{e} \quad NC \text{ (t/ha)} = [2 - (Ca + Mg)]$$

Sousa et al. (1992) relatam que o método de estimar a necessidade de calagem com base nos teores de alumínio, cálcio e magnésio trocáveis eleva a saturação por bases para cerca de 50%, que é o valor ideal para o cultivo da soja em solos de cerrado.

De acordo com as recomendações de CFSEMG (1999), alternativamente, a calagem pode ser calculada de forma a se atingir o nível de saturação por bases indicado para cada cultura, em função de sua sensibilidade à acidez do solo e/ou exigência em Ca e Mg.

#### 7.4.3. Método Baseado na Elevação da Saturação por Bases

Este método, introduzido em São Paulo em 1983, baseia-se na elevação da saturação por bases a valores desejados para diferentes espécies vegetais, considerando a estreita relação entre a percentagem de saturação por bases e o pH do solo. A necessidade de calagem, segundo Raij (1981), é dada pela fórmula a seguir:

$$NC \text{ (t/ha)} = [T \cdot (V_2 - V_1)] / 100$$

onde,

T = valor de CTC potencial ou CTC a pH 7,0 da análise do solo;

V<sub>2</sub> = percentagem de saturação por bases desejada de acordo com as recomendações para as condições regionais (por exemplo para o estado de São Paulo – Quadro 7.7, ou para Minas Gerais – Quadro 7.6);

V<sub>1</sub> = percentagem de saturação por bases do solo, conforme resultado da análise do solo.

De acordo com o Quadro 7.7, a recomendação por faixas de valores de V<sub>2</sub> é feita para deixar uma quantidade a mais de corretivo no solo, para minimizar a perda de bases entre uma calagem e outra. Por exemplo, para milho a recomendação é para 60-70%, significando que a calagem é recomendada quando a saturação por bases é inferior a 60% e, nesse caso, o cálculo é feito para elevá-la a 70% (Raij, 1991).

Para os solos com alto teor de matéria orgânica, recomenda-se tomar como valor de V<sub>2</sub> uma saturação em bases de 10 a 20 pontos abaixo do valor dado no Quadro 7.7.

Assim, por exemplo, num solo com cerca de 4% de matéria orgânica, a recomendação para o milho seria de um  $V_2$  de 40 a 60%. É importante lembrar que a matéria orgânica, através da sua decomposição, é fonte de cálcio e de magnésio e produz agentes complexantes e quelantes, que reduzem a atividade do alumínio em solução. Portanto, em parte, a matéria orgânica substitui o calcário.

**Quadro 7.7. Limites de saturação por bases ( $V_2$ ) adequados para diferentes culturas nas condições do estado de São Paulo\*.**

$V_2$ (%)	Cultura
30-40	Capim-limão, capins (napier, pangola, coast-cross, estrela, green panic, braquiárias, setárias, gorduras), chá, citronela, leguminosas (centrosema, desmódio, galáxia, cudzu, calapogônio, siratro, estilosantes), palma rosa.
40 -50	Arroz de-sequeiro (máximo 3 t/ha), arroz irrigado (máximo 4 t/ha), azalea (máximo 2 t/ha), cacau, eucalipto (para óleos essenciais), fórmio, fumo, funcho, mandioca (máximo 2 t/ha), seringueira (máximo 2 t/ha).
50-60	Abacate, abacaxi, batata, batata-doce, cana-de-açúcar, capins (rodes, jaraguá e napier <sup>1</sup> , pangola <sup>1</sup> , coast-cross <sup>1</sup> , estrela <sup>1</sup> , green panic <sup>1</sup> , cará, gladiolo, gramados, leguminosas (alfafa, leucena, soja-perene), mamona, manga, menta, plantas ornamentais, rami, trigo, vetiver.
60-70	Abóbora, adubos verdes, alface, algodão, alho, almeirão, ameixa, amendoim, banana, beringela, beterraba, brócolos, bucha, café (máximo 5 t/ha), camomila, caqui, cebola, cenoura, chicória, chuchu, couve-flor, couve-manteiga, crotalaria-juncea, ervilha, escarola, feijão, feijão-vagem, figo, girassol, goiaba, jiló, laranja, leguminosas adubos verdes, limão, maçã, macadâmia, mamona, maracujá, marmelo, melancia, melão, milho, moranga, morango, nabo, nectarina, nespera, pecã, pepino, pera, pêssego, pimenta, pimenta-do-reino, pimentão, quiabo, rabanete, repolho, rosa, soja, sorgo-granífero, tangerina, tomate.
70-80	Mamão, piretro, sisal, uva.

\* A aplicação máxima, em qualquer caso, não deve exceder 10 t/ha, para um período de 3 anos.

<sup>1</sup> Nestes casos, quando usados para capineiras ou fenação; para pastejo usar  $V$  de 30-40%.

Fonte: Werner (1984); Raij et al. (1985).

Dada às vantagens e desvantagens de cada um dos três métodos apresentados, é sempre aconselhável fazer o cálculo por mais de um método, antes da recomendação final. E, ainda, antes da tomada de decisão é mandatório realizar uma adequada interpretação de todos os parâmetros da acidez apresentados no laudo da análise do solo.

## 7.5. EFEITO RESIDUAL DA CALAGEM

Antes de mais nada, a calagem tem de ser considerada como uma prática que atende diversos cultivos sucessivos, especialmente no caso de culturas anuais.

A frequência de aplicação de calcário, ou de outra forma, a magnitude do efeito residual da calagem depende dos vários fatores de acidificação do solo já mencionados, do poder tampão do solo e da granulometria do calcário. Em resumo, o efeito residual da calagem será tanto menor quanto maior for a ocorrência de um ou mais dos seguintes fatores:

- Uso de fertilizantes nitrogenados amoniacais, notadamente sulfato de amônio;
- Remoção de bases pelas colheitas sucessivas;
- Precipitação elevada;
- Chuva ácida
- Cultivo de plantas acidificadoras da rizosfera;
- Cultivo em solo com baixo poder tampão;
- Uso de corretivos de elevada reatividade;
- Uso de doses de corretivos abaixo da dose recomendada.

Por exemplo, sob cultivo intenso – dois ou mais cultivos por ano – em solo mais arenoso e/ou com menor teor de matéria orgânica e com uso de calcário de alta reatividade, é bastante provável a necessidade de calagem anual. Sob condições mais favoráveis, o efeito residual pode chegar a até 5 anos. Em qualquer caso, entretanto, apenas a análise química do solo permitirá avaliar a necessidade ou não de nova calagem.

## 7.6. ÉPOCA DE APLICAÇÃO DOS CORRETIVOS

Já foi bastante enfocada a velocidade de reação dos diferentes materiais corretivos (item 7.2.3).

Considerando que as plantas são mais sensíveis à acidez quando novas, principalmente logo após a germinação, é preciso que a acidez do solo esteja, pelo menos na sua maior parte, já corrigida no ato do plantio. Quando se usa calcário comum, o ideal é fazer a aplicação de 3 a 6 meses antes do plantio. Já os calcários calcinado e do tipo “filler” reagem rapidamente no solo e pode ser aplicado até um mês antes da semeadura. A cal virgem e cal extinta, por serem corretivos de reação quase instantânea no solo, podem ser aplicados muito próximo do plantio. Todavia, conforme já destacado, para evitar danos a sementes e plântulas, dado ao caráter cáustico dos mesmos, é altamente recomendável que sejam aplicados também com cerca de um mês de antecedência.

No caso de rotação leguminosas-gramíneas, é preferível fazer aplicação antes do plantio da gramínea, pois, as leguminosas, em geral, são mais sensíveis à acidez.

---

Também, a sensibilidade das bactérias fixadoras do  $N_2$ , se for o caso, é muito acentuada. No caso de cultivo intensivo, é possível não ocorrer todo o benefício esperado da calagem para a gramínea, mas para a leguminosa o efeito já seria o esperado.

A prática de fazer o parcelamento da quantidade de calcário necessária em dois ou mais anos não é vantajosa, a não ser nos casos da necessidade de se aplicar grandes quantidades para certas culturas (vide Quadro 7.7). Também, no caso do sistema de plantio direto já implantado ou em solos de menor poder tampão, ao invés da repetição dessa prática a cada 3-4 anos, pode-se fazê-la anualmente, com pequena dose para correção da camada de 0-5 cm, de preferência utilizando calcário de alta reatividade.

No caso de lavouras perenes já instaladas, o corretivo deve ser aplicado o mais cedo possível, em antecedência às adubações de produção. Por exemplo, para citros e café, o calcário deve ser aplicado nos meses de maio a julho. A cal virgem e extinta podem ser aplicadas no mês de julho.

## 7.7. FORMA DE APLICAÇÃO DOS CORRETIVOS

A solubilidade em água dos corretivos, principalmente dos calcários, é baixa. Por isto, o efeito da ação neutralizante não se propaga a grandes distâncias, tanto lateralmente quanto verticalmente no perfil do solo. Assim sendo, é muito importante a distribuição do calcário bem como a sua incorporação em toda a área, isto é, o corretivo tem de ser muito bem misturado com o solo. O cálculo da necessidade de calagem, por qualquer um dos métodos destacados anteriormente, baseia-se na distribuição numa área de  $10.000 \text{ m}^2$  (t/ha) e incorporação na camada de 0-20 cm.

Diante de qualquer alteração na área ou na profundidade, a quantidade de calcário calculada terá de ser devidamente corrigida, ou seja, a quantidade a aplicar não será igual à quantidade calculada.

### 7.7.1. Distribuição dos Corretivos

Na implantação de lavouras, é mandatária a aplicação dos corretivos a lanço, com distribuição a mais uniforme possível. Em áreas pequenas, como hortas, o corretivo pode ser espalhado manualmente. Em grandes áreas, a distribuição é feita por meio de distribuidores tratorizados apropriados. As adubadoras a lanço ou mesmo em linhas pouco espaçadas podem também ser utilizadas. E, em grandes empresas agrícolas ou em cooperativas pode-se ter caminhões espalhadores equipados com mecanismos dosadores volumétricos.

A aplicação de calcário na linha de plantio apenas é aceitável para suprimento de cálcio e/ou magnésio em solos menos ácidos. Neste caso, o calcário deve ser finamente moído e as quantidades situam-se de 150 a 300 kg/ha.

No caso de lavouras perenes instaladas, o calcário, preferencialmente, deve ser aplicado também a lanço, em área total. Alternativamente, o calcário pode ser aplicado em linha, ou seja, na faixa adubada, tangenciando a projeção da copa. Neste último caso,

há necessidade de correção da quantidade calculada para o efeito de redução da área de distribuição.

Em alguns países desenvolvidos, aumenta cada vez mais a utilização de calcário finamente moído dissolvido em água, fazendo-se uso de equipamentos de aplicação de fertilizantes fluidos para a distribuição. Neste caso, obtém-se um excelente padrão de distribuição.

### **7.7.2. Incorporação dos Corretivos**

A melhor incorporação de calcário é conseguida com gradagem seguida de aração e outra gradagem. A primeira gradagem melhora a distribuição e faz uma pré-incorporação mais superficial, se bem que a pré-incorporação depende do tipo de grade e da textura do solo. A aração subsequente promove a incorporação, mesmo que horizontalmente irregular, em maiores profundidades. Todavia, a incorporação apenas com aração promove uma boa incorporação vertical, mas bastante deficiente no sentido horizontal, ou seja, a mistura com o solo não fica homogênea.

No caso de aplicação de grandes quantidades de calcário, acima de 4 t/ha, pode-se distribuir metade da dose de calcário antes da aração e a outra metade após a aração e antes de gradear.

Incorporações profundas do corretivo, até 30 - 40 cm, favorecem um maior crescimento radicular em profundidade e, conseqüentemente, maior produtividade, notadamente em região sujeita a estiagens mais prolongadas. Todavia, a necessidade de maquinário especial – grade pesada e subsolador – faz com que a incorporação a maiores profundidades seja possível para poucos agricultores. Neste caso, merece ser lembrado que análise química do solo em profundidade é indispensável.

Antes da implantação do sistema de plantio direto, pode ser necessária a realização de uma calagem muito bem feita, uso de doses mais elevadas, incorporada à maior profundidade possível e utilizando calcário de granulometria mais grosseira para prolongar o efeito residual.

A aplicação superficial de corretivos e sem incorporação no solo tem apresentado bons resultados em culturas perenes instaladas, em pastagens já estabelecidas e no sistema de plantio direto. A quantidade a ser aplicada, entretanto, tem de ser corrigida, ficando de 25 a 50% da quantidade calculada. Em culturas com um sistema radicular bem distribuído e profundo – culturas perenes ou pastagens – pode-se até admitir a aplicação da quantidade total calculada, visando maior movimentação em profundidade.

Um pH muito elevado na superfície não comprometeria a disponibilidade de nutrientes a maiores profundidades. Todavia, enquanto persistir a elevada alcalinidade na superfície bem como a presença de  $\text{CaCO}_3$ , o uso de nitrogênio amoniacal em cobertura resulta em perdas consideráveis de amônia por volatilização. Além disso, pode ocorrer redução significativa da disponibilidade de micronutrientes catiônicos e fósforo na camada mais superficial do solo nestas condições.

---

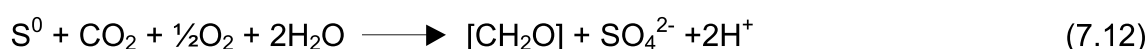
Sempre que for necessário contar com a descida natural da molécula de carbonato e/ou de íons cálcio (como nos casos de incorporação de 0-20 cm e contando com adicional correção abaixo desta profundidade ou de aplicação superficial em lavouras instaladas), pode-se considerar a possibilidade de se aplicar doses mais elevadas - nunca em excesso - de calcário de granulometria bem fina, com a máxima antecedência ao plantio ou às adubações em culturas perenes e contar com boas precipitações de chuva no período.

## 7.8. ACIDIFICAÇÃO DO SOLO

No Brasil, conforme já destacado, a maior preocupação relacionada à reação do solo diz respeito ao fato de que cerca de 70% dos solos cultivados apresentam um ou mais problemas relacionados com acidez excessiva. Assim, a prática da calagem torna-se de vital importância no manejo da fertilidade do solo.

Todavia, algumas vezes a preocupação pode estar centrada no fato do solo se apresentar com elevado pH (> 7,0). As regiões onde a precipitação não é suficiente e os solos não favorecem a drenagem e lixiviação do excesso de sais são propícias à ocorrência de solos alcalinos. No Brasil, os solos sob a influência de brisas marinhas (regiões costeiras) e no semi-árido nordestino podem apresentar pH alcalino. Na verdade, a condição de solo com alcalinidade natural elevada é muito menos comum na agricultura brasileira. Contudo, muitas vezes, tal condição pode ocorrer devido ao uso excessivo de calcário ou irrigação com água contendo sais – carbonatos de cálcio, magnésio e de sódio – em grandes quantidades. Nestes casos, a acidificação torna-se, por sua vez, também uma importante prática de manejo da fertilidade do solo.

O enxofre elementar é o mais efetivo adicificante do solo. Quando o enxofre é finamente moído e misturado com o solo, ocorre a oxidação microbiana para sulfato, segundo a reação geral abaixo:



A reação 7.12 mostra que para cada equivalente de enxofre aplicado e oxidado, são produzidos dois equivalentes de  $H^+$ . O cálculo da quantidade de enxofre a ser adicionada depende da curva de neutralização do solo, do pH inicial e pH final desejado. O potencial teórico da acidificação é equivalente a cerca de 6,25 kg de  $CaCO_3$  por quilo de enxofre aplicado.

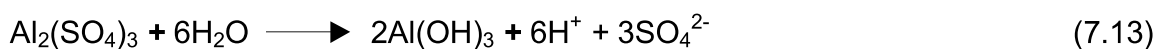
O enxofre elementar deve ser aplicado a lanço e incorporado no solo pelo menos um mês antes do plantio, pois a reação de oxidação é relativamente lenta. Sem incorporação, o contato com microrganismos oxidantes é mínimo, conseqüentemente, o efeito será ainda muito mais lento. Algumas vezes, em lavouras instaladas, é recomendável o uso localizado de enxofre elementar na linha de plantio ou na projeção da copa, para promover uma pequena área de acidificação, o que pode aumentar a disponibilidade de

---

micronutrientes catiônicos de forma satisfatória. Neste caso, as quantidades a serem aplicadas são muito menores do que as requeridas para aplicação a lanço.

O ácido sulfúrico também pode ser utilizado, apresentando reação instantânea no solo. Mas, é de difícil manuseio e requer equipamentos especiais. Tem sido usado em água de irrigação em solos de região árida e semi-árida, mas, conforme ressaltado, há necessidade do sistema de irrigação ser propício – material resistente ao ácido – para seu uso.

O sulfato de alumínio é muito usado em floricultura para acidificação de vasos na produção de azaléas, camélias e demais ornamentais tolerantes a acidez. Todavia, seu uso seria totalmente condenável na agricultura em geral. Na sua hidrólise, produz-se uma solução muito ácida, segundo a reação:



De forma mais prática, na situação prevalecente na maioria das vezes na agricultura brasileira, a maneira mais viável de combater a alcalinidade do solo é através do uso de fertilizantes nitrogenados amoniacais, notadamente sulfato de amônio, dada à necessidade da adubação nitrogenada em cobertura.

O sulfato de amônio tem elevado poder de acidificação, pois além de fornecer íons  $\text{NH}_4^+$  para nitrificação, produz o ânion sulfato que promove a lixiviação de bases. Além disto, a absorção de amônio pelas plantas, quando este não é nitrificado, acarreta acidificação da rizosfera.

A quantidade de acidez gerada pelo sulfato de amônio pode ser teoricamente calculada, considerando que todo amônio adicionado através da adubação com este fertilizante é convertido em nitrato. Ela corresponde a 2 equivalentes de  $\text{H}^+$  por equivalente de  $\text{N-NH}_4^+$  aplicado, conforme mostra a reação abaixo:



O potencial teórico de acidificação é equivalente a cerca 5,2 kg de  $\text{CaCO}_3$  por quilo de nitrogênio aplicado.

Assim como já observado para o uso do enxofre elementar, na maioria das vezes, não há necessidade de acidificar toda a área de solo afetada pela alcalinidade. A aplicação localizada de sulfato de amônio em faixas na proximidade da linha de plantio ou na projeção da copa de culturas perenes, formas mais comuns de aplicação em cobertura, pode criar uma zona de volume de solo com acidez mais elevada, o que pode resolver problemas de disponibilidade de micronutrientes catiônicos.

---



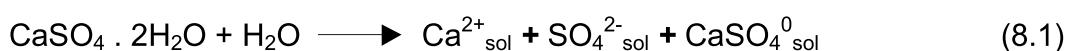
As limitações impostas pela acidez em solos das áreas de cerrado vão além da camada arável, atingindo as camadas subsuperficiais, onde a toxidez de alumínio e/ou baixa disponibilidade de cálcio são os principais fatores que impedem a maximização das produções, por limitar o crescimento radicular e, conseqüentemente, a utilização de água e de nutrientes em profundidade.

A correção da acidez subsuperficial via calagem encontra sérios problemas, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico, pois exige equipamento apropriado e alto consumo de energia. Por isto, o uso de sais de cálcio mais solúveis que o carbonato do calcário para, pelo menos, promover lixiviação do cálcio abaixo da camada arável tem sido proposta como alternativa viável para se aumentar a profundidade do sistema radicular. Assim, o gesso agrícola –  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – surge como uma dessas alternativas.

O gesso agrícola é um sub-produto da indústria de fertilizantes fosfatados concentrados e contém cerca de 20% de cálcio, 15% de enxofre, 0,7% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e 0,6% de flúor. Portanto, antes de mais nada, é uma importante fonte de cálcio e de enxofre para as plantas, ou seja, um importante fertilizante. No caso de aplicações elevadas, mesmo o suprimento de fósforo pode ser muito significativo (Sumner et al., 1986). E, o flúor pode ser importante na diminuição da atividade do alumínio em solução, devido a formação de fluoreto de alumínio.

### 8.1. REAÇÕES DO GESSO EM SOLOS ÁCIDOS

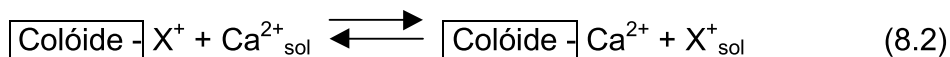
O gesso tem uma solubilidade aproximada de 2,5 g/litro, cerca de 178 vezes a do  $\text{CaCO}_3$ , sendo sua solubilização na camada superficial representada na reação 8.1.



Em primeiro lugar, observa-se na reação 8.1 que o gesso é um sal neutro, portanto, sem capacidade de neutralizar a acidez do solo promovendo a elevação do pH,

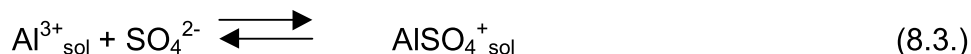
---

diferentemente do calcário. Em segundo lugar, merece destaque a formação do par iônico solúvel –  $\text{CaSO}^0$  – que está em equilíbrio com os íons  $\text{Ca}^{2+}$  e ainda na parte superficial do solo, camada de aplicação do gesso, podem ocorrer reações de troca do cálcio com qualquer cátion trocável, conforme especificado abaixo para um cátion  $\text{X}^+$ .



Cátions já presentes na solução do solo, ou para ela deslocados pelo cálcio (reação 8.2), podem reagir com íons sulfato da solução formando outros pares iônicos solúveis tais como  $\text{MgSO}_4^0$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4^0$ ,  $\text{MnSO}_4^0$ , os quais podem ser lixiviados para camadas mais profundas no solo.

Os íons sulfato podem reagir com o  $\text{Al}^{3+}$  da solução, formando espécies químicas que resultam em menor atividade do alumínio em solução, portanto, reduzindo sua toxidez (reações 8.3 e 8.4).



A criação de condições mais favoráveis em camadas superficiais, em função do suprimento de cálcio e redução da atividade de alumínio, já permite um maior crescimento radicular nestas camadas (Quadro 8.1), conforme observado para o algodão por Silva (1990).

No geral, observa-se no Quadro 8.1, acentuado aumento no crescimento de raízes com o uso de  $\text{CaSO}_4$  e/ou  $\text{CaCO}_3$ , quando se compara com a testemunha – solo ácido com pH em água igual a 5,2 e 46% de saturação de alumínio. O efeito benéfico do  $\text{CaCO}_3$  em profundidade deve-se ao uso de  $\text{CaCO}_3$  puro micropulverizado e a acentuada irrigação nas colunas do solo, favorecendo o maior arraste de partículas de carbonato não dissociado pela água percolada, promovendo aumento no teor de cálcio trocável em profundidade (Silva, 1990). Quando do uso de calcário no campo, este enriquecimento em cálcio em profundidade praticamente não é observado, a não ser com uso de calcário também micropulverizado e em maiores dosagens, mesmo assim após vários anos da aplicação.

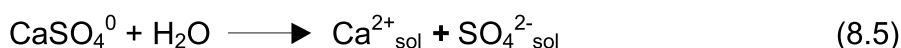
**Quadro 8.1. Comprimento do sistema radicular do algodoeiro, nas diversas profundidades de coluna de solo, em função da aplicação de diferentes relações CaCO<sub>3</sub>/CaSO<sub>4</sub>.**

Profundidade (cm)	Tratamentos (CaCO <sub>3</sub> / CaSO <sub>4</sub> ) <sup>*</sup>					
	0/0 (Testemunha)	100/0	75/25	50/50	25/75	0/100
	.....cm.....					
0-10	731	3409	2961	3354	2623	2358
10-20	409	2602	2962	2401	1967	1597
20-30	349	2823	2313	1954	2090	2060
30-40	192	1680	1234	1264	1842	1282
40-50	91	777	581	662	699	882
50-60	145	566	718	407	505	804

\*Tanto CaCO<sub>3</sub> quanto CaSO<sub>4</sub> . 2H<sub>2</sub>O, como reagentes puros, foram aplicados na camada de 0-20cm.

Por outro lado, o uso do CaSO<sub>4</sub> . 2H<sub>2</sub>O promove, sem dúvida nenhuma, condições mais favoráveis para as raízes em profundidade, com enriquecimento das camadas subsuperficiais em cálcio e sulfato (Silva, 1990). Basicamente, a grande capacidade do gesso em enriquecer as camadas subsuperficiais em cálcio deve-se à lixiviação do par iônico solúvel CaSO<sub>4</sub><sup>0</sup> produzido na dissolução do gesso (reação 8.1), o qual não reage com as cargas elétricas dos colóides do solo.

Em camadas subsuperficiais, ocorrendo uma baixa atividade de cálcio em solução o CaSO<sub>4</sub><sup>0</sup> sofre dissociação, conforme mostra a reação abaixo:



O enriquecimento das camadas subsuperficiais em cálcio promove condições mais favoráveis ao crescimento radicular, não apenas pelo relevante e imprescindível papel do cálcio nesse processo, mas também pela competição do cálcio com alumínio no processo de absorção. O cálcio em concentração mais elevada minimiza os efeitos prejudiciais dos íons H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup> na permeabilidade da plasmalema de células da raiz (Jacobson et al., 1960). Ademais, o enriquecimento em sulfato, adicionalmente, promove uma redução da atividade do alumínio em solução, portanto, reduzindo sua toxidez, conforme mostrado nas reações 8.3 e 8.4.

Além dos mecanismos propostos, a formação do fluoreto de alumínio também tem sido considerada como mecanismo de redução da atividade de alumínio em solução, através da utilização do gesso, pois os complexos de alumínio com flúor são muito mais

estáveis do que os formados com sulfato. As reações 8.6 e 8.7 mostram, respectivamente, a formação de um complexo iônico e outro neutro, no caso de reação completa, entre esses dois íons:



Oates e Caldwell (1985) constataram que o gesso agrícola foi mais eficiente que o CaSO<sub>4</sub> puro em reduzir a atividade do alumínio em solução, o que foi atribuído a presença do flúor como impureza no gesso.

Além da movimentação descendente de cálcio, a aplicação de gesso pode ocasionar lixiviação de potássio e magnésio nas formas dos pares iônicos K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub><sup>0</sup> e MgSO<sup>0</sup> (Reeve e Summer, 1978; Pavan et al., 1984).

Tal lixiviação pode representar significativa perda de bases da região das raízes e provocar desequilíbrio entre as quantidades de cálcio, magnésio e potássio do solo. Ressalta-se, portanto, que o uso de gesso em substituição total ao calcário tende a trazer problemas para o cultivo das plantas, não sendo prática recomendável (Embrapa, 1982). Todavia, para a gessagem acompanhada da calagem, tanto o potássio quanto o magnésio seriam mais fortemente retidos nos colóides das camadas superficiais do solo, em função do aumento da CTC promovido pela calagem, minimizando as perdas de potássio e magnésio por lixiviação e evitando os desequilíbrios nutricionais causados pela gessagem.

Por fim, não se pode perder de vista que o gesso se solubiliza e movimenta verticalmente no solo em velocidade que depende da dose aplicada e da quantidade de água que percola no solo.

## 8.2. DIAGNÓSTICO DA TOXIDEZ DE ALUMÍNIO OU DEFICIÊNCIA DE CÁLCIO

Ainda não está bem definida a condição de deficiência de cálcio ou de toxidez de alumínio em que se recomendaria a prática da gessagem. Neste sentido, é preciso lembrar que as espécies de plantas e genótipos dentro de uma mesma espécie diferem quanto a tolerância à acidez. Deve-se ressaltar ainda, que o diagnóstico da deficiência de cálcio ou de toxidez do alumínio tem de ser feito em camada subsuperficial, ou seja, é preciso amostrar o solo na camada de 20-40 cm e, idealmente, até 60 cm.

Para o trigo, Ritchey et al. (1983) obtiveram um valor crítico para o crescimento de raízes entre 0,02 e 0,05 cmol<sub>c</sub> Ca/dm<sup>3</sup>, sendo que a adição de 0,2 cmol<sub>c</sub> Ca/dm<sup>3</sup> foi ideal para o crescimento radicular. Para o capim andropogon, o nível crítico foi ainda menor que 0,02 cmol<sub>c</sub> Ca/dm<sup>3</sup> de solo (Goedert et al., 1985). A batatinha emitiu mais tubérculos quando da aplicação de cálcio em solo que continha inicialmente 0,2 cmol<sub>c</sub> Ca/dm<sup>3</sup> (Silva et al., 1987). Para a soja, Bruce et al. (1988) obtiveram 0,45 cmol<sub>c</sub> Ca/dm<sup>3</sup> ou 11% de saturação da CTC efetiva como teor crítico para o crescimento de raízes. Howard e

Adams (1965) obtiveram em dois subsolos um valor crítico de 12% de saturação de cálcio para o algodoeiro. E, segundo Braga (1991), a ausência de resposta no crescimento de raízes do eucalipto ao uso do gesso, sugere que o nível crítico no solo para crescimento radicular dessa espécie seria inferior a  $0,05 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3$  ou 6% da CTC efetiva.

Lopes (1986) recomenda a gessagem para solos com camadas subsuperficiais com menos de  $0,3 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3$  e/ou com mais de  $0,5 \text{ cmol}_c \text{ Al/dm}^3$  e/ou saturação de alumínio maior que 40%. Por sua vez, Sousa (1988) indica o uso de gesso sempre que a saturação de alumínio for maior que 30% e/ou o teor de cálcio for menor que  $0,2 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ , em amostras de solo das profundidades de 20 até 60 cm. Ainda, Sousa et al. (1995) sugerem que o gesso deve ser recomendado quando a saturação de alumínio for superior a 20% ou quando o teor de cálcio for menor que  $0,5 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ . Malavolta e Netto (1989) sugerem que se recomende gesso para o citros quando a análise da camada de 20-30 cm mostrar um teor de alumínio maior que  $0,5 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$  ou teor de cálcio menor que  $2,0 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ .

### 8.3. CÁLCULO DA NECESSIDADE DE GESSAGEM

Ainda não existe um método seguro para calcular a dose de gesso a ser aplicada no solo. São três as sugestões mais aceitas.

Lopes (1986) sugere substituir 25% do CaO do calcário por CaO do gesso quando a necessidade de calagem for determinada pelo método da saturação por bases (item 7.4.3). A título de exemplo, considere-se uma necessidade de calagem de 4 t/ha de calcário, o uso de um calcário com 40% CaO e o gesso com cerca de 25% de CaO.

100 kg calcário  $\longrightarrow$  40 kg CaO

4000 kg calcário  $\longrightarrow$  X

$$X = 1600 \text{ kg CaO/ha}$$

Assim, se fosse feita a aplicação apenas do calcário, seriam aplicados 1600 kg CaO/ha. A sugestão é de substituir 25% do CaO aplicado via calcário, o que neste exemplo representa 400 kg de CaO/ha ( $0,25 \times 1600$ ). A dose de gesso, portanto, será dada por:

100 kg gesso  $\longrightarrow$  25 kg CaO

Y  $\longrightarrow$  400 kg CaO/ha

$$Y = 1600 \text{ kg gesso/ha}$$

A recomendação final seria de aplicar 3000 kg de calcário/ha mais 1600 kg de gesso agrícola/ha.

No caso da necessidade de calagem ser determinada pelo método baseado nos teores de alumínio, cálcio e magnésio trocáveis (item 7.4.2), Lopes (1986) sugere

---

adicionar, na forma de gesso agrícola, mais 25% de CaO além do CaO do calcário. Neste caso, o raciocínio para o cálculo da quantidade de gesso é análogo ao do exemplo anterior, lembrando-se, porém, que não há redução na quantidade de calcário a aplicar.

Ainda, segundo Lopes (1988) quando a gessagem for indicada e o agricultor optar pela realização da prática da fosfatagem corretiva, deve-se fazer uso do superfosfato simples, pois o mesmo apresenta 50% de gesso em peso. Dependendo da quantidade aplicada de supersimples, o uso de gesso agrícola isoladamente pode até ser dispensável.

Sousa (1988) sugere aplicação de gesso em função do teor de argila do solo, conforme expresso no Quadro 8.2.

#### Quadro 8.2. Recomendação de gesso com base no teor de argila dos solos.

Textura	Teor de argila (%)	Kg gesso/ha
Arenosa	< 15	600
Média	16-36	1000
Argilosa	36-60	1600
Muito argilosa	> 60	2000

Dada à facilidade e necessidade da determinação do teor de argila em análises do solo, Lopes (1992) sugere, com base nos trabalhos de Sousa (1988) e Sousa et al. (1992), o uso da fórmula abaixo para culturas anuais. E, no caso de culturas perenes, a necessidade de gesso (NG) deve ser multiplicada por 1,5.

$$NG \text{ (kg/ha)} = 40 \cdot \% \text{ argila}$$

Malavolta (1991) propõe que para elevar o teor de cálcio trocável no solo em 1,0 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> são necessárias 2,5 t de gesso/ha e que a necessidade de gessagem, com base na análise da camada de 20-40cm, pode ser dada por:

$$NG \text{ (t/ha)} = (0,4 \cdot t - \text{cmol}_c \text{ Ca}^{2+}/\text{dm}^3) \cdot 2,5$$

ou

$$NG \text{ (t/ha)} = (\text{comol}_c \text{ Al}^{3+}/\text{dm}^3 - 0,2 \cdot t) \cdot 2,5$$

Em ambas as fórmulas, *t* refere-se a CTC efetiva da camada de 20-40 cm.

#### 8.4. FORMA DE APLICAÇÃO DO GESSO

Na implantação de lavouras ou em culturas perenes já instaladas o gesso deve ser distribuído uniformemente à lanço, conforme indicado para a aplicação de calcário. A princípio, não há necessidade de incorporar o gesso como se faz com o calcário, devido a solubilidade e facilidade de movimentação descendente do gesso. Entretanto, para

reduzir perdas por escoamento superficial da água e para acelerar a descida do gesso, é recomendada também a incorporação com gradagem e aração. Portanto, tanto para distribuição quanto para incorporação, as máquinas utilizadas na gessagem são basicamente as mesmas utilizadas na calagem.

Recomenda-se proceder a gessagem após certo período de reação do calcário, especialmente quando se faz a calagem com calcário comum, devido a sua reação mais lenta. Com isto, reduz-se as perdas de magnésio e de potássio das camadas superficiais, conforme ressaltado anteriormente no item 8.2. No caso de uso de calcário calcinado, pode se fazer a aplicação conjunta de calcário e gesso. Um problema que surge nessa mistura diz respeito a umidade do gesso, que precisa estar na faixa de 10 a 20%.

Por razões de ordem econômica, entretanto, a distribuição do gesso junto com o calcário, ou logo após, é indicada, fazendo-se uma única operação de incorporação. Na verdade, a maior preocupação quanto às perdas de bases está relacionada com o magnésio. Mas, isto apenas chega a ser problema se, em solo já naturalmente pobre em magnésio, o agricultor usa calcário inadequado – pobre em magnésio –, permitindo, dessa forma, um arraste em profundidade do pouco já existente deste nutriente.

## 8.5. BENEFÍCIOS DA GESSAGEM

Os principais efeitos benéficos do uso de gesso estão ligados ao fornecimento de cálcio e diminuição da saturação por alumínio em profundidade no solo. Como discutido, isto propicia maior crescimento radicular em profundidade (Quadros 8.1 e 8.3), favorecendo maior exploração do solo e absorção de nutrientes e água. Dessa forma, pode-se esperar maior resposta das culturas à esta prática agrônômica em anos agrícolas com menor disponibilidade hídrica durante o ciclo da cultura e, em especial, na ocorrência de veranicos.

**Quadro 8.3. Efeito de aplicações de gesso na distribuição, em profundidade, de raízes de várias espécies vegetais crescendo em solos altamente intemperizados.**

Profundidade (cm)	Milho <sup>(1)</sup>		Maçã <sup>(2)</sup>		Alfafa <sup>(3)</sup>		Algodão <sup>(4)</sup>	
	Distrib. relativa de raízes		Densidade de raízes		Comprimento de raízes		Comprimento de raízes	
	Test.	Gesso	Test.	Gesso	Test.	Gesso	Test.	Gesso
	.....%.....		.....cm/g.....		.....m/m <sup>3</sup> .....		.....cm.....	
0-15	53	34	50	119	115	439	981	3658
15-30	17	25	60	104	30	94	548	2657
30-45	10	12	18	89	19	96	448	1682
45-60	8	19	18	89	10	112	183	1200
60-75	2	10	18	89	6	28	145	804

<sup>(1)</sup> Souza e Ritchey (1986); <sup>(2)</sup> Pavan e Bingham (1986); <sup>(3)</sup> Sumner e Carter (1988); <sup>(4)</sup> Silva (1990).

Deve-se lembrar que a lixiviação do cálcio para camadas mais profundas no solo depende, dentre outros fatores, do volume de água percolada e da concentração deste nutriente na solução do solo. O aumento da irrigação e/ou da dose de gesso promove uma movimentação mais intensa de cálcio em profundidade, conforme observado por Braga (1991) e apresentado na Figura 8.1.

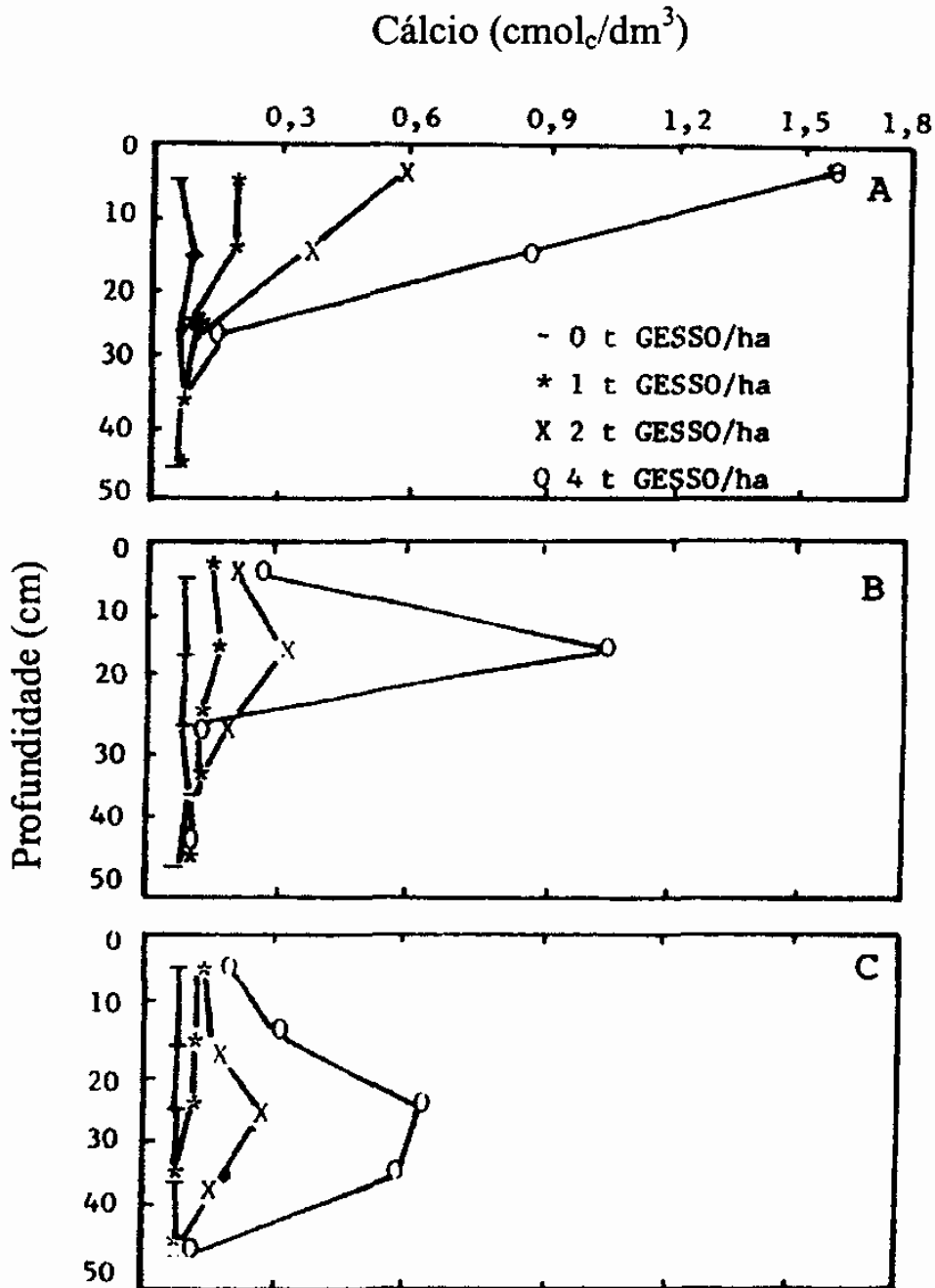


Figura 8.1. Teores de cálcio a diferentes profundidades do solo, em função de doses de gesso e de níveis de irrigação (A= 8,5; B= 13,9; C= 17,4 mm de água/dia).



## **PRINCÍPIOS BÁSICOS ENVOLVIDOS NA RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO**

---

O correto manejo da fertilidade é responsável por grande parte dos ganhos de produtividade das culturas. Considerando a fertilidade natural da grande maioria dos solos brasileiros, os ganhos nas nossas condições podem ser ainda muito mais elevados. Neste contexto, em complementação às práticas corretivas, a prática da adubação propriamente dita assume papel de relevada importância. Mas, por representar uma significativa parcela nos custos de produção, a adubação tem de ser feita com a máxima eficiência para resultar na obtenção da produtividade máxima econômica (PME), para causar o mínimo de danos ao meio ambiente, para se obter produtos agrícolas com qualidade e para se evitar o desperdício de recursos naturais não renováveis.

A recomendação e eficiência da adubação não depende apenas da definição das doses a serem aplicadas. Muito pelo contrário, tem-se que analisar uma série de aspectos, dentre os quais, sem qualquer ordem sequencial, destacam-se:

- Definição dos nutrientes a serem aplicados;
- Definição da quantidade do nutriente a ser aplicada;
- Definição da melhor época de aplicação dos nutrientes;
- Definição dos fertilizantes a serem aplicados;
- Definição da forma de aplicação dos fertilizantes.

Para a definição de qualquer um dos aspectos destacados, tem-se que considerar também os aspectos econômicos desta prática. Logicamente, conforme já destacado para a calagem, o aspecto econômico não pode prejudicar qualquer uma das definições de ordem técnica, pois a racionalidade da adubação poderá ser comprometida.

Neste capítulo pretende-se abordar alguns princípios básicos envolvidos na recomendação de adubação, de forma a se obter a melhor resposta para todas as definições necessárias. Em capítulos seguintes, pela importância de certos assuntos, alguns dos aspectos envolvidos em tais definições serão abordados com maior riqueza de detalhes.

---

### 9.1. DEFINIÇÃO DO NUTRIENTE A APLICAR

A primeira resposta a ser dada no processo de recomendação de adubação diz respeito à definição dos nutrientes a serem aplicados. Tal definição somente é possível ao se considerar, de forma conjunta, os fatores solo, planta e agricultor (Figura 2.2).

A definição da necessidade de aplicação de um dado nutriente inicia-se por uma completa avaliação da fertilidade do solo, isto é, através da avaliação da capacidade do solo em suprir os nutrientes às plantas. Para tanto, pode-se fazer uso de qualquer um dos métodos de avaliação da fertilidade do solo – análise química e física do solo, diagnose visual da planta e análise química da planta (Figura 2.4). Apesar de, em lavouras já instaladas, ser perfeitamente possível se verificar a necessidade de aplicação de um dado nutriente através da diagnose visual ou da análise química da planta, o método mais amplamente usado em todo o mundo e indispensável na implantação da lavoura é, sem dúvida, a análise química e física do solo.

Conforme destacado no Capítulo 5, já existem diversas proposições de classes de fertilidade com os respectivos limites de teores de nutrientes, as quais são usadas para interpretação dos resultados de análise do solo, visando a definição dos nutrientes a aplicar (vide Quadros 5.2 a 5.11). A título de exemplificação e considerando a proposição da CFSEMG (1999), a decisão de não aplicar potássio em solos com diferentes disponibilidades nesse nutriente, resultará em produções de milho muito distintas (Quadro 9.1).

**Quadro 9.1. Situação hipoteticamente criada, para a produção do milho cultivado sob diferentes disponibilidades de potássio no solo, sem qualquer aplicação desse nutriente, com base em critérios da CFSEMG (1999).**

Teor de K <sup>+</sup> no solo (mg/dm <sup>3</sup> )	Classe de Fertilidade	Produção Relativa (%)	Produção (kg/ha)
10	Muito Baixo	15	900
40	Baixo	60	3600
55	Médio	70	4200
69	Médio	90	5400
94	Bom	95	5700
150	Alto	100	6000

Da análise do Quadro 9.1, conclui-se que a definição da necessidade de aplicação de potássio para o milho dependerá, basicamente, da disponibilidade desse nutriente no solo e da expectativa de produção. Esse é o princípio básico para definição dos nutrientes a aplicar em um determinado cultivo, conforme destacado a seguir:

**Definição do Nutriente a Aplicar**

↗ Disponibilidade do Nutriente no Solo

↘ Produtividade Esperada

Ao levar em conta a produtividade esperada, está-se considerando tanto o fator agricultor quanto o fator planta. Em última instância, é o agricultor, através de seu nível tecnológico, quem define a produtividade esperada. E, na produtividade a ser considerada, já está implícita a exigência da planta num dado nutriente.

De forma específica para os micronutrientes, a variação entre espécies na sensibilidade à baixa disponibilidade dos mesmos no solo também é muito importante e precisa ser explorada na recomendação de adubação. Muitos laboratórios ainda não analisam micronutrientes, de tal sorte que na tomada de decisão sobre aplicar ou não o micronutriente, o fator planta pode ser decisivo. Por exemplo, o cultivo do milho em solo com baixa disponibilidade de micronutrientes requer cuidado especial com a aplicação de zinco. Nesse mesmo solo, o cultivo de girassol, por sua vez, iria requerer maior atenção para o suprimento de boro. Tais considerações levam à utilização da chamada **Adubação de Segurança** com micronutrientes. Todavia, nunca é demais enfatizar que, mesmo para os micronutrientes, o correto é utilizar-se de resultados de análise do solo e/ou foliar para avaliar a disponibilidade desses nutrientes e recomendar somente aqueles realmente necessários. Enfim, o correto é, sempre que possível, optar pela **Adubação de Prescrição** com micronutrientes.

## 9.2. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE NUTRIENTE

Uma vez determinado o nutriente a ser fornecido, a definição da quantidade a aplicar novamente dependerá do teor do nutriente no solo e a expectativa de produção.

**Definição da Quantidade de Nutriente a Aplicar**

↗ Disponibilidade do Nutriente no Solo

↘ Produtividade Esperada

Ao levar em conta a produtividade esperada, está-se considerando tanto o fator agricultor quanto o fator planta. É o agricultor, através de seu nível tecnológico, quem determina a produtividade esperada. E, na produtividade escolhida, já está implícita a exigência da planta no nutriente. Notadamente em situações de cultivos com maiores produtividades, é extremamente importante se conhecer a planta no tocante a sua exigência nutricional. Por exemplo, para se produzir uma tonelada de milho por hectare há necessidade da seguinte disponibilidade de nutrientes no solo (Quadro 9.2).

**Quadro 9.2. Remoção média de nutrientes do solo para produção de 1 t/ha de milho.**

Nutriente	Quantidade de nutriente removido do solo	
	(kg/ha)	
N	30	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	10	
K <sub>2</sub> O*	26	
S	05	
Ca	06	
Mg	06	
Zn	0,1	
B	0,03	
Mo	0,01	

\* Quantidade de fósforo e potássio expressas em P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente, em concordância com a expressão do teor desses nutrientes em fertilizantes.

É muito importante que o técnico consulte os boletins estaduais ou regionais de recomendação de adubação, visando uma melhor definição da quantidade a aplicar. Desde que o método de análise do solo seja o mesmo para um dado nutriente, as recomendações passam a refletir apenas o avanço do conhecimento gerado pelos pesquisadores do estado ou região.

Nos boletins de recomendação de adubação, a definição da quantidade de nutriente a aplicar é feita com base na disponibilidade do nutriente no solo e em uma produtividade esperada, que, normalmente, representa a produtividade máxima econômica para a espécie vegetal, a partir de experimentação na região ou no estado. No caso de Minas Gerais, a CFSEMG (1999) considera faixas de produtividade esperada variando de 4 a acima de 8 t/ha para o milho. Sem dúvida, principalmente para produtividades mais elevadas, tem-se que considerar a exigência da espécie vegetal em nutrientes (Quadro 9.2, para o milho) e, com isto, ficar muito atento para os preceitos da “Lei de Liebig”, ou seja, procurar fazer uma recomendação equilibrada de nutrientes. Por exemplo, para dobrar a produtividade de 5 para 10 t/ha, a lavoura de milho terá de ter a sua disposição um acréscimo de cerca de 150 kg N/ha. Mesmo com a aplicação de nitrogênio, o aumento de produtividade não será obtido se o solo não tiver ou não for feita uma aplicação de fertilizante de forma a suprir o adicional de 500 g Zn/ha (Quadro 9.2).

Com o avanço das pesquisas em Fertilidade do Solo, a tendência observada nos boletins mais recentes é a de se definir a quantidade de nutrientes a aplicar com base no teor dos nutrientes no solo e em produtividades esperadas crescentes.

## CARACTERÍSTICAS DOS FERTILIZANTES MINERAIS E ORGÂNICOS

---

De um modo geral, fertilizantes ou adubos são compostos que contem um ou mais nutrientes de plantas, em forma prontamente disponíveis ou, em formas que se tornam disponíveis com o tempo no solo.

Durante os últimos anos tem-se verificado um grande aumento no consumo mundial de fertilizantes minerais e, mais recentemente, também de fertilizantes orgânicos. Isto se deve ao incremento na demanda de alimentos, fibras, madeira, energia e, em razão disso, ao avanço da exploração agrícola para áreas de baixa fertilidade natural. Também, a redução nos custos da produção de fertilizantes tem contribuído para o crescimento do seu consumo.

Além de promover aumento de produção, a correta adubação resulta na obtenção de alimentos de melhor qualidade, pois, por exemplo, os mesmos tornam-se mais ricos em vitaminas, proteínas e sais minerais, substâncias de grande importância para a nutrição humana e animal.

O objetivo desse capítulo é justamente o de caracterizar os principais fertilizantes minerais e orgânicos disponíveis no Brasil, visando escolher a melhor opção para cada adubação a ser feita, ou seja, visando subsidiar a definição do fertilizante a ser aplicado.

### 10.1. CLASSIFICAÇÃO DOS FERTILIZANTES

#### 10.1.1. Quanto à Natureza Química

Sob o ponto de vista químico os fertilizantes podem ser divididos em fertilizantes minerais e orgânicos.

Os fertilizantes minerais são constituídos de compostos químicos inorgânicos, tanto de origem natural quanto produzidos industrialmente. A uréia e os quelatos sintéticos com micronutrientes, apesar de conterem carbono, são considerados fertilizantes minerais ou químicos dada à origem industrial dos mesmos.

---

Os fertilizantes minerais apresentam uma importante sub-divisão:

- a) Fertilizantes simples – são aqueles formados ou caracterizados por um único composto químico, podendo, entretanto, conter um ou mais nutrientes de plantas;
- b) Fertilizantes mistos ou formulados – são aqueles resultantes da mistura de dois ou mais fertilizantes simples.

Os fertilizantes orgânicos são constituídos de compostos de natureza orgânica, representados em resíduos de origem vegetal, animal, agroindustrial e urbana. Pela sua importância e especificidade, os fertilizantes orgânicos serão abordados em separado.

Algumas vezes, ao fertilizante orgânico ou a uma base orgânica é adicionado fertilizante mineral com o objetivo de enriquecer o fertilizante orgânico em nutrientes ou de se ter o nutriente em formas mais estáveis – disponíveis – no solo. São os chamados fertilizantes organo-minerais. A mistura de compostos inorgânicos contendo micronutrientes catiônicos com uma base orgânica rica em compostos complexantes e/ou quelantes resulta em excelente fertilizante para esses nutrientes – os chamados micronutrientes quelatizados –, com uso crescente em países desenvolvidos e no Brasil.

#### 10.1.2. Quanto à Natureza Física

Quanto ao aspecto físico os fertilizantes são classificados em sólidos, líquidos e gasosos. O único fertilizante que se apresenta na forma gasosa é a amônia anidra, a qual exige cuidados muito especiais na sua aplicação.

Os fertilizantes sólidos ainda são, largamente, os mais utilizados no Brasil.

O uso de fertilizantes líquidos ou fertilizantes fluidos tem aumentado nos últimos anos em todo o mundo. Entre os fatores que tem determinado o aumento da produção e consumo de fertilizantes fluidos, citam-se:

- Menor custo de produção;
- Menor consumo de mão-de-obra na aplicação;
- Uso da adubação foliar;
- Maior adaptabilidade à fertirrigação;
- Melhor uniformidade de aplicação.

A cana de-açúcar é responsável pelo consumo de 90% do adubo fluido produzido no Brasil (Boaretto et al., 1991). Algumas usinas de açúcar e álcool apresentam estrutura própria de produção de fertilizantes líquidos, notadamente hidratadores de amônia anidra, e fazem uso da vinhaça– fertilizante orgânico fluido.

---

## 10.2. CARACTERÍSTICAS DOS FERTILIZANTES MINERAIS

### 10.2.1. Características de Natureza Física

#### a) Granulometria

Os fertilizantes minerais sólidos podem se apresentar na forma de pó, ou farelado, ou de grânulos. A granulometria do fertilizante é importante, em face do efeito da superfície específica em fenômenos que dependem de contato, tais como velocidade de reação e absorção de água – higroscopicidade. Os fertilizantes muito solúveis em água, como a uréia, e muito higroscópicos, como o nitrato de amônio e o nitrocálcio, devem se apresentar em granulometria mais grosseira, ou seja, na forma de grânulos. Por outro lado, aqueles menos solúveis em água – termofosfatos, fosfato natural e “calcário” – devem ser preferidos na forma de pó.

No caso dos fertilizantes mistos ou formulados, relacionado à granulometria, tem-se os seguintes tipos de formulados:

- Mistura de grânulos – são formulados obtidos pela mistura de dois ou mais fertilizantes simples, de forma que os nutrientes se apresentam em grânulos diferentes.
- Mistura granulada – são formulados obtidos pela mistura de dois ou mais fertilizantes simples na forma de pó e, com posterior granulação, através de processamento industrial sofisticado. Assim, em cada grânulo estão contidos todos os nutrientes envolvidos, na proporção misturada.

A desuniformidade no tamanho dos grânulos de mistura de fertilizantes simples realizada pelo agricultor ou de formulados na forma de mistura de grânulos resulta na segregação, isto é, na separação dos grânulos por ordem de tamanho, com o caminhamento da adubadora no campo. A segregação resulta na distribuição irregular dos nutrientes. Com isso, o uso de formulados tipo mistura granulada deve ser priorizado, principalmente, para NPK enriquecido com micronutrientes.

#### b) Consistência

Diz respeito a resistência dos grânulos à quebra ou à abrasão. A consistência dos grânulos pode ser aumentada com o uso de substâncias aglutinantes no processo de granulação. O esfarelamento dos grânulos no transporte, armazenamento e aplicação provoca a desuniformidade das partículas, que gera a segregação, além de aumentar a higroscopicidade para partículas em tamanho mais reduzido.

---

## 10.2.2. Características de Natureza Química

### a) Número de Nutrientes

O mais comum na prática da adubação é a necessidade de se aplicar vários nutrientes, o que resulta na produção de fertilizantes contendo cada vez mais nutrientes. Assim, desde que necessário, tem-se que dar preferência a fertilizantes mais completos, evitando-se misturas de fertilizantes simples na propriedade agrícola ou a realização de adubações separadas.

### b) Concentração dos Nutrientes

Tanto para fertilizantes simples quanto mistos, há uma acentuada variação na concentração dos nutrientes nos mesmos. Em função dos custos de transporte e de aplicação, foi ocorrendo, ao longo do tempo, a priorização de produção de fertilizantes mais concentrados em nutrientes.

Nos fertilizantes sólidos e líquidos, as concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio são expressas, respectivamente, em percentagem de nitrogênio,  $P_2O_5$  e de  $K_2O$ . O enxofre e micronutrientes também são expressos em percentagem do nutriente na forma elementar, enquanto para cálcio e magnésio, o mais comum é a expressão na forma de percentagem de  $CaO$  e  $MgO$ , respectivamente. Para os fertilizantes líquidos, em que se trabalha com volume, nos cálculos da quantidade de fertilizante a aplicar tem-se que considerar a densidade do mesmo, uma vez que a garantia é dada em peso do nutriente por peso do fertilizante.

No caso específico dos fertilizantes fosfatados, o teor de fósforo pode ser caracterizado pelo teor de  $P_2O_5$  total, teor de  $P_2O_5$  solúvel em solução de ácido cítrico a 2%, teor de  $P_2O_5$  solúvel em solução neutra de citrato de amônio (CNA) e teor de  $P_2O_5$  solúvel em água. Os teores de  $P_2O_5$  solúvel em água e em ácido cítrico a 2% representam o fósforo disponível a curto prazo.

### c) Índice de Acidez

Após reações no solo, os fertilizantes, em função da forma química dos nutrientes, podem acidificar, alcalinizar ou não alterar a acidez do solo. No Quadro 10.1 são apresentados os índices de acidez ou de alcalinidade dos principais fertilizantes, sendo que um índice negativo significa acidificação enquanto que positivo significa alcalinização.

Os fertilizantes nitrogenados são os que mais alteram a acidez do solo, com destaque para o sulfato de amônio. Por exemplo, a aplicação de 100 kg de sulfato de amônio gera acidez que requer 110 kg/ha de  $CaCO_3$  puro para ser neutralizada (índice de acidez = -110). O técnico necessita considerar isto na avaliação da eficiência técnica e econômica da adubação.

---



**Quadro 10.1. Equivalentes de acidez ou de alcalinidade dos principais fertilizantes minerais simples.**

Fertilizante	Equivalente $\text{CaCO}_3^*$ (kg $\text{CaCO}_3$ puro/100 kg do fertilizante)
Cloreto de amônio	-140
Sulfato de amônio	-110
Amônia anidra	-147
Uréia	-84
Nitrato de amônio	-62
Nitrocálcio	-28
Nitrato de cálcio	+20
Nitrato de sódio	+29
Nitrato de potássio	+26
Superfosfato simples	0
Superfosfato triplo	0
Fosfato monoamônico	-65
Fosfato diamônico	-75
Termofosfato	+50
Cloreto de potássio	0
Sulfato de potássio	0
Sulfato de cálcio	0

\* Sinal (-) indica produção de acidez no solo e sinal (+) indica reação alcalina.

### 10.2.3. Características de Natureza Físico-Química

#### a) Solubilidade

Para os fertilizantes minerais a solubilidade em água é uma importante característica, pois, para ocorrer a absorção dos nutrientes, a reação inicial no solo envolve a dissolução ou hidrólise na solução do solo.

A solubilidade em água assume especial importância para adubação foliar e em fertirrigação. O Quadro 10.2 apresenta a solubilidade dos fertilizantes mais usados em fertirrigação. Logicamente, pela baixa solubilidade, fertilizantes tais como superfosfato simples, sulfato de cálcio e fritas com micronutrientes são inapropriados para a fertirrigação. Dentre esses, apenas a título de exemplificação e de comparação com fertilizantes apresentados no Quadro 10.2, cita-se o sulfato de cálcio com solubilidade de 2,5 kg/m<sup>3</sup> água.

**Quadro 10.2. Solubilidade em água de fertilizantes comumente usados em fertirrigação, considerando a temperatura da solução em torno de 20 °C.**

Fertilizante	Kg/L	Fertilizante	Kg/L
Nitrato de amônio	0,95	Cloreto de potássio	0,27
Monoamônio fosfato	0,18	Sulfato de potássio	0,09
Diamônio fosfato	0,34	Superfosfato simples	0,02
Sulfato de amônio	0,57	Sulfato de cobre	0,18
Nitrato de cálcio	0,82	Sulfato ferroso	0,23
Nitrato de potássio	0,26	Sulfato de manganês	0,84
Nitrato de sódio	0,58	Sulfato de zinco	0,60
Uréia	0,62	Sulfato de magnésio	0,57
Ácido fosfórico	5,48		

**b) Índice Salino**

Índice salino ou salinidade de um fertilizante refere-se à sua capacidade de aumentar a pressão osmótica da solução solo. Se a pressão osmótica da solução do solo torna-se muito elevada, superior à da célula vegetal, tem-se o caminhamento da água da célula para a solução do solo, com a conseqüente morte de sementes ou da planta. As sementes e as plantas na fase inicial de crescimento são as que mais sentem os efeitos da salinidade. Daí a razão de todo o cuidado que se deve tomar na aplicação de fertilizantes de alto índice salino, como por exemplo o cloreto de potássio (Quadro 10.3), notadamente em adubação de plantio no sulco ou em cova.

**Quadro 10.3. Índice salino de alguns fertilizantes simples, em valor relativo ao nitrato de sódio, ao qual é atribuído um valor padrão de 100.**

Fertilizante	Índice salino	Fertilizante	Índice salino
Nitrato de sódio	100	Fosfato monoamônico	30
Nitrato de amônio	105	Fosfato diamônico	34
Sulfato de amônio	69	Superfosfato simples	8
Nitrocálcio	61	Superfosfato triplo	10
Uréia	75	Cloreto de potássio	116
Amônia anidra	47	Sulfato de potássio	46

O efeito salino de um dado fertilizante aplicado ao solo depende da textura, teor de matéria orgânica, teor de umidade, distância de aplicação do fertilizante em relação à semente ou planta e da sensibilidade da espécie vegetal.

Os efeitos da salinidade são mais drásticos em solos arenosos e com baixo teor de matéria orgânica, com menor teor de água no solo, maior proximidade do fertilizante em relação às sementes ou raízes, em plantas na fase inicial de crescimento e para as espécies vegetais mais sensíveis (Quadro 10.4).

**Quadro 10.4. Tolerância relativa de algumas espécies vegetais à salinidade.**

Tolerante (0,8-1,2 S/m)	Moderadamente tolerante (0,6-0,8 S/m)	Moderadamente sensível (0,4-0,6 S/m)	Sensível (0-0,4 S/m)
Algodão	Aveia	Alfafa	Abacaxi
Beterraba	Brócolos	Alface	Cebola
Gramma bermuda	Cevada	Amendoim	Cenoura
	Centeio	Arroz	Feijão
	Soja	Batata	Laranja
	Sorgo	Couve-flor	Maçã
	Trigo	Milho	Morango
		Repolho	Pêssego
		Tomate	Rosa

### c) Higroscopicidade

Refere-se a tendência que os fertilizantes apresentam de absorver água do ar atmosférico. A higroscopicidade é dada pelo máximo de umidade relativa do ar ou umidade relativa crítica (Quadro 10.5), acima da qual o fertilizante começa a absorver água.

**Quadro 10.5. Umidade relativa crítica do ar a 30 °C, acima da qual o fertilizante absorve água.**

Fertilizante	Higroscopicidade (%)	Fertilizante	Higroscopicidade (%)
Nitrato de amônio	59,4	Fosfato monoamônico	91,6
Nitrato de sódio	72,3	Fosfato diamônico	32,9
Nitrato de cálcio	46,7	Nitrato de potássio	90,5
Uréia	75,2	Sulfato de potássio	96,3
Sulfato de amônio	79,2	Cloreto de potássio	84,0
Nitrocálcio	60,0	Superfosfato simples	85,0
Superfosfato triplo	93,7		

Quanto mais higroscópico o fertilizante maior é a dificuldade de manuseio e aplicação, além do fenômeno de absorção e posterior perda de água ser o principal responsável pelo empedramento dos fertilizantes. Após absorção de água pelo fertilizante, quando diminui a umidade relativa do ar ou aumenta a temperatura, ocorre a recristalização do fertilizante dissolvido, o que representa o empedramento. A granulação do fertilizante, o revestimento dos grânulos com produto de menor higroscopicidade e armazenagem com menor empilhamento são fatores que contribuem para um menor empedramento de fertilizantes muito higroscópicos, tais como nitrato de cálcio, nitrato de amônio e nitrocálcio.

### **10.3. CARACTERÍSTICAS DOS FERTILIZANTES ORGÂNICOS**

A exploração agrícola ligada tanto a produção vegetal quanto a produção animal resulta na geração de vários resíduos orgânicos, os quais contêm, em diferentes proporções, todos os nutrientes de plantas. Ademais, na agroindústria também são produzidos diversos resíduos orgânicos e, mais recentemente, resíduos urbanos – lixo e esgoto tratados – também começam a receber atenção como fonte de nutrientes às plantas.

O uso de fertilizantes orgânicos precisa ser intensificado, pois representa uma série de vantagens para o solo, do ponto de vista químico, físico e biológico, além de permitir um uso mais eficiente de resíduos com potencial de contaminação de águas e, também, por possibilitar uma maior economia de recursos minerais naturais não-renováveis e de ocorrência limitada. Infelizmente, os resíduos orgânicos produzidos ainda não são eficientemente utilizados pela maioria dos agricultores.

Na definição do fertilizante a ser aplicado, uma situação possível diz respeito à escolha entre o uso de fertilizante mineral ou fertilizante orgânico. Neste sentido, uma vez já presente na propriedade rural – resíduo vegetal ou animal – o fertilizante orgânico tem de ter seu uso priorizado, em detrimento da aquisição de fertilizante mineral na cidade, pelo grande número de vantagens do fertilizante orgânico.

O uso de qualquer fertilizante orgânico – resíduos orgânicos de origem vegetal, animal, agroindustrial ou urbana – constitui-se na chamada adubação orgânica. Dada a importância da matéria orgânica para o solo – matéria orgânica é sinônimo de fertilidade – a adubação orgânica extrapola os limites da adubação, tornando-se, adicionalmente, uma importante prática de uso sustentado do solo e de preservação ambiental.

#### **10.3.1. Efeito Condicionador do Solo**

Além de ser uma fonte completa de nutrientes para as plantas, os fertilizantes orgânicos fornecem matéria orgânica ao solo, que, notadamente para solos mais arenosos ou com argila de baixa atividade, representa melhoria em atributos químicos, físicos e biológicos do solo. Isto é, exercem um efeito condicionador de solo. Neste sentido, dentre as vantagens da adubação orgânica, em relação à adubação mineral, destacam-se:

---

- Aumento da CTC do solo;
- Aumento do poder tampão do solo;
- Suprimento de substâncias de crescimento;
- Aumento no teor de CO<sub>2</sub> no solo, o que pode promover acidificação de solos alcalinos;
- Aumento no teor de CO<sub>2</sub> na parte aérea em plantios mais adensados com restrição de circulação de ar, promovendo, portanto, aumento na fotossíntese;
- Aumento na disponibilidade de micronutrientes, não apenas por ser uma fonte, mas, principalmente, pela complexação ou quelação dos micronutrientes catiônicos;
- Redução na atividade de alumínio em solução, através da complexação do mesmo em ligações fortes com grupamentos carboxílicos e fenólicos;
- Substituição parcial do papel do calcário, por ser fonte de cálcio e de magnésio e por reduzir a toxidez de alumínio;
- Aumento na disponibilidade do fósforo, não apenas por ser fonte, mas, também, por reduzir a precipitação com alumínio e ferro, através da mencionada complexação;
- Melhoria na estruturação do solo, promovendo melhor aeração e crescimento radicular;
- Maior proteção superficial do solo contra encrostamento;
- Aumento da capacidade de retenção de água;
- Maior estabilização da temperatura do solo;
- Aumento da atividade microbiana.

### 10.3.2. Forma dos Nutrientes

Uma característica muito particular dos fertilizantes orgânicos relaciona-se ao fato de que os nutrientes, exceto o potássio, encontram-se predominantemente na forma orgânica. Assim sendo, para serem absorvidos pelas plantas há necessidade da transformação para a forma mineral através do processo de decomposição da matéria orgânica ou de mineralização. Com isto, ocorre uma lenta liberação dos nutrientes para a solução do solo.

A liberação dos nutrientes em doses homeopáticas para a solução do solo, em acordo com a lenta absorção pelas plantas, resulta em vantagens adicionais da adubação orgânica, em relação à adubação mineral, quais sejam:

- Menor potencial de salinidade às sementes, plântulas e microrganismos;
-

- Menor potencial de perdas dos nutrientes por lixiviação;
- Possibilidade de realização de uma única adubação, ao invés de ter que fazer parcelamentos.

Com relação à necessidade de transformação da forma orgânica para a forma mineral, nos cálculos em adubação orgânica tem-se que considerar os Índices de Conversão (Quadro 10.6). Os índices de conversão representam o percentual médio de transformação da quantidade total do nutriente da forma orgânica para a forma mineral.

**Quadro 10.6. Índices de conversão dos nutrientes aplicados na forma orgânica para a forma mineral, em cultivos sucessivos, considerando a incorporação de fertilizantes orgânicos no solo.**

Nutrientes	Índices de conversão*		
	1º cultivo	2º cultivo	3º cultivo
	.....%.....		
N	40	30	10
P	50	20	10
K	100	-	-
Ca	50	20	10
Mg	50	20	10
S	50	20	10

\* Tempo de cultivo de 100 a 150 dias, correspondente a um cultivo de espécie anual ou ao período de máxima exigência de lavouras perenes.

### 10.3.3. Número de Nutrientes

O fertilizante orgânico apresenta todos os 16 nutrientes de plantas. Ou, de outra forma, considerando o papel do solo no suprimento de nutrientes às plantas, a aplicação de fertilizantes orgânicos resulta no aumento da disponibilidade de todos os 13 nutrientes fornecidos pelo solo.

O fato de ser um fertilizante completo resulta em mais uma importante vantagem da adubação orgânica, em relação à adubação mineral, que é a seguinte:

- A possibilidade de desrespeito à “lei do mínimo” é muito menor.

### 10.3.4. Concentração dos Nutrientes

Os fertilizantes orgânicos devem, sempre que possível, ser analisados antes da aplicação ao solo, pois tanto o teor de umidade de fertilizantes sólidos quanto o teor de nutrientes nos mesmos e a concentração em fertilizantes líquidos variam muito. Para os resíduos de origem vegetal a concentração de nutrientes irá depender da espécie de

planta, da idade e da fertilidade do solo onde cresceu. Por sua vez, nos resíduos animais varia com a espécie animal, com o tipo de criação, com a alimentação utilizada, com o processo de coleta e com as condições de armazenagem.

Além do teor de água e teores totais dos nutrientes, os fertilizantes orgânicos são também caracterizados pela relação C/N, dada à importância da mesma na definição da mineralização líquida.

O Quadro 10.7 apresenta a composição química, teor de água e relação C/N dos principais fertilizantes sólidos, enquanto que no Quadro 10.8 são caracterizados os fertilizantes líquidos.

Da análise dos Quadros 10.7 e 10.8 conclui-se que o conteúdo de nutrientes nos fertilizantes orgânicos é muito baixo, notadamente quando comparados com fertilizantes minerais. Essa característica resulta em uma séria desvantagem da adubação orgânica, em relação à adubação mineral, que é a seguinte:

- As quantidades de fertilizantes orgânicos a serem aplicadas são muito elevadas, aumentando sobremaneira os custos de transporte e de aplicação. Isto faz com que o uso de fertilizantes orgânicos seja praticamente limitado ao local de sua produção.

**Quadro 10.7. Teor de matéria seca, de nutrientes e relação C/N de alguns fertilizantes orgânicos sólidos.**

Fertilizantes	Matéria seca	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	C/N
	.....%.....				
Casca de café	80-90	0,6-1,2	0,2-0,5	2,1-3,8	50-120
Gramíneas (capins)	85-95	0,8-1,3	0,2-0,5	0,4-0,7	40-80
Palhada de milho	80-95	0,4-0,6	0,2-0,4	0,9-1,7	60-120
Palhada de leguminosas	85-95	1,5-5,0	0,3-1,0	0,6-3,0	30-120
Bagaço de cana	70-90	0,8-2,0	0,1-0,3	0,5-1,6	200-800
Serragem de madeira	90-95	0,05	0,02	0,03	15-30
Esterco de bovinos	20-85	0,3-3,5	0,3-2,0	0,3-2,0	15-30
Esterco de equinos	40-80	0,3-2,0	0,4-2,5	0,3-2,0	15-30
Esterco de ovinos	40-80	0,3-4,0	0,6-2,1	0,3-3,0	10-20
Esterco de aves	20-80	0,3-5,0	0,2-4,0	0,3-4,0	15-25
Esterco de suínos	40-90	0,3-3,0	0,2-3,0	0,3-3,0	10-20
Tortas	65-95	0,8-2,0	0,5-2,0	0,3-1,0	30-50
Lixo urbano	60-90	0,3-1,3	0,2-1,5	0,2-1,5	-
Farinha de osso	85-95	1,0	18,0	-	-
Farinha de sangue	85-95	10,0	-	-	-

**Quadro 10.8. Concentração de nutrientes em fertilizantes orgânicos líquidos.**

Fertilizante	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
	.....kg/m <sup>3</sup> .....		
Chorume	1,0-6,0	2,0-5,0	1,0-3,0
Vinhaça	0,3-1,2	0,1-0,3	1,0-8,0

O uso de resíduos vegetais como fertilizantes orgânicos e como importante prática de preservação ou de aumento do teor de matéria orgânica do solo apresenta situações distintas quanto à época e forma de aplicação.

Com o enfoque puramente de adubação e visando a instalação de lavouras, os resíduos vegetais devem ser aplicados antes da semeadura, dada à necessidade de incorporação. A incorporação de fertilizantes orgânicos reduz as perdas de nitrogênio por volatilização e é de crucial importância na adubação com fósforo, pois esse nutriente é de baixíssima mobilidade no solo.

Os resíduos vegetais de baixa relação C/N, notadamente de leguminosas, podem ser incorporados no dia da semeadura ou o mais próximo dela. Por outro lado, resíduos com relação C/N mais elevada – acima de 30 – devem ser aplicados com, pelo menos, um mês de antecedência ao plantio, de forma a vencer a fase inicial de predomínio da imobilização sobre a mineralização.

## 10.4. PRINCIPAIS FERTILIZANTES ORGÂNICOS

### 10.4.1. Resíduos Vegetais

A adubação orgânica inicia-se pelo retorno de todo e qualquer resíduo vegetal para o solo e pela adoção de tecnologias de uso do solo que contribuam para a sustentabilidade dos resíduos e/ou da matéria orgânica resultante da sua decomposição.

Neste sentido, é muito importante a adoção de práticas conservacionistas, de sistemas de plantio que priorizem a criação de uma camada de palha protetora do solo, de rotação de culturas, e adoção da adubação verde.

O Quadro 10.9 mostra o efeito do preparo do solo e da rotação de cultura na produção de soja na Fazenda Progresso, Mato Grosso, segundo Seguy e Bouzinac (1995).



**Quadro 10.9. Efeito dos modos de preparo do solo e da rotação de culturas sobre a produtividade da soja (média de 6 anos).**

Preparo	Cultura anterior		
	Monocultura de soja	Arroz	Milho
	.....kg de soja/ha.....		
Grade pesada	1674	2562	2850
Aração + gradagem	2118	3090	3012
Plantio direto	1986	3042	3060

A rotação de culturas, entre outras vantagens, também pode ser muito importante para a reciclagem de nutrientes de camadas mais profundas para a camada superficial, considerando a rotação de espécies vegetais com sistemas radiculares mais profundos.

No Capítulo 2 foi enfatizada a importância de se conhecer o fator planta para o correto manejo da fertilidade do solo. Assim, para o milho, tem-se que para uma produtividade de cerca de 6000 kg/ha, exceto para o nitrogênio e fósforo, a maior quantidade de nutrientes retornaria para o solo com o retorno da palhada (Quadro 10.10). Essa é a razão da importância de se considerar a quantidade de nutrientes reciclada ao solo via palhada, quando da definição da quantidade de nutrientes a aplicar.

**Quadro 10.10. Quantidades aproximadas de nutrientes extraídas pelo milho para uma produtividade de cerca de 6 t/ha, distribuídas entre grãos (exportação) e palhada (possível retorno ao solo).**

Parte da Planta	Nutrientes					
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	S
	.....kg.....					
Grãos	85	45	40	15	16	13
Palhada	65	15	90	45	44	17
Total	150	60	130	60	60	30

As palhadas com menos de 2% de N ou com relação C/N acima de 30 podem resultar no predomínio inicial da imobilização sobre a mineralização, com uma redução temporária na disponibilidade de nitrogênio mineral residual. Esse é o caso, por exemplo, das palhadas de arroz e de milho. Mas, a médio prazo, a disponibilidade volta ao valor original e, até mesmo, pode ser aumentada. De qualquer forma, no caso específico do milho e arroz, se o plantio da cultura subsequente ocorrer num prazo inferior a trinta dias, recomenda-se aumentar a quantidade de nitrogênio aplicada no plantio ou antecipar a adubação de cobertura, se a disponibilidade de nitrogênio mineral residual for baixa.

A adubação verde é um caso muito específico de adubação orgânica, em que leguminosas, principalmente, são cultivadas com o objetivo de incorporar toda a parte aérea ao solo. Como é empregada uma planta de baixa relação C/N, dado ao elevado teor de nitrogênio advindo da fixação simbiótica do N<sub>2</sub> do ar do solo, ocorre um acentuado aumento na disponibilidade de nutrientes, principalmente de nitrogênio, além de um aumento no teor de matéria orgânica do solo.

Um dos fatores que tem limitado a adoção da adubação verde relaciona-se à possibilidade do agricultor não suportar economicamente todo o investimento feito no cultivo da leguminosa sem o correspondente retorno em produto colhido. Todavia, em muitas situações, o cultivo de leguminosas para adubo verde, além de benefícios inerentes à rotação de culturas – controle de nematóides, doenças, pragas, ervas daninhas e erosão e reciclagem de nutrientes para a camada superficial – promove um significativo acréscimo de nutrientes no solo, notadamente de nitrogênio. O uso da adubação verde é de crucial importância em solos mais arenosos ou com argila de baixa atividade (Kage, 1984).

O Quadro 10.11 mostra o potencial de incorporação de palhada por algumas leguminosas, bem como a possível contribuição com nitrogênio para dois cultivos subsequentes.

**Quadro 10.11. Produção de massa verde de algumas leguminosas e nitrogênio suprido para dois cultivos subsequentes. O teor de matéria seca foi tomado como sendo de 20%.**

Leguminosa	Massa Verde (t/ha)	kg N/ha	
		1 <sup>o</sup> cultivo	2 <sup>o</sup> cultivo
<i>Crotalaria paulinia</i>	40,0	120	70
Lab-Lab	30,0	100	60
Mucuna preta	30,0	100	60
Guandu	25,0	80	50
Feijão de porco	20,0	70	40
<i>Crotalaria juncea</i>	15,0	50	30

#### 10.4.2. Resíduos Animais

De 75 a 85% dos elementos minerais e cerca de 40% do carbono orgânico ingeridos pelos animais são eliminados através das fezes e urina. A grande quantidade de resíduos associada com a presença de todos os nutrientes, torna quase obrigatório seu uso como fertilizante. Ademais, se escoado para cursos d'água apresenta elevado potencial poluente. Por exemplo, o esgoto de uma criação de suínos, em relação à demanda bioquímica de oxigênio, é cerca de 100 vezes mais poluente do que o esgoto urbano.

A recuperação dos nutrientes eliminados através dos dejetos depende do processo de coleta e de seu armazenamento. A maior parte do nitrogênio é excretada via urina, enquanto que a quase totalidade dos demais nutrientes estão nas fezes. Por isso, o chorume (urina + água de limpeza) deve ser regado sobre as fezes para incorporar o nitrogênio. Ou, fazer o emprego de cama – palhas, capins, serragens, cascas de cereais – em criação de animais confinados e/ou estabulados. A exigência básica é a de que o material utilizado como cama seja um bom absorvente de urina.

Os resíduos sólidos não podem ser armazenados a céu aberto, pois as perdas de nitrogênio e potássio podem chegar a 60% com a lavagem pela água da chuva. Para a manutenção de resíduos líquidos – chorume – em lagoas, a perda de nitrogênio por desnitrificação pode chegar a 80%.

O manejo ideal de resíduos animais sólidos envolve a coleta diária nos estábulos e armazenamento com baixo teor de umidade em esterqueiras protegidas da chuva, de forma a permitir o processo de cura, com revolvimento periódico, durante cerca de 60 dias. O uso de gesso agrícola ou de superfosfato simples – 50% de gesso em peso – permite a redução de perdas de nitrogênio por volatilização, pela formação de sulfato de amônio.

Ademais, há enriquecimento do fertilizante orgânico em cálcio, enxofre e, com o supersimples, também em fósforo.

#### **10.4.3. Resíduos Agroindustriais**

Existe um grande número de indústrias, notadamente agroindústrias, que produzem resíduos orgânicos, com alto potencial de uso na adubação, ao invés de poluírem rios e lagos. As indústrias de óleos vegetais, sucos, doces, farinhas e álcool são alguns dos exemplos.

No caso das destilarias de álcool, cada litro de álcool produzido gera 12 litros de vinhaça ou vinhoto. Portanto, bilhões de litros de vinhaça são produzidos anualmente no Brasil. Em função de seus elevados teores de potássio, a vinhaça é usada como substituto de fertilizantes potássicos minerais.

#### **10.4.4. Resíduos Urbanos**

O processamento de resíduos urbanos, tanto do lixo quanto do esgoto, aumenta cada vez mais face à pressão exercida pelas agências de proteção ao meio ambiente.

Os resíduos urbanos são de origem humana ou industrial, sendo muito heterogêneos, de composição variável de uma cidade para outra ou de um dia para o outro.

O uso destes fertilizantes apresenta as vantagens normalmente atribuídas ao uso de fertilizantes orgânicos. Todavia, pela natureza do material, podem trazer problemas de toxidez ao meio ambiente e à saúde humana e animal. Isto porque, podem apresentar teores relativamente elevados de metais pesados, de compostos orgânicos com alto

---

poder poluente e havendo ainda a possibilidade de transmissão de doenças pela presença de bactérias, vírus e parasitas.

Os metais pesados Cu, Pb, Ni, Cd e Zn em excesso são fitotóxicos e, se acumulados nas plantas, podem trazer problemas ao homem e aos animais. Por isso, os resíduos urbanos devem ser usados, preferencialmente, em solos com pH acima de 6,5, condição essa que resulta na precipitação dos metais pesados. E, preferencialmente, devem ser usados para a produção vegetal sem consumo direto pelo homem e criações animais – gramados, jardins e silvicultura. Contudo, todas as evidências mostram que, a aplicação dentro de dosagens recomendadas e em solo com pH corrigido, os metais pesados, porventura presentes, não chegam até os grãos dos cereais.

Em diversos países, as agências de controle do meio ambiente não permitem o uso desses fertilizantes na produção de tuberosas, hortaliças, fumo, frutas e em pastagens e capineiras para bovino leiteiro.

---

## NITROGÊNIO NO SOLO, FERTILIZANTES E ADUBAÇÃO NITROGENADA

---

O nitrogênio destaca-se dos demais nutrientes por apresentar acentuado dinamismo no sistema solo e por ser, normalmente, o nutriente exigido em maior quantidade pelas culturas.

Esse nutriente apresenta uma dinâmica complexa, traduzida por grande mobilidade no solo e por diversas transformações em reações mediadas por microrganismos. Inclusive, além da movimentação em profundidade, principalmente na forma nítrica, o nitrogênio pode transformar-se para formas gasosas, resultando em perdas por volatilização.

Em função do seu elevado dinamismo, o nitrogênio, quando comparado com os demais nutrientes, é muito mais difícil de ser mantido no solo ao alcance das raízes. Portanto, dado ao seu baixo efeito residual e grande exigência pelas culturas, a adubação nitrogenada precisa ser feita de forma muito mais pesada e constante que a dos demais nutrientes.

Há muito, o consumo mundial de fertilizantes nitrogenados supera o consumo de fertilizantes com qualquer outro nutriente. No Brasil, à medida que a agricultura se intensifica, espera-se uma atenção cada vez maior para o correto manejo da adubação nitrogenada.

### 11.1. CICLO E FORMAS DO NITROGÊNIO NO SOLO

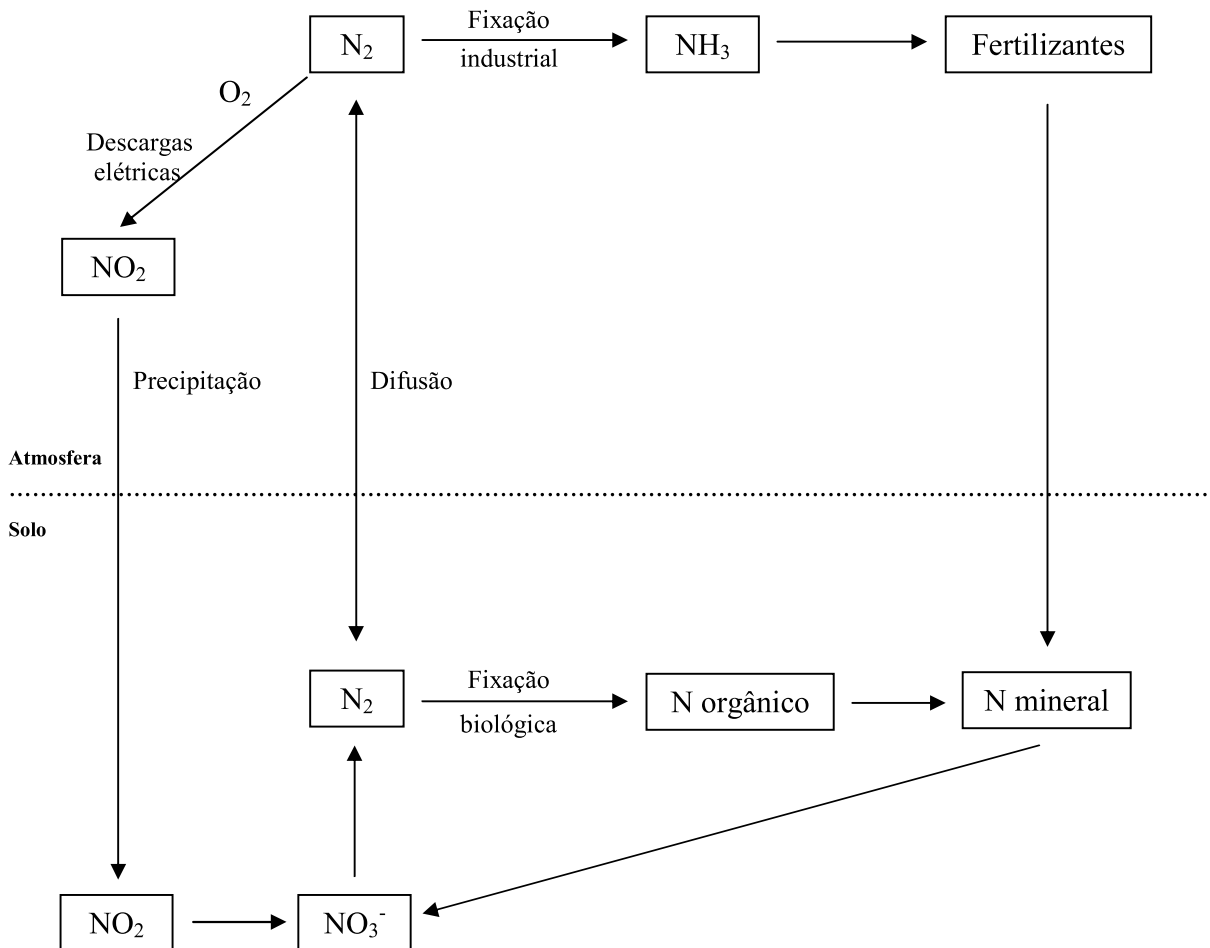
Ao contrário dos demais nutrientes, o nitrogênio praticamente não é fornecido ao solo pelas rochas de origem. Em última instância, a fonte de nitrogênio para as plantas é o gás  $N_2$ , que constitui 78% da atmosfera terrestre. Na sua forma elementar, entretanto, o nitrogênio não é absorvido pelas plantas. Assim sendo, essa fonte inesgotável de nitrogênio, para ser utilizada pelas plantas, precisa ser transformada para formas orgânicas ou inorgânicas, aproveitáveis pelas plantas. A Figura 11.1. apresenta parte do ciclo do nitrogênio no sistema solo-atmosfera, com ênfase para a incorporação do gás nitrogênio ao solo.

---

O gás nitrogênio pode sofrer oxidação na atmosfera, mediada por calor e descarga elétrica dos relâmpagos, formando  $\text{NO}_2^-$  (nitrito), que é carreado para o solo através das chuvas. No solo, o  $\text{NO}_2^-$  é oxidado para  $\text{NO}_3^-$  (nitrato), forma aproveitável pelas plantas. Na verdade, é preciso ressaltar que a maior contribuição de  $\text{NO}_2^-$  na atmosfera deve-se a emissão de gases de certas indústrias.

Uma vez presente na atmosfera, o  $\text{NO}_2^-$  pode ser uma fonte de nitrogênio para o solo, através de seu transporte pelas chuvas, que, normalmente, adicionam de 1 a 50 kg N/ha/ano, dependendo da localização. As quantidades adicionadas são maiores em áreas de intensa atividade industrial. O envolvimento do  $\text{NO}_2^-$  na chuva ácida já foi discutido no Capítulo 6.

O gás nitrogênio, através da difusão, apresenta-se em equilíbrio entre a atmosfera e o ar do solo. Uma vez presente no ar do solo, o gás nitrogênio pode ser fixado por microrganismos – fixação biológica (Figura 11.1).



**Figura 11.1. Incorporação do gás nitrogênio ao solo, como parte do ciclo do nitrogênio no sistema solo-atmosfera.**

O processo de fixação biológica do nitrogênio pode ser não-simbiótico ou simbiótico. No primeiro caso, a fixação é feita por microrganismos vivendo livres no solo, principalmente por certas bactérias e algas. A contribuição desse processo, após mineralização do nitrogênio orgânico formado, tem sido citada como sendo de 10 a 50 kg N/ha/ano. No segundo caso, a fixação é feita por microrganismos crescendo em simbiose com a planta hospedeira. De maior importância para a agricultura é a fixação por bactérias do gênero *Rhizobium* em simbiose com leguminosas. Além de suprir, em condições de adequada nodulação, cerca de 75% do nitrogênio requerido pela leguminosa, após a incorporação dos resíduos da mesma, a mineralização do nitrogênio orgânico produz elevada quantidade de nitrogênio mineral para não-leguminosas, aspecto importante num sistema de rotação de culturas. As quantidades médias de nitrogênio fixado, por exemplo, variam de 40 a 200 kg/ha/ano, respectivamente, para feijão e alfafa.

O gás  $N_2$  pode ainda ser incorporado ao solo através da fixação industrial, ou seja, através da produção industrial de  $NH_3$  (Figura 11.1). Os gases  $N_2$  e  $H_2$  reagem sob altas temperaturas e elevadas pressões, para formar  $NH_3$ , um intermediário chave da fabricação de diversos fertilizantes nitrogenados. Portanto, com a adubação mineral, pode-se incorporar ao solo qualquer uma das formas de nitrogênio mineral – amônio ou nitrato –, provenientes do  $N_2$ .

A análise detalhada da Figura 11.1 permite concluir que as principais formas de nitrogênio no solo são o gás inerte  $N_2$ , o nitrogênio mineral e o nitrogênio orgânico. O gás  $N_2$  do solo, conforme destacado, apenas tem importância para as plantas através do processo de fixação biológica.

Excluído o N gasoso, a quase totalidade (cerca de 98%) do nitrogênio presente no solo está na forma orgânica – aminoácidos, proteínas, aminoaçúcares, amidos, ácidos nucléicos e, algumas vezes, associado a polímeros de complexidade variada. Embora represente importante reservatório de nitrogênio – 2000 a 20000 kg N/ha na camada arável –, o nitrogênio orgânico não é diretamente disponível para as plantas. Para sua utilização pelas plantas, é preciso que seja transformado em formas inorgânicas ou minerais, através do processo da mineralização. Dado a importância do nitrogênio orgânico, o ciclo do nitrogênio precisa ser ampliado, enfocando-se a incorporação do mesmo no solo, que pode ser feita através da aplicação de resíduos vegetais ou animais ao solo, além da fixação biológica (Figura 11.1).

O nitrogênio mineral do solo é representado pelas formas iônicas amônio ( $NH_4^+$ ), nitrato ( $NO_3^-$ ) e, muito raramente, nitrito ( $NO_2^-$ ). As formas amoniacal e nítrica são prontamente absorvidas pelas plantas.

O ion amônio, proveniente da mineralização do nitrogênio orgânico ou da aplicação de fertilizantes ao solo (Figura 11.1), pode ser trocável ou não-trocável. A forma não trocável corresponde ao amônio que é “fixado” pelo solo, ou seja, àquele retido nos espaços internos de argila do tipo 2:1, notadamente vermiculita. Portanto, em solos mais intemperizados, o teor de amônio não-trocável é insignificante.

---

O íon nitrato, proveniente da oxidação do amônio ou do nitrito e da adubação (Figura 11.1), por ser negativamente carregado, tende a predominar na solução do solo, ficando, dessa forma muito mais suscetível à lixiviação. Por essa razão, a melhor forma de avaliar a disponibilidade de nitrogênio mineral no solo é fazer amostragem até maiores profundidades. O Quadro 11.1, além de mostrar aumento no teor de nitrato em profundidade, mostra o predomínio da forma amoniacal nas camadas superficiais. Em solos mais férteis, o predomínio é da forma nítrica (Alexander, 1965).

**Quadro 11.1. Teor de nitrogênio mineral no perfil de um Latossolo Vermelho-Amarelo do Município de Lavras-MG, determinado antes do plantio de cana-de-açúcar (Oliveira, 1992).**

Profundidade (cm)	N mineral	
	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	.....mg N/dm <sup>3</sup> solo.....	
0-10	12,5	5,0
10-20	13,4	5,5
20-40	12,0	6,9
40-60	11,3	12,4
60-80	9,7	21,8

## 11.2. FATORES QUE AFETAM O TEOR DE NITROGÊNIO NO SOLO

Considerando que a quase totalidade do nitrogênio do solo se faz presente na forma orgânica, tem-se que a incorporação de matéria orgânica ao solo bem como sua taxa de decomposição ou de mineralização controlam, em última instância, o teor de nitrogênio no solo.

Em resumo, a incorporação de matéria orgânica no solo e a mineralização tendem a aumentar e diminuir, respectivamente, o teor de nitrogênio total do solo. As formas minerais, notadamente a nítrica, uma vez formadas são muito suscetíveis a perdas.

Numa região com temperaturas médias anuais similares, o aumento da precipitação média anual tende a ser acompanhado de um aumento no teor de nitrogênio no solo. A principal explicação está relacionada com o maior crescimento vegetal e, conseqüentemente, com a maior incorporação de matéria orgânica ao solo.

A mineralização do nitrogênio orgânico praticamente inicia-se a partir de 0 °C, acelerando-se rapidamente com a elevação da temperatura até a faixa mais favorável de 40 a 60 °C. Assim sendo, o teor de nitrogênio no solo tende a diminuir com o aumento da temperatura média anual.



Normalmente, um aumento no teor de argila representa um aumento no teor de matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, no teor de nitrogênio. Em princípio, um solo mais argiloso favorece uma maior produção vegetal, principalmente por promover maior disponibilidade de nutrientes e maior retenção de umidade no solo. Ademais, a formação de complexos organo-minerais com as argilas tendem a proteger o nitrogênio orgânico da ação de microrganismos mineralizadores.

Em geral, solos sob vegetação de gramínea apresentam maior teor de matéria orgânica do que solos sob vegetação de floresta. O tipo de sistema radicular das gramíneas associado com contínua decomposição de restos culturais favorecem uma maior incorporação de matéria orgânica nos solos.

Com o cultivo ocorre, em geral, um abaixamento do teor de matéria orgânica, muito rápido nos primeiros anos de cultivo e, com o passar do tempo, cada vez menor, ou seja, um decréscimo do tipo exponencial. Assim sendo, as respostas às adubações nitrogenadas são, via de regra, muito baixas ou nulas em solos recém-desbravados. A redução no teor de nitrogênio com o cultivo se deve ao fato de que as queimadas e as constantes arações e gradagens favorecem a oxidação da matéria orgânica. Stevenson (1982) relata perdas de cerca de 25% de nitrogênio nos primeiros 20 anos de cultivo de solos de região temperada. No caso de regiões tropicais úmidas, as perdas podem até ser mais intensas, apesar de não terem sido devidamente estudadas.

É importante destacar que o tipo de cultivo também afeta o teor de nitrogênio do solo. Paiva (1990) observou que o teor de matéria orgânica foi maior no sistema de plantio direto em relação ao plantio convencional, após oito anos de cultivo. A maior preservação do nitrogênio orgânico no solo foi atribuída ao menor contato dos resíduos vegetais com o solo, para o sistema sem revolvimento do solo.

### **11.3. TRANSFORMAÇÕES DO NITROGÊNIO NO SOLO**

#### **11.3.1. Mineralização**

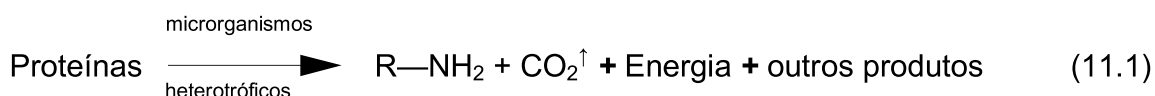
O processo pelo qual o nitrogênio orgânico (98 a 99% do N total presente no solo) é convertido em nitrogênio mineral ou inorgânico é denominado Mineralização. Essa transformação do nitrogênio ocorre na medida em que os microrganismos decompõem a matéria orgânica.

A mineralização do nitrogênio orgânico deve-se a ação de microrganismos heterotróficos, os quais requerem carbono orgânico como fonte de energia. Vários grupos de bactérias e fungos atuam no processo, cada um sendo responsável por uma ou mais de uma reação, dentre as várias que ocorrem na decomposição da matéria orgânica. As bactérias atuam melhor em solos mais alcalinos enquanto que os fungos prevalecem em solos ácidos.

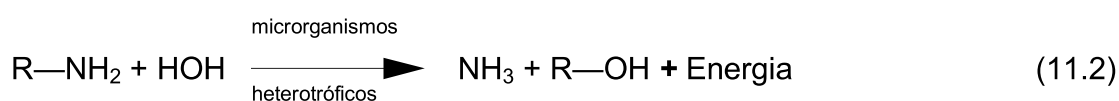
Um dos estágios da decomposição de compostos orgânicos nitrogenados é a hidrólise de proteínas com a liberação de aminas e aminoácidos. É considerada a

---

primeira etapa da mineralização, sendo denominada de Aminoação. A reação 11.1 representa a aminoação:



As aminas e aminoácidos liberados são utilizados por vários microrganismos heterotróficos, com a conseqüente liberação de amônia. Esta é considerada a segunda etapa da mineralização, denominada de Amonificação. A reação 11.2. representa a amonificação:



Em condições de pH abaixo de 7,0, praticamente toda amônia é convertida em íons amônio, conforme mostra a reação 11.3. O amônio é, portanto, a primeira forma de nitrogênio mineral formada, uma forma nitrogenada prontamente disponível para as plantas.



Uma população bem diversificada de bactérias, fungos e actinomicetos participa da reação de amonificação, incluindo tanto microrganismos aeróbicos quanto anaeróbicos.

### 11.3.2. Imobilização

É muito importante considerar que os microrganismos heterotróficos do solo que decompõem a matéria orgânica necessitam de nitrogênio e outros nutrientes prontamente disponíveis. Assim sendo, se o material orgânico em decomposição tem baixo teor de nitrogênio, em relação ao de carbono, que é sempre elevado, os microrganismos utilizam  $\text{N-NH}_4^+$  e  $\text{N-NO}_3^-$  presentes na solução do solo. O nitrogênio mineral é necessário para permitir rápido crescimento da população microbiana, que ocorre com a adição da fonte de carbono. A transformação do nitrogênio mineral em nitrogênio orgânico do protoplasma de microrganismos é denominada de Imobilização.

Portanto, a mineralização e imobilização são transformações concomitantes. Na verdade, na etapa de aminoação a imobilização predomina sobre a mineralização. No balanço geral, o predomínio de uma ou outra transformação depende da relação C/N do material orgânico em decomposição.

Em termos práticos, para determinação da capacidade de suprimento de nitrogênio ou de geração de um déficit deste nutriente, após incorporação ao solo de resíduos

orgânicos, a relação C/N de aproximadamente 20:1 tem sido considerada como a linha divisória entre a imobilização e a liberação líquida de nitrogênio.

Geralmente, quando resíduos orgânicos com relação C/N acima de 30:1 – palhada de arroz e milho, por exemplo – são adicionados ao solo, há predomínio da imobilização de nitrogênio durante a fase inicial de decomposição. O grau de deficiência de nitrogênio mineral dependerá do teor de nitrogênio mineral no solo e da quantidade de resíduo adicionada. Portanto, o plantio de determinada cultura logo após a incorporação de grande quantidade de palhada com elevada relação C/N pode resultar em séria deficiência de nitrogênio na fase inicial de crescimento da lavoura instalada. Se isto tiver de ser feito, por exemplo em condições de plantio intenso – cultivo irrigado –, é preciso elevar a quantidade de nitrogênio aplicada no plantio ou antecipar a adubação em cobertura.

Para relações C/N na faixa de 20:1 a 30:1 tende a não haver nem predomínio da imobilização nem liberação líquida de nitrogênio. Para resíduos orgânicos com relação C/N abaixo de 20:1 há uma liberação líquida de nitrogênio já no início da decomposição, como no caso da incorporação, por exemplo, de palhada de leguminosas ao solo.

Considerando que a maior variação é no teor de nitrogênio do resíduo orgânico, pois o teor de carbono é mais ou menos constante em torno de 40%, a simples análise do teor de nitrogênio dos resíduos pode dar uma boa idéia da magnitude da imobilização e mineralização. A linha divisória entre a imobilização e a liberação líquida de nitrogênio para o solo corresponde a um teor de nitrogênio no resíduo de cerca de 2%.

A Figura 11.2 mostra o que acontece na decomposição de resíduos de elevada relação C/N. Durante o estágio inicial da decomposição do material orgânico fresco há um rápido aumento na população de microrganismos heterotróficos, acompanhado pela evolução de grande quantidade de gás carbônico. Como a relação C/N é inicialmente alta, há uma imobilização líquida de nitrogênio, com o teor de nitrogênio mineral do solo podendo ser reduzido a zero. Com o prosseguimento da decomposição, a relação C/N do resíduo vai diminuindo e o suprimento de energia – carbono orgânico – também vai diminuindo. Grande parte da população microbiana morre devido a tal redução no suprimento de alimento, o que, em última instância, resulta na estabilização da relação C/N em torno de 10:1, típica de resíduo humificado. O teor de nitrogênio do húmus é de cerca de 5 a 5,5 % e o de carbono de 50 a 58 %, dando uma relação C/N de 9 a 12. Ainda, com a diminuição da relação abaixo de 20:1, até estabilizar em cerca de 10:1, há liberação de nitrogênio mineral para o solo. Como o resíduo orgânico tinha relação C/N muito alta, o teor de nitrogênio mineral pode ir a zero e voltar a aumentar nessa fase final da decomposição. O resultado disto é que o teor de nitrogênio mineral final tende a ser menor que o teor inicial.

O tempo requerido entre a imobilização líquida e a subsequente liberação de nitrogênio mineral depende da quantidade de resíduo incorporada, da relação C/N e da resistência do resíduo ao ataque microbiano. Tal ataque, por sua vez, depende do teor de ligninas, da disponibilidade de nitrogênio mineral inicial e de fatores que afetam a

---

mineralização, principalmente temperatura e umidade do solo. Em geral, esse tempo varia de 3 a 8 semanas. É, portanto, o período crítico para a cultura subsequente. A mineralização da matéria orgânica do solo é o processo mais importante de suprimento natural de nitrogênio para as plantas.

A umidade ideal para a mineralização situa-se entre 50 a 75% da capacidade de retenção de água do solo. A decomposição da matéria orgânica continua mesmo sob anaerobiose, apesar de ser a uma menor taxa e de ser incompleta.

A mineralização praticamente inicia-se a partir de 0 °C, acelerando-se rapidamente com a elevação da temperatura até a faixa mais favorável de 40 a 60 °C.

É difícil estabelecer um valor ótimo de pH para a mineralização do nitrogênio devido à heterogeneidade dos organismos envolvidos nessa transformação, mas, em geral, ela é favorecida com o aumento do pH até a neutralidade. Brandão (1990) observou que a calagem acelera a mineralização do nitrogênio potencialmente mineralizável, aumentando a disponibilidade desse nutriente às plantas.

Em função dos fatores que afetam a mineralização, pode-se considerar, em termos práticos, que de 1 a 4% do nitrogênio orgânico é mineralizado no período normal de cultivo de culturas anuais. Portanto, para cada 1% de matéria orgânica no solo a sua capacidade natural de suprimento de nitrogênio varia de 10 a 40 kg N/ha/cultivo.

---

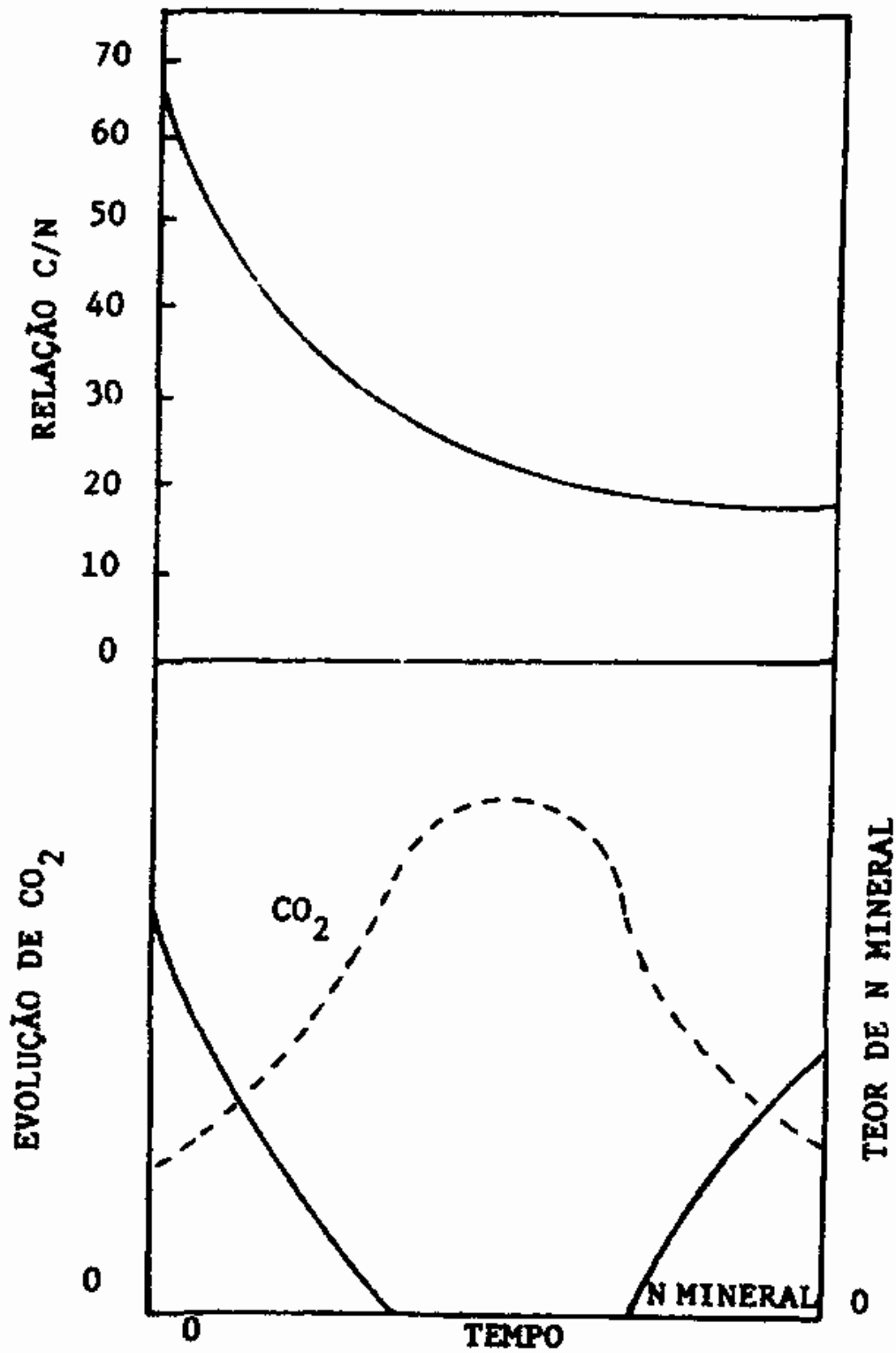


Figura 11.2. Alterações na disponibilidade de nitrogênio mineral no solo durante a decomposição de resíduos orgânicos com baixo teor nitrogênio.

O Quadro 11.2 mostra o potencial de mineralização em solos de várzea da região Sul de Minas Gerais, avaliada sob condições ideais de temperatura e umidade, em incubação por 10 semanas. Observa-se grande variação na capacidade natural de suprimento de nitrogênio, com a correlação entre matéria orgânica e nitrogênio mineralizado sendo altamente significativa.

**Quadro 11.2. Mineralização líquida do nitrogênio em solos de várzea dos polderes Bela Vista e Careazú, na Região de Pouso Alegre-MG (Vale, 1987).**

Solo	Teor de matéria orgânica (%)	N mineral acumulado (mg N/dm <sup>3</sup> solo)
Cambissolo	1,8	6,1
Glei Pouco Húmico	3,2	8,5
Cambissolo	5,8	13,0
Glei Pouco Húmico	12,0	40,4
Glei Húmico	12,0	35,0
Orgânico	20,0	90,3

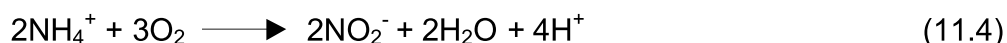
### 11.3.3. Nitrificação

Os íons  $\text{NH}_4^+$  produzidos pela mineralização ou adicionados ao solo através de adubações podem ter um dos seguintes destinos:

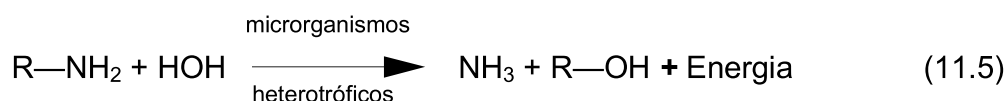
- Serem absorvidos diretamente pelas plantas;
- serem imobilizados por microrganismos, principalmente pelos heterotróficos na decomposição de resíduos orgânicos;
- serem fixados por argilas do tipo 2:1, em posições não disponíveis aos microrganismos;
- serem transformados em  $\text{NH}_3$ , sob elevada alcalinidade, e perdidos por volatilização;
- serem convertidos para a forma nítrica, numa oxidação biológica denominada Nitrificação.

A transformação do amônio para nitrato ocorre em duas etapas, sendo mediada por bactérias do gênero *Nitrosomonas* e *Nitrobacter* que são quimioautotróficas e obrigatoriamente aeróbicas.

As bactérias do gênero *Nitrosomonas* promovem a oxidação do amônio para nitrito, numa reação que destaca-se no sistema solo pela geração de acidez, de acordo com a reação 11.4.



O nitrito é formado como produto intermediário, pois é rapidamente oxidado a nitrato, pela ação das bactérias do gênero *Nitrobacter*, conforme mostra a reação 11.5.



Dado ao envolvimento de um grupo específico de bactérias, a nitrificação é muito afetada por fatores ambientais, tais como aeração, acidez, temperatura e umidade do solo, além da própria fonte de íons amônio.

As nitrobactérias, conforme destacado anteriormente, não produzem nitrato na ausência de oxigênio molecular. Portanto, a nitrificação é mais rápida em solos bem aerados e ausente sob anaerobiose. As nitrobactérias são muito sensíveis a umidade do solo, apresentando maiores atividades em torno da capacidade de campo.

A nitrificação ocorre na faixa de 5 a 40 °C, com maiores taxas entre 30 a 35 °C de temperatura do solo.

A nitrificação é bastante intensa em solos férteis aerados, podendo ocorrer a transformação de todo o amônio a nitrato em uma ou poucas semanas após a adubação com nitrogênio amoniacal.

Todavia, a acidez do solo exerce papel fundamental nessa transformação. Em geral, a taxa de nitrificação é muito baixa em solos ácidos com pH menor que 5,5. Silva et al. (1993) observaram que o valor de pH crítico para o processo da nitrificação em latossolos da região Sul de Minas Gerais situou-se em torno de 6,0, ou seja, abaixo desse valor a taxa de nitrificação é sensivelmente reduzida. Tal conclusão é de grande importância prática, pois, muitas das vezes, o pH do solo não é corrigido para este valor. Estes autores observaram também que o teor de cálcio, dentre os parâmetros da acidez do solo, se constituiu no melhor preditor da taxa de nitrificação dos latossolos estudados.

Considerando que a maior atividade das nitrobactérias ocorre em torno de pH 8,0 e que a hidrólise da uréia promove aumentos de pH localizados ao redor do grânulo desse fertilizante justamente para a faixa de pH entre 8,0 e 9,0, é importante considerar que a taxa de nitrificação pode ser também afetada pela fonte de amônio, no caso da aplicação de fertilizantes. Silva et al. (1993) observaram maior taxa de nitrificação para o amônio proveniente da uréia, quando comparada com o sulfato de amônio (Figura 11.3).

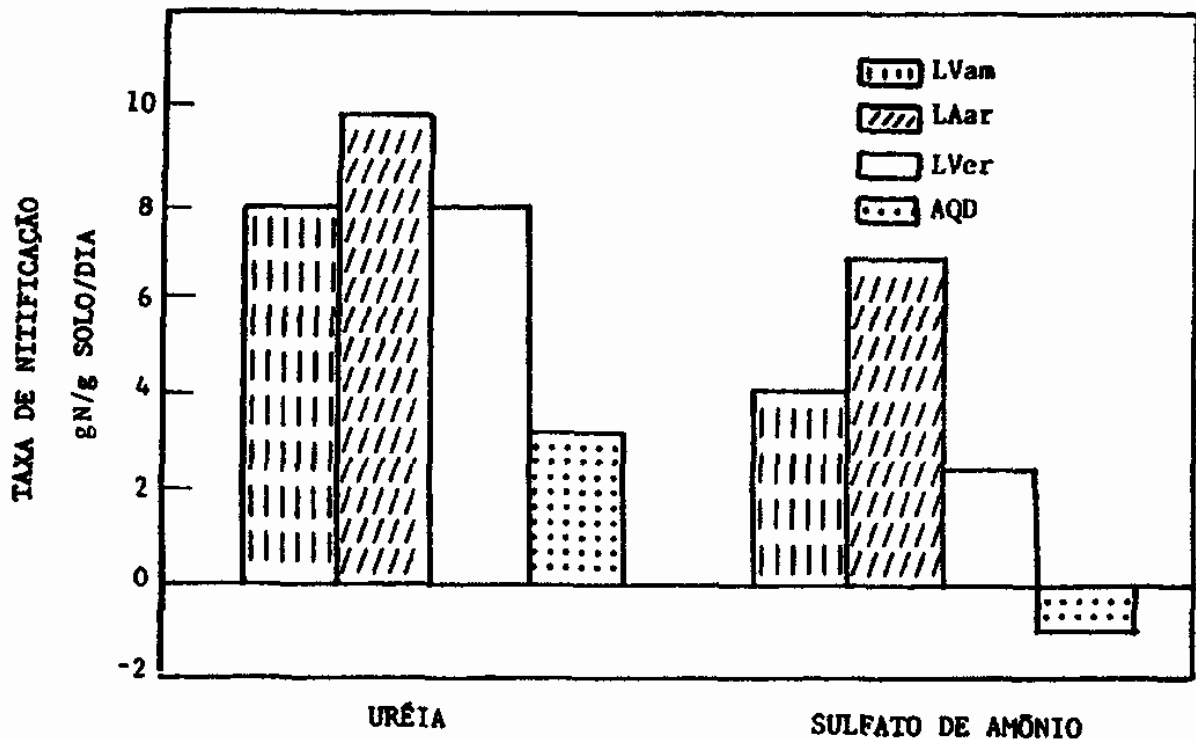


Figura 11.3. Efeito dos fertilizantes uréia e sulfato de amônio sobre a taxa de nitrificação em quatro solos do Sudoeste da Bahia, incubados durante quinze dias a 26 °C.

A transformação de amônio a nitrato no solo tem despertado grande interesse, tanto no aspecto da nutrição mineral das plantas, quanto por considerações de eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados ou ainda, por aspectos ecológicos e de saúde humana.

Numerosos estudos têm mostrado que as espécies de plantas variam na capacidade de absorver e/ou utilizar amônio e nitrato. O suprimento de apenas amônio é altamente indesejável para a grande maioria das espécies cultivadas, que tendem a preferir um suprimento em quantidades iguais das duas formas nitrogenadas (Guazelli, 1988).

Portanto, do ponto de vista nutricional a nitrificação de parte do amônio do solo é desejável. Neste sentido, em condições desfavoráveis à nitrificação, os fertilizantes contendo ambas formas de nitrogênio ou que promovem maior nitrificação podem apresentar maior eficiência. Os dados do Quadro 11.3 mostram que a produção de matéria seca do feijão é favorecida pelo uso de uréia ou de nitrato de amônio, quando comparados com sulfato de amônio, em cultivo sem a correção da acidez. Nessas condições, a produção com sulfato de amônio não difere daquela obtida sem a aplicação de nitrogênio. Com a correção da acidez e, conseqüentemente, com a aceleração da nitrificação, não houve diferença entre os fertilizantes.



**Quadro 11.3. Produção de matéria seca do feijoeiro, em função da aplicação de 150 mg N dm<sup>-3</sup> solo utilizando diferentes fontes/formas de nitrogênio (Silva et al., 1993)\*.**

Fonte de Nitrogênio	Forma de Nitrogênio	Produção de Matéria Seca (g/vaso)	
		Sem calagem	Com calagem
Uréia	Amídica	2,53 A**	3,38 A
Nitrato de amônio	Nítrica/Amoniacal	2,18 A	3,32 A
Sulfato de amônio	Amoniacal	1,75 B	3,18 AB
Sem nitrogênio	-	1,66 B	2,83 B

Cultivado em Latossolo Roxo por 25 dias. \*\* Médias seguidas pelas mesmas letras, dentro de cada coluna, não diferem ao nível de 5% pelo teste Tukey.

Por outro lado para reduzir as perdas de nitrogênio do sistema solo, minimizar o impacto ambiental da adubação nitrogenada, bem como reduzir os problemas à saúde humana, a nitrificação intensa é de todo indesejável. A forma nítrica, quando comparada com a forma amoniacal, é muito mais suscetível à perda por lixiviação ou por volatilização.

Sem dúvida, a lixiviação de nitrato, com contaminação de águas subterrâneas, é o principal problema ambiental com o uso de fertilizantes.

O consumo de água com mais de 50 mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L pode trazer sérios problemas de saúde, notadamente em crianças, através da doença metahemoglobinemia.

O uso excessivo de nitrogênio na produção vegetal, algumas vezes associado ao uso de grandes quantidades de fertilizantes orgânicos, resulta no acúmulo de nitrato em vegetais, principalmente em hortaliças – a alface é uma das espécies acumuladoras de nitrato. Assim sendo, tais vegetais podem representar outra importante fonte de nitrato para o consumo humano.

Uma outra preocupação muito grande com o consumo excessivo de nitrato diz respeito a reação do nitrito – formado após redução bacteriana do nitrato – com aminas formando nitrosaminas, que são substâncias tidas como carcinogênicas.

Como a nitrificação é realizada por um grupo muito específico de bactérias, é possível reduzir significativamente a formação de nitrato através do uso de inibidores químicos específicos. Em alguns países, a nitrapirina já tem sido usada por agricultores, sendo muito efetiva quando incorporada junto com fertilizante orgânico ou mineral.

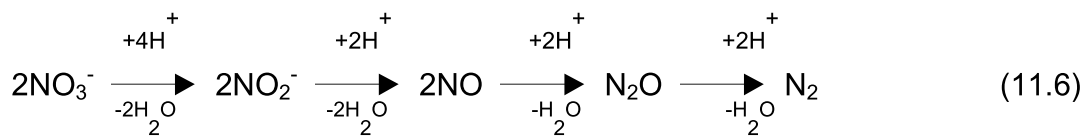
#### 11.3.4. Denitrificação

Os íons NO<sub>3</sub><sup>-</sup> produzidos pela nitrificação ou adicionados ao solo através de adubações podem ter um dos seguintes destinos:

- Serem absorvidos diretamente pelas plantas;
- serem imobilizados por microrganismos, principalmente pelos heterotróficos na decomposição de resíduos orgânicos;
- serem perdidos por lixiviação;
- serem perdidos por volatilização, através da redução microbiológica a  $N_2O$  e  $N_2$  denominada Denitrificação.

Com a inundação do solo, algumas bactérias aeróbicas facultativas passam a utilizar o nitrato, ao invés do oxigênio, como receptor de elétrons em seus processos metabólicos. Com o sucessivo abaixamento do potencial redox, formam-se os gases  $N_2O$  e  $N_2$ , que são perdidos por volatilização. Portanto, a denitrificação representa o processo final de retorno do  $N_2$  fixado ao solo para a atmosfera (Figura 11.1).

As reações de redução microbiológica do nitrato são esquematizadas a seguir:



O potencial para denitrificação é muito grande na maioria dos solos cultivados, cuja magnitude é influenciada por fatores ambientais tais como teor e tipo de matéria orgânica, umidade, temperatura e pH do solo.

A quantidade de resíduo orgânico facilmente decomponível no solo é fator crítico na determinação da taxa de denitrificação. Cerca de 1 ppm de carbono disponível é requerido para a produção de 1,17 ppm de nitrogênio na forma de  $N_2O$  ou de 0,99 ppm de nitrogênio na forma de  $N_2$ .

O teor de água do solo é outro fator crítico para a denitrificação, uma vez que essa transformação ocorre sob anaerobiose. A denitrificação não é um fenômeno de ocorrência exclusiva em solos inundados ou mal drenados. A redução do nitrato pode ocorrer também em solos bem drenados, com anaerobiose localizada. A compactação do solo intensifica a denitrificação. Apenas por volatilização de  $N_2O$  e  $N_2$ , as perdas de nitrogênio podem ser de 2 a 30% do nitrogênio adicionado via fertilizante, mesmo em cultivo de sequeiro.

A denitrificação assume grande importância em cultivos sob inundação, em que perdas de até 80% de nitrato de fertilizantes nitrogenados podem ocorrer. Logo abaixo da lâmina de água de inundação, com espessura de cerca de 1 cm, há uma camada de maior potencial redox, denominada camada oxidada ou camada aeróbica. Ela resulta da difusão do  $O_2$  dissolvido na lâmina de água ou do transporte de  $O_2$  da parte aérea para a rizosfera de plantas como o arroz. Abaixo da camada oxidada, a concentração de  $O_2$  diminui com a profundidade, resultando na camada reduzida ou camada anaeróbica. Portanto, a aplicação de forma nitrogenada nítrica há muito já foi descartada para o cultivo sob inundação. Todavia, mesmo usando fonte amoniacal para o cultivo do arroz sob

inundação, por exemplo, a forma de aplicação e o manejo da água são importantes para reduzir as perdas. O fertilizante nitrogenado deve ser aplicado abaixo da camada oxidada, preferencialmente em grânulos maiores. Se aplicado sem lâmina de água, a inundação tem de ser muito rápida para evitar a nitrificação do amônio.

Assim como no caso da nitrificação, as bactérias denitrificadoras são muito sensíveis à acidez do solo. As maiores taxas de denitrificação ocorrem na faixa de pH 8,0 a 8,5.

A denitrificação é também muito sensível à temperatura do solo, com a taxa aumentando grandemente com a elevação da temperatura de 2 a 30 °C.

Após visto o acentuado dinamismo do nitrogênio no solo, expresso por várias transformações, ressalta-se que são vários os destinos do nitrogênio aplicado ao solo, variando dentro de limites amplos, em função da própria espécie vegetal, do tipo de fertilizante e de condições climáticas e do solo. O Quadro 11.4 mostra variações típicas para o destino do nitrogênio aplicado a uma dada lavoura. O inadequado manejo da adubação nitrogenada e condições ambientais muito adversas podem, sem dúvida, reduzir a recuperação pela cultura e acentuar as perdas, para além dos limites destacados.

**Quadro 11.4. Destino do nitrogênio aplicado a uma determinada lavoura, em função de suas várias transformações.**

Destino	% do N aplicado
Absorvido pelas plantas (parte aérea)	40-60
Incorporado ao solo como nitrogênio orgânico	20-50
Adsorvido pelos colóides*	3-20
Perdido por volatilização	2-30
Perdido por lixiviação	2-10

\* Maiores valores apenas em solos com argila do tipo 2:1, notadamente vermiculita.

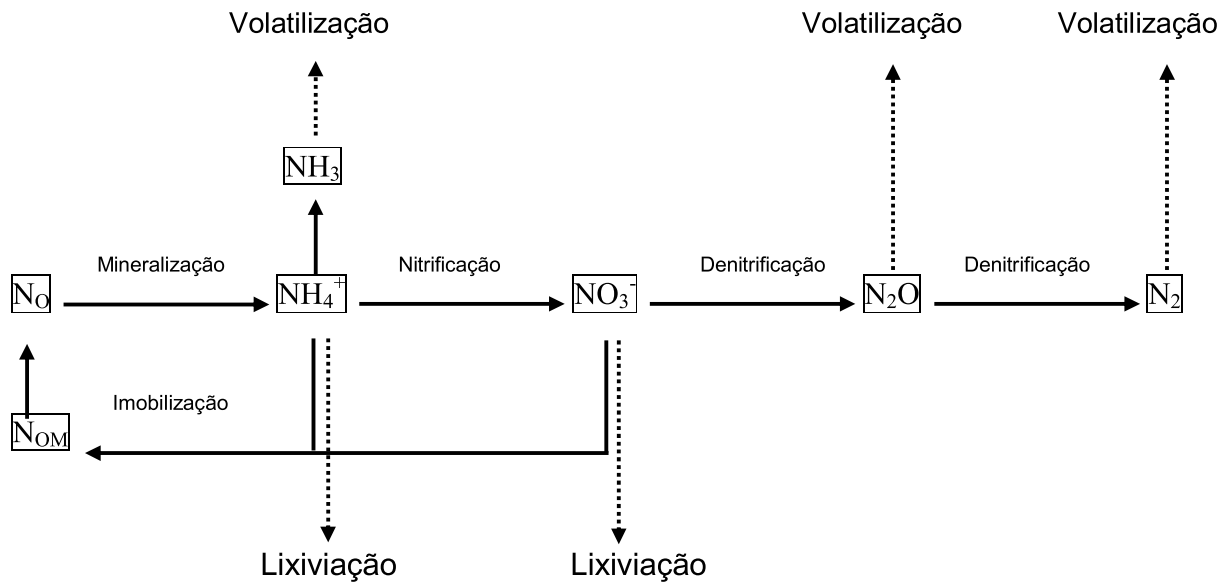
#### 11.4. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE NITROGÊNIO NO SOLO

O nitrogênio prontamente disponível às plantas é representado pelo nitrogênio mineral – amônio e nitrato –, o qual representa apenas de 1 a 2% do nitrogênio total do solo. Estas duas formas de nitrogênio mineral são produzidas a partir da mineralização do nitrogênio orgânico e são muito dinâmicas.

Assim sendo, a disponibilidade de nitrogênio depende dos fatores que afetam a produção e manutenção de amônio e nitrato no sistema solo. A Figura 11.4, mostra as principais transformações do nitrogênio no solo, com destaque para a produção de amônio e nitrato bem como para as perdas dessas formas nitrogenadas por imobilização (perda temporária), lixiviação e volatilização.

Em certas situações em que não se vislumbra condições para grandes perdas de

nitrogênio mineral, há grande potencial de utilização do teor de nitrogênio mineral como índice de disponibilidade de nitrogênio às plantas.



**Figura 11.4. Transformações do nitrogênio no solo, com ênfase para o nitrogênio orgânico – reservatório de nitrogênio disponível – e para as formas minerais prontamente disponíveis. ( $N_o$  = nitrogênio orgânico;  $N_{om}$  = nitrogênio orgânico em microrganismos).**

Como o nitrato tende a predominar nos solos mais férteis, normalmente, apenas essa forma nitrogenada é analisada. Em solos do Brasil, alguns dados tendem a mostrar a importância de se considerar também a forma amoniacal (Quadro 11.1). O requerimento básico para uso do nitrogênio mineral é que a análise seja feita até maiores profundidades, no mínimo até 80 cm. Em alguns estados americanos já é prática generalizada considerar o teor de nitrato residual como um índice de disponibilidade de nitrogênio para fins de recomendação de adubação nitrogenada. Em muitos casos, a amostragem é feita antes do plantio, com a profundidade variando de até 60 a 180 cm, sendo que a maioria dos estados adota a menor profundidade por motivo de limitação operacional no campo. Na Holanda, a amostragem é realizada a uma profundidade que varia de 60 a 100 cm, dependendo da profundidade do sistema radicular (Kolembrander et al., 1981).

Estudos mais recentes propõem uma amostragem de 0 a 30 cm, quando as plantas de milho tiverem de 15 a 30 cm de altura (Blackmer et al., 1989).

O emprego do teor de matéria orgânica, de determinação analítica muito mais simples que o teor de N total, como critério de avaliação da disponibilidade de nitrogênio às plantas baseia-se na premissa de que a mineralização ocorreria durante todo o cultivo, numa taxa de 1 a 4%. O sucesso no uso do teor de matéria orgânica depende de condições mais ou menos adequadas para maior atividade microbiana, principalmente em termos de temperatura, umidade e acidez do solo, conforme já discutido.

Em São Paulo, o teor de matéria orgânica foi utilizado como critério para recomendação de nitrogênio até 1983. Este critério foi abandonado, devido as baixas correlações entre o teor de matéria orgânica e a produção das culturas, atribuídas à variação na taxa de mineralização durante o ciclo das culturas e ao alto dinamismo das formas nitrogenadas minerais. Hoje em dia, no Brasil, o teor de matéria orgânica do solo é utilizado como critério básico para recomendação de adubação nitrogenada nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Vários extratores químicos tem sido pesquisados para extração do nitrogênio mineralizável do solo, envolvendo desde os de extração mais suave como água e  $\text{CaCl}_2$  0,01 M quanto os de extração mais intensa como ácidos, bases e agentes oxidantes.

O princípio envolvido no uso de extratores químicos é o da extração da fração da matéria orgânica mais suscetível à mineralização e que correlacione com o nitrogênio absorvido pelas plantas. Todavia, apesar de resultados promissores obtidos em alguns estudos, até hoje nenhum método químico de determinação do nitrogênio mineralizável foi adaptado para rotina.

O teor de nitrogênio mineral produzido pelo solo, sob incubação aeróbica ou anaeróbica, em condições ideais de atividade microbiana, com duração de uma a quatro semanas, apresenta altas correlações com o nitrogênio absorvido pelas plantas. Apesar de refletir melhor o processo natural de liberação de nitrogênio mineral para o solo, este método é demorado, portanto, inadequado para a rotina.

Em face das dificuldades encontradas na avaliação da disponibilidade de nitrogênio no solo, a análise química da planta tem sido usada como método de avaliação ou como ferramenta adicional no processo. Em países desenvolvidos a análise química da planta já avançou além da análise de um órgão – análise foliar –, e começa a ser feita ao nível de tecido e, até mesmo, molecular. Mais importante ainda, essas análises são feitas rapidamente no campo, através de equipamentos portáteis. Como exemplo, cita-se a análise do teor de  $\text{N-NO}_3^-$  no pecíolo de batata e a medição direta do teor de clorofila em milho. A lógica em usar medidores portáteis de clorofila é que a concentração de clorofila apresenta alta correlação com o teor de nitrogênio foliar.

### **11.5. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE NITROGÊNIO NA ADUBAÇÃO**

A correta definição da dose de nitrogênio a ser aplicada para uma dada cultura esbarra nas dificuldades existentes para avaliação da disponibilidade desse nutriente no solo.

Em alguns estados americanos já é prática generalizada considerar o teor de nitrato residual como um índice de disponibilidade de nitrogênio. Na avaliação da disponibilidade de nitrogênio para o milho no estado de Nebraska (Wese e Penas, 1979), o teor de nitrato é determinado através de amostragem até 60 cm de profundidade e, com o resultado obtido, estimando-se o teor residual até 180 cm (Quadro 11.5).

---

**Quadro 11.5. Sugestão de doses de nitrogênio para o milho em função do teor de nitrato no solo.**

N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> estimado (180 cm prof.)	Classe	Produtividade esperada (kg/ha)									
		3770	5020	6280	7530	8790	10040	11300	12560	13810	15070
kg/ha		kg N/ha.....									
28	Muito baixo	90	123	146	168	190	224	226	280	314	
56	Baixo	67	90	112	134	168	190	224	246	280	314
112	Médio	0	34	56	78	112	134	168	190	224	258
224	Alto	0	0	0	0	0	22	56	78	112	146
336	Excessivo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34

O emprego do teor de matéria orgânica, facilmente determinado no laboratório, como índice da disponibilidade de nitrogênio às plantas baseia-se na premissa de que a mineralização ocorre numa taxa de 1 a 4%, em um tempo de cultivo médio de 100 a 150 dias. Em condições mais ou menos adequadas para a atividade microbiana, com temperatura de 20 a 30 °C, pH na faixa de 5,5 a 6,0 e umidade no solo de 15 a 30%, pode-se considerar uma taxa de 2%. Com isto, para cada 1% de matéria orgânica no solo a sua capacidade natural de suprimento de nitrogênio seria de cerca de 20 kg N/ha/cultivo (100-150 dias). Logicamente, em condições ideais de mineralização, a capacidade chegaria a até 40 kg N/ha/cultivo.

O Quadro 11.6 mostra, a título de exemplo, a recomendação de adubação nitrogenada para o milho baseada no teor de matéria orgânica nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Comissão..., 1994).

**Quadro 11.6. Quantidades de nitrogênio para adubação do milho nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.**

Teores de matéria orgânica (%)	Expectativas de rendimento		
	< 3 t/ha	3-6 t/ha	> 6 t/ha
	kg N/ha.....		
≤ 2,5	80	130	160
2,6-3,5	70	110	140
3,6-4,5	60	90	120
4,6-5,5	50	80	100
> 5,5	≤ 40	≤ 65	≤ 80

Diante da dificuldade de se determinar a disponibilidade de nitrogênio no solo, para a definição da quantidade desse nutriente a aplicar toma-se da maior importância considerar o histórico de uso da área, notadamente para as condições prevalentes no cultivo anterior. Neste sentido, é importante considerar as rotações de culturas, manejo da palhada e tempo de pousio. Para o estado de São Paulo, Raij & Cantarella (1994) propuseram para o milho uma recomendação de adubação nitrogenada com base em três classes de resposta a nitrogênio, definidas pelo uso do solo (Quadro 11.7).

A incorporação de uma boa quantidade de palhada de leguminosa, especialmente plantada na entressafra para adubação verde, contribui com cerca de 100 kg N/ha para o cultivo de milho (Paiva, 1990). No mínimo, em condições normais, já está assegurada uma produtividade de 4000 kg/ha de milho, sem aplicação de nitrogênio. Por outro lado, em condição de cultivo intenso, a incorporação de palhada com alta relação C/N poderá implicar na necessidade de uma aplicação extra de 20 a 40 kg N/ha, ou, pelo menos, aumentar a quantidade de nitrogênio aplicado no plantio, ou ainda, optar-se por antecipar a cobertura nitrogenada.

**Quadro 11.7. Quantidades totais de nitrogênio para adubação do milho no estado de São Paulo.**

Produtividade esperada (t/ha)	Classe de resposta a nitrogênio*		
	1	2	3
	.....kg N/ha.....		
2-4	50	30	20
4-6	80	60	40
6-8	120	90	60
8-10	150	120	80
10-12	170	140	100

\* Classe 1 = alta resposta esperada: solos corrigidos, com muitos anos de plantio contínuo de milho ou outras gramíneas; primeiros anos de plantio direto.

Classe 2 = média resposta esperada: solos muito ácidos que serão corrigidos; ou com plantio anterior esporádico de leguminosas; solo em pousio por um ano.

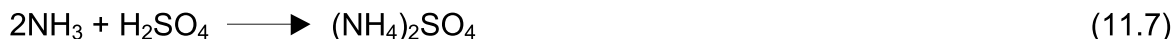
Classe 3 = baixa resposta esperada: solo em pousio por 2 ou mais anos, ou após pastagem; cultivo intenso de leguminosas ou plantio de adubos verdes antes do milho.

Ao que tudo indica, pode-se ter maior sucesso na definição da quantidade de nitrogênio a aplicar se for feita a combinação do histórico da área com um índice de disponibilidade de nitrogênio. Neste sentido, para o Brasil, o emprego do teor de matéria orgânica, combinado com o histórico da área, parece representar um avanço na recomendação de adubação nitrogenada.

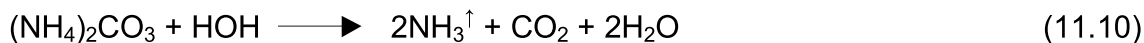
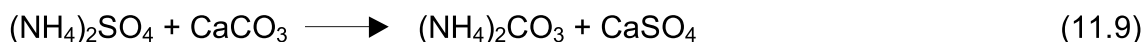
## 11.6. FERTILIZANTES NITROGENADOS MINERAIS

### 11.6.1. Sulfato de Amônio

O sulfato de amônio é um subproduto da indústria metalúrgica ou é produzido diretamente pela reação da amônia com ácido sulfúrico (Reação 11.7).



Ainda é um fertilizante muito usado no Brasil, com as vantagens da estabilidade química, baixa higroscopicidade e presença de 24% de enxofre. A sua grande desvantagem é o alto poder de acidificação. Todavia, para solos alcalinos ou que, indevidamente, receberam doses excessivas de calcário, o sulfato de amônio pode ser indicado para abaixar o pH. Entretanto, é preciso estar ciente de que a aplicação superficial de sulfato de amônio em solos com pH acima de 7,5 ou com excesso de calcário não reagido na superfície, pode resultar em acentuadas perdas de nitrogênio por volatilização de amônia (reações 11.8, 11.9 e 11.10).



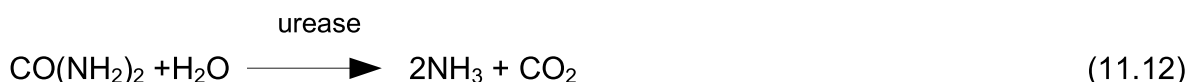
Outra desvantagem do sulfato de amônio diz respeito ao seu baixo teor de nitrogênio (N = 20%), o que aumenta muito o custo de transporte e, conseqüentemente, seu custo efetivo. Assim sendo, mundialmente, o sulfato de amônio tem perdido espaço para a uréia.

### 11.6.2. Uréia

A uréia foi o primeiro composto orgânico a ser sintetizado a partir de substâncias inorgânicas (Reação 11.11).



A uréia é um fertilizante muito singular, no sentido de que, apesar de ser composto orgânico, apresenta todas as características de um fertilizante mineral. Ainda, é o único fertilizante cuja hidrólise no solo é mediada por uma enzima – a urease – (Reação 11.12).





A enzima urease é abundante no sistema solo, estando presente em microrganismos, em resíduos de plantas e no próprio solo, por ser muito estável em associação com argilas e matéria orgânica.

Pelo visto, a uréia não deve ser aplicada e deixada na superfície do solo, notadamente em solos ricos em matéria orgânica ou com grande presença de resíduos vegetais. Portanto, não é indicada para adubação nitrogenada de cobertura em plantio direto. O mais correto é a incorporação desse fertilizante ou promover uma pequena lixiviação do mesmo pela irrigação. Em aplicação convencional sem incorporação, o ideal é sua aplicação em solo seco e contar com uma chuva de cerca de 2,5 mm nos próximos 3 a 6 dias (Tisdale et al., 1993).

A incorporação da uréia reduz as perdas de amônia por volatilização simplesmente por aumentar o caminho de difusão e, com isso, aumentando as chances de sua retenção na forma de amônio (Reação 11.13).



A granulação da uréia, ao reduzir seu contato com o solo – com a urease – promove menor taxa de hidrólise e, conseqüentemente, menores perdas por volatilização de amônia.

A uréia apresenta como principais vantagens o alto teor de nitrogênio (N = 45%), o que pode reduzir seu preço efetivo, a alta solubilidade, além do baixo poder de corrosão, o que a torna ideal para fertirrigação. Todavia, apresenta algumas desvantagens, tais como:

- a) presença apenas de nitrogênio;
- b) alto poder de acidificação;
- c) fitotoxidez a sementes e plântulas;
- d) possível presença de biureto, um contaminante altamente tóxico.

A aplicação de altas doses de nitrogênio no plantio, na forma de uréia, pode levar a fitotoxidez para sementes e plântulas pela formação de amônia, em condições favoráveis a uma alta taxa de hidrólise (Reação 11.12). Além da salinidade dos fertilizantes, no caso da uréia, a fitotoxidez da amônia torna a aplicação afastada da semente mais indicada ainda.

A concentração de biureto ( $\text{NH}_2\text{—CO—NH—CO—NH}_2$ ) na uréia é motivo de preocupação, devido a sua fitotoxidez. A legislação exige que a concentração de biureto seja menor que 1,5% para aplicação ao solo e menor que 0,3% para aplicação foliar. Citros e abacaxi são duas espécies muito sensíveis ao biureto, em pulverizações foliares. Ademais, uma alta concentração de biureto aumenta a fitotoxidez desse fertilizante às sementes e plântulas, além daquela devida à amônia.

---

### 11.6.3. Nitrato de Amônio

O nitrato de amônio é produzido pela reação da amônia com ácido nítrico. Apresenta cerca de 33% N, sendo a metade na forma nítrica e metade na forma amoniacal. Em solos com baixa taxa de nitrificação – solo com pH menor que 6,0 e solo arenoso com baixo teor de matéria orgânica – tende a se constituir em excelente fonte por apresentar iguais quantidades de amônio e nitrato, o que pode representar ganhos de até 25% na produção (Guazelli, 1988; Silva et al., 1995).

As principais desvantagens desse fertilizante são:

- a) alta higroscopicidade;
- b) alto índice salino;
- c) em contato com compostos carbônicos oxidáveis, tais como óleo diesel, forma uma mistura explosiva.

Para minimizar alguns dos problemas do nitrato de amônio, é feita a granulação do mesmo com certos produtos. No Brasil, o mais comum é uma mistura com rocha calcária, resultando o nitrocálcio que é um excelente fertilizante do ponto de vista químico, por apresentar de 20 a 25% N, com iguais percentagens de amônio e nitrato, cerca de 6% de CaO e 4% de MgO e por não acidificar o solo. Todavia, apresenta os mesmos problemas de higroscopicidade do nitrato de amônio.

### 11.6.4. Uran

O uran é uma solução nitrogenada obtida pela dissolução em água de uréia e nitrato de amônio, resultando em um fertilizante com 32% de nitrogênio. Trata-se de um caso especial de mistura de fertilizantes simples, pois resulta em fertilizante contendo apenas um nutriente.

Algumas das vantagens desse “fertilizante simples” são:

- a) Apresenta ambas as formas nitrogenadas – amônio e nitrato, cada uma com 9%;
- b) Por se tratar de fertilizante líquido, sua aplicação é facilitada e tende a ser mais uniforme que a de fertilizantes sólidos;
- c) Pode ser aplicado em adubação foliar e em fertirrigação;
- d) Pode ser misturado com muitos pesticidas;
- e) Pode ser usado para obtenção de formulados NPK fluidos.

Muitas usinas de álcool no Brasil que estão adotando a adubação fluida e não possuem hidratadores de amônia, usam o uran para complementar a adubação em áreas tratadas com vinhaça ou para produzir formulados fluidos NK ou NPK.

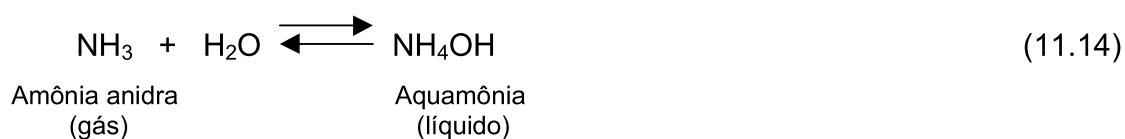
Conforme já destacado para os fertilizantes fluidos, o teor de nutriente também é expresso em peso/peso. Assim, como a densidade do Uran é de 1,326 g/cm<sup>3</sup>, tem-se 32 kg de N/100 kg ou 32 kg de N/75,4 litros.

---

### 11.6.5. Aquamônia

A grande vantagem da amônia anidra é a sua alta concentração de nitrogênio (N = 82%). Todavia, por ser um gás tóxico – volatiliza a temperaturas acima de 10 °C, necessita dos mais refinados cuidados no manuseio, armazenagem, transporte e na aplicação ao solo. Nos Estados Unidos é muito usada, com injeção no solo a 5- 10 cm de profundidade. Mas, no Brasil nunca foi usada como tal.

Mais recentemente, no Brasil passou-se a hidratar a amônia para utilizá-la como fertilizante. A aquamônia é a amônia anidra dissolvida em recipiente fechado contendo água (Reação 11.14).



Algumas usinas de álcool e açúcar adquirem a amônia anidra (82% N), que apresenta baixo preço efetivo, e, em hidratadores especiais na propriedade, fazem a hidratação da mesma, produzindo a aquamônia com 16 a 20% N. Com isso, a aquamônia ainda é o fertilizante líquido mais usado no Brasil, mesmo que ainda muito restrito a adubação da cana-de-açúcar.

### 11.6.6. Outros Fertilizantes Nitrogenados

De consumo bem mais reduzido, mas crescente no Brasil, tem-se os fertilizantes nitrogenados nítricos: nitrato de sódio (salitre do Chile), nitrato de potássio e nitrato de cálcio.

O salitre do Chile (16% N) foi o fertilizante nitrogenado mais usado no Brasil no final dos anos 50, sendo importando diretamente do Chile, onde é encontrado naturalmente em grandes jazidas. Além do índice salino, apresenta como desvantagem a presença de sódio, que é dispersante de argilas e, portanto, pode provocar perda da estruturação do solo.

O nitrato de potássio (13% de N e 44% de K<sub>2</sub>O) é largamente produzido no Chile, Israel e Estados Unidos, pela reação do HNO<sub>3</sub> com KCl. Dada à sua elevada solubilidade e presença de dois nutrientes muito exigidos pelas plantas, é mais utilizado em pulverização foliar e em fertirrigação para culturas de alto valor comercial, como por exemplo certas hortaliças, tomate, batata e citros. Também, é preferido no cultivo de fumo de alta qualidade, por não apresentar cloreto.

O nitrato de cálcio, contendo cerca de 15% de N e 26% de CaO, é produzido pela reação do HNO<sub>3</sub> com CaCO<sub>3</sub>. Apresenta como maior desvantagem a alta higroscopicidade. Dada à sua solubilidade e alta concentração de cálcio, é mais usado em adubação foliar ou fertirrigação de espécies exigentes em cálcio e de alto valor comercial, como por exemplo tomate e maçã.

### 11.6.7. Fertilizantes Mistos

Os fertilizantes mistos ou formulados, tanto na forma sólida quanto líquida, são caracterizados por três números, referentes às percentagens (peso/peso) de N total,  $P_2O_5$  solúvel em citrato neutro de amônio e  $K_2O$  solúvel em água. A exigência legal, praticamente a única, é a de que a soma dos nutrientes NPK deva ser, no mínimo, de 24%. A presença de outros nutrientes, tais como enxofre, dependendo do fertilizante simples utilizado, e micronutrientes, no caso de enriquecimento do formulado, é indicada pelo percentual apresentado no rótulo do produto.

Por exemplo, um formulado com 4% de N obtido através do uso de sulfato de amônio (N=20%; S=24%), como fonte nitrogenada, apresenta 18% de S. Por sua vez, o uso de superfosfato simples ( $P_2O_5=18%$ ; S=10%), para obtenção de um formulado com 14% de  $P_2O_5$ , implica na presença no mesmo de 7,8% de S. É muito importante o conhecimento da presença de “outros nutrientes”, além do NPK, nos formulados, bem como de seu teor, para um maior sucesso do manejo da fertilidade do solo.

Existe hoje no mercado um grande número de fertilizantes mistos sólidos, visando o atendimento de adubação de plantio, principalmente, e de adubação em cobertura com NK, e ainda, de adubações NPK para culturas perenes. O Quadro 11.7 apresenta alguns formulados para atendimento de determinadas relações de nutrientes comuns em recomendação de adubação, considerando o perfeito atendimento das necessidades. Assim, por exemplo, uma adubação de plantio com 15 kg N/ha, 90 kg  $P_2O_5$ /ha e 45 kg  $K_2O$ , cuja relação de nutrientes é de 1:6:3, é perfeitamente atendida, em termos de quantidade, com o uso do formulado 05-30-15, aplicando-se 300 kg/ha deste fertilizante. Todavia, em função da disponibilidade no mercado, essa adubação seria proximamente atendida, por exemplo, pela mesma quantidade do formulado 04-30-16, cuja relação de nutrientes é de 1:7,5:4. Muitas vezes, principalmente em função da disponibilidade, o fertilizante escolhido não apresenta exatamente a mesma relação de nutrientes da recomendação a ser atendida, o que não representa maiores problemas.

---

**Quadro 11.7. Fertilizantes mistos ou formulados para perfeito atendimento de adubações com diferentes relações de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O.**

Relação de N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e K <sub>2</sub> O	Formulado NPK	Relação de N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e K <sub>2</sub> O	Formulado NPK
011*	00-20-20	211	20-10-10
012	00-15-30	212	20-10-20
021	00-20-10	310	21-07-00
023	00-14-21	312	18-06-12
031	00-30-10	313	18-06-18
032	00-15-10	314	15-05-20
101	20-00-20	323	18-12-18
111	10-10-10	324	15-10-20
123	04-08-12	412	20-05-10
132	05-15-10	413	20-05-15
141	05-20-05	414	20-05-20
150	06-30-00	415	16-04-20
155	04-20-20	423	12-06-09

\* Refere-se à proporção de 0:1:1 de N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente, no formulado.

O aparecimento e domínio dos formulados no mercado se devem aos problemas existentes com o uso de fertilizantes simples para adubação com mais de um nutriente, situação muito comum no plantio e em adubações de cobertura em culturas perenes. Notadamente no cultivo de grandes áreas, são especificados a seguir os problemas relacionados com o uso de fertilizantes simples em adubação com mais de um nutriente, ou seja, em situações envolvendo a mistura, realizada pelo agricultor, de dois ou mais fertilizantes simples.

- Possível incompatibilidade entre fertilizantes;
- Diferença na granulometria entre fertilizantes, o que leva a obtenção de misturas muito heterogêneas, conseqüentemente sujeitas à segregação;
- Exigência de local apropriado para realização da mistura;
- Gasto com mão-de-obra;
- Tempo dispendido na realização da mistura, de forma a se obter uma mistura bem homogênea.

Logicamente, em grandes empreendimentos agrícolas, com a presença de misturadores na própria fazenda, pode ser vantajosa a realização de misturas pela possibilidade de escolha dos fertilizantes simples, enriquecimento com micronutrientes, preparo das mais diversas formulações para atendimento de recomendações de adubação para diferentes glebas e/ou diferentes culturas e pela possibilidade de obtenção de um produto final com menor custo.

---

## FÓSFORO NO SOLO, FERTILIZANTES E ADUBAÇÃO FOSFATADA

---

Dentre os macronutrientes, o fósforo é o exigido em menores quantidades pelas plantas. Todavia, trata-se do nutriente aplicado em maiores quantidades em adubação no Brasil.

A explicação para esse fato relaciona-se com a baixa disponibilidade de fósforo nos solos do Brasil e, também, com a forte tendência do fósforo aplicado ao solo de reagir com componentes do mesmo para formar compostos de baixa solubilidade – **fixação de fósforo**. Portanto, ao contrário dos demais nutrientes, a adubação com fósforo assume a particularidade de ter-se que aplicar uma quantidade várias vezes maior do que aquela exigida pelas plantas, pois, antes de mais nada, torna-se necessário satisfazer a exigência do solo, saturando os componentes responsáveis pela fixação do fósforo.

Sem dúvida, trata-se do nutriente que mais limita a produção vegetal no Brasil. E, a elevação de sua disponibilidade, de forma a vencer a barreira imposta pela “fome do solo” por este nutriente, é um dos grandes desafios no manejo da fertilidade do solo.

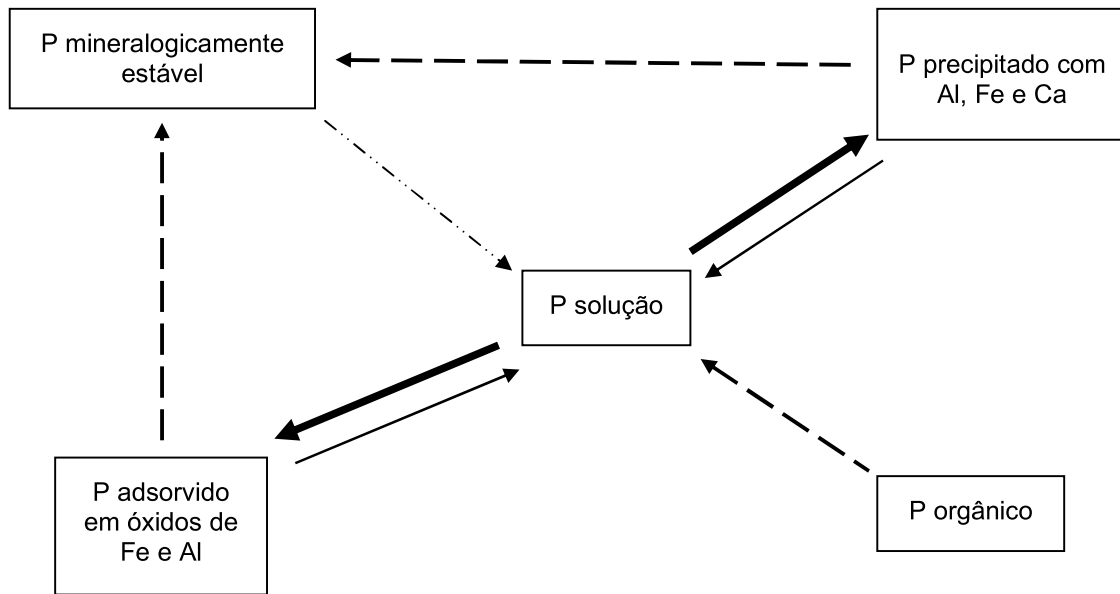
No geral, a fome do solo pelo fósforo será tanto maior quanto mais ácido for o solo. Portanto, quando necessária, a calagem é muito importante para aumentar a eficiência da adubação fosfatada.

### 12.1. FORMAS E DINÂMICA DO FÓSFORO NO SOLO

As várias formas de fósforo no solo são apresentadas simplificadaamente, na Figura 12.1 O teor de fósforo inorgânico nos solos é muito maior que o de fósforo orgânico, este último podendo representar de 20 a 70% do fósforo total na camada arável.

Os solos podem apresentar de 100 a 2500 kg/ha de fósforo total, na camada arável. Todavia, qualquer que seja a natureza do solo, a concentração de fósforo em solução é extremamente baixa, normalmente entre 0,1 e 1,0 kg/ha, dado a elevada tendência de remoção do fósforo da solução, tanto por precipitação quanto por adsorção (Figura 12.1) com compostos de Al, Fe e Ca.

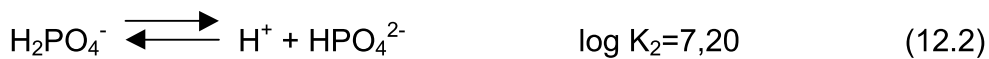
---



**Figura 12.1. Representação simplificada das formas de fósforo no solo e suas interações. As setas cheias dão uma idéia da intensidade das transformações, enquanto o tracejado representa uma transformação muito mais lenta. O pontilhado representa uma transformação que, em princípio, tende a não ocorrer.**

### 12.1.1. Fósforo na Solução

As formas de fósforo na solução do solo dependem diretamente da acidez da mesma, conforme mostram as reações de dissociação do  $H_3PO_4$ :



Considerando que a maioria dos solos apresenta pH na faixa de 4 a 9, as formas predominantes são  $H_2PO_4^-$  e  $HPO_4^{2-}$ , com a quantidade de cada uma dependendo do pH da solução (Figura 12.2). A pH igual a 7,20, as quantidades se equivalem. Abaixo deste valor de pH, condição existente na grande maioria dos solos cultivados,  $H_2PO_4^-$  é a forma predominante.

Conforme já discutido no Capítulo 3, a solução do solo representa a fonte imediata de nutrientes às plantas, ou seja, os nutrientes são absorvidos da solução do solo. Assim sendo, as plantas absorvem, predominantemente, a forma  $H_2PO_4^-$ . Portanto, a manutenção de uma adequada concentração deste íon ortofosfato na solução do solo é de fundamental importância para o crescimento das plantas.



A concentração de fósforo requerida na solução do solo, normalmente referida como fator intensidade, do ponto de vista conceitual da disponibilidade de fósforo, ou como requerimento externo de fósforo, do ponto de vista de crescimento vegetal, depende da espécie vegetal, do estágio de crescimento e das condições de difusão de fósforo no solo. Uma concentração de  $0,005 \mu\text{g P/ml}$  e de  $0,20 \mu\text{g P/ml}$  para a mandioca e soja, respectivamente, tem sido sugerida como adequada para o máximo crescimento destas espécies (Tisdale et al., 1985). Resultados desta natureza são importantes, na medida que mostram uma variação muito grande entre espécies na capacidade de aquisição de fósforo do solo. Todavia, dado às dificuldades de se analisar a solução do solo, as avaliações de disponibilidade de fósforo no solo não envolvem a análise da concentração de ortofosfato em solução.

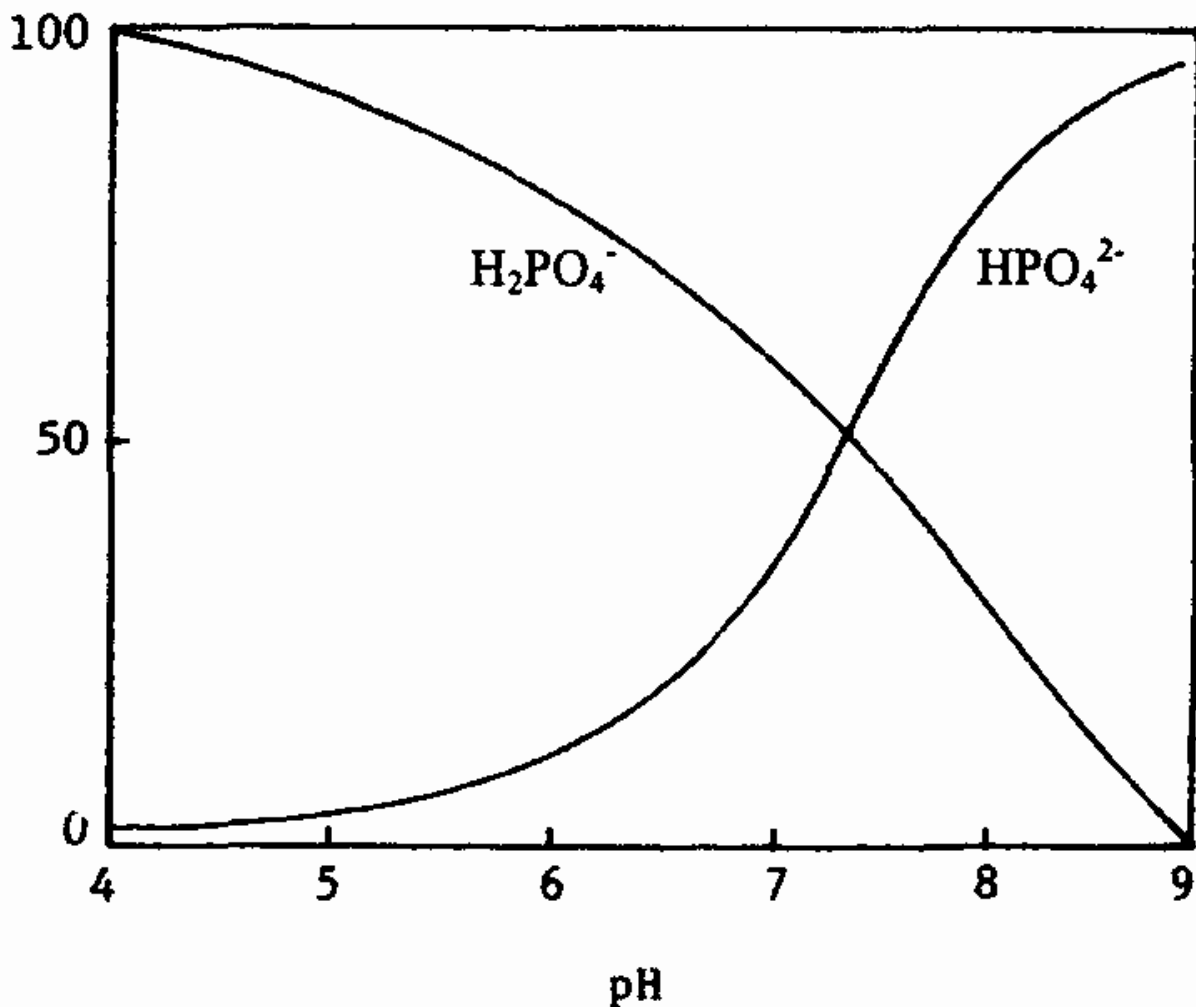


Figura 12.2. Distribuição relativa dos íons ortofosfato em relação ao pH da solução.

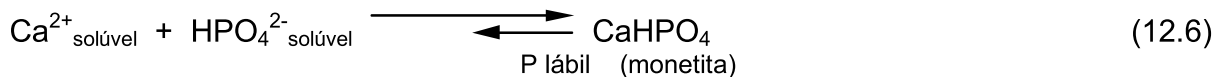
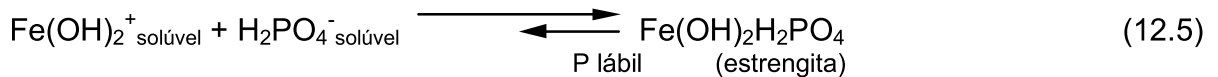
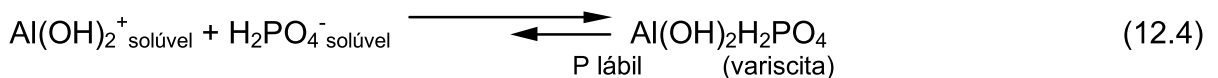
Independentemente da concentração de fósforo a ser mantida na solução do solo, o mais importante é a capacidade das formas de fósforo associadas à fase sólida de ressuprir ou de tamponar a concentração da solução, à medida que as plantas absorvem o fósforo. A quantidade de fósforo na fase sólida capaz de ressuprir a solução, ou seja, o fósforo da fase sólida em equilíbrio com o da solução é referido como fator quantidade, do ponto de vista conceitual de disponibilidade de fósforo.

Este fósforo em equilíbrio com o fósforo da solução é representado por uma determinada fração do fósforo precipitado, cuja magnitude depende da solubilidade do produto formado, e, representado também por uma dada fração do fósforo adsorvido pelos óxidos. O fósforo em equilíbrio com o fósforo da solução é também conhecido como P lábil.

A remoção de fósforo da solução do solo (Figura 12.1), pode se dar tanto por precipitação quanto por adsorção e, o fenômeno da remoção é denominado **fixação de fósforo**.

### 12.1.2. Fósforo Precipitado

A precipitação em solos ácidos ocorre com íons alumínio ou ferro presentes na solução e, no caso de solos alcalinos com íons cálcio, conforme os três exemplos a seguir:



Assim, no caso de solos ácidos, a calagem prévia, ao promover a neutralização do alumínio e de grande parte do ferro, reduz a fixação do fosfato via precipitação. Por outro lado, o uso excessivo de calcário promoveria, a pH acima de 7,0, novo aumento da fixação, via precipitação do fosfato com cálcio.

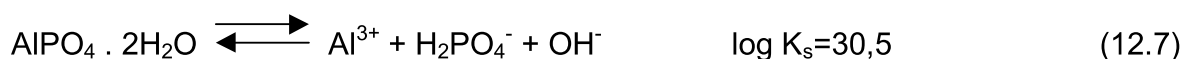
O Quadro 12.1 apresenta alguns compostos formados pelas reações de precipitação do fosfato. Contudo, no sistema solo formam-se compostos mais complexos, em diversas combinações catiônicas e formas de difícil identificação.

**Quadro 12.1. Exemplos de compostos formados da reação de precipitação de fosfatos com cátions em solos ácidos e alcalinos.**

Composto	Fórmula	Composto	Fórmula
Estrengita	FePO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	Monetita	CaHPO <sub>4</sub>
Vivianita	Fe <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 8H <sub>2</sub> O	Hidroxiapatita	Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> (OH) <sub>2</sub>
Variscita	AlPO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	Fluorapatita	Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> F <sub>2</sub>
Leucofosfita	Al <sub>2</sub> K(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> OH · 2H <sub>2</sub> O		

Com a fixação de fósforo via precipitação, a disponibilidade de fósforo vai depender da solubilidade dos compostos formados.

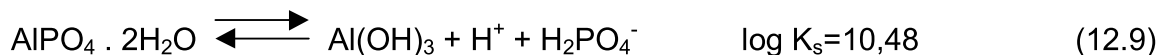
No caso da variscita pura, a equação de equilíbrio é esta:



Já a atividade do alumínio em solução, conforme visto no Capítulo 4, decresce com a elevação do pH, de acordo com:



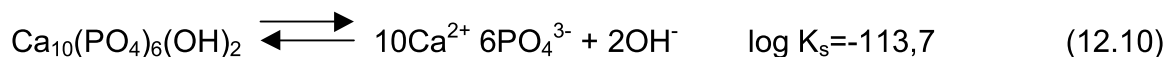
Combinando as reações 12.7 e 12.8, tem-se:



Com isto, a atividade de íons fosfato em solução, em função do pH pode ser dada por:

$$p(\text{H}_2\text{PO}_4^-) = 10,48 - \text{pH}$$

No caso da hidroxiapatita, a equação de equilíbrio é a seguinte:



Analisando-se a reação 12.10, conclui-se que, com concentrações fixas de cálcio, uma diminuição de pH, que implica em decréscimo da atividade de OH<sup>-</sup>, resulta no aumento da atividade de fósforo em solução. Isto explica, porque fosfatos de cálcio, como a hidroxiapatita dos fosfatos de rocha, apresentam maior eficiência com o aumento da acidez dos solos.

A Figura 12.3. mostra as relações entre a atividade de fosfato em solução e o pH, para alguns compostos fosfatados. Nota-se que a solubilidade de fosfatos de ferro e de alumínio aumenta com o pH, enquanto que o inverso ocorre com fosfatos de cálcio. Assim sendo, a maior solubilidade – disponibilidade – ocorre em torno de pH 6,0, no caso da existência simultânea de vários compostos de fósforo, que é justamente o caso do sistema solo.

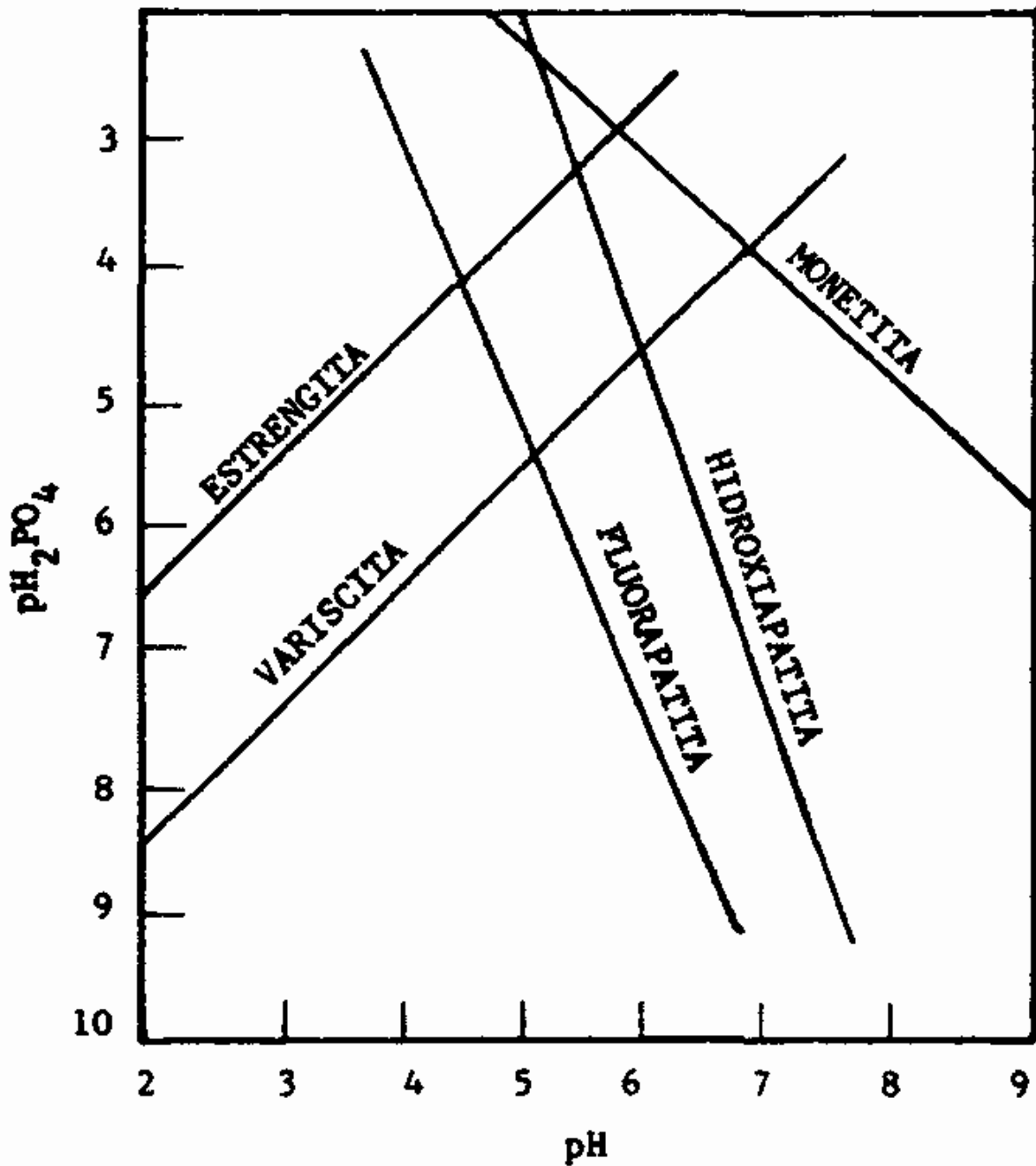


Figura 12.3. Isotermas de solubilidade para alguns compostos fosfatados, com atividade de cálcio definida por  $pCa = 2,5$  (Adaptado de Olsen e Khasawneh, 1980)

### 12.1.3. Fósforo Adsorvido

O outro mecanismo envolvido na remoção do fósforo da solução – fixação de fósforo – é a reação de adsorção na superfície de argilas, óxidos hidratados de ferro e de alumínio ou de carbonato de cálcio, em solos calcários. A adsorção de fosfato ocorre

através de ligação covalente, de alta energia, todavia, pelo menos parte do fosfato adsorvido permanece por certo tempo na forma lábil, ou seja, pode retornar à solução.

A Figura 12.4 ilustra três mecanismos propostos para a adsorção de fosfato na superfície de óxidos hidratados de alumínio, os quais, juntamente com os de ferro, são os responsáveis pelo desenvolvimento de carga positiva em solos ácidos ou apresentam a superfície rica em  $\text{OH}^-$  para troca com  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . Quanto menor o grau de cristalinidade dos óxidos, maior é a capacidade de adsorção, devido à maior superfície específica.

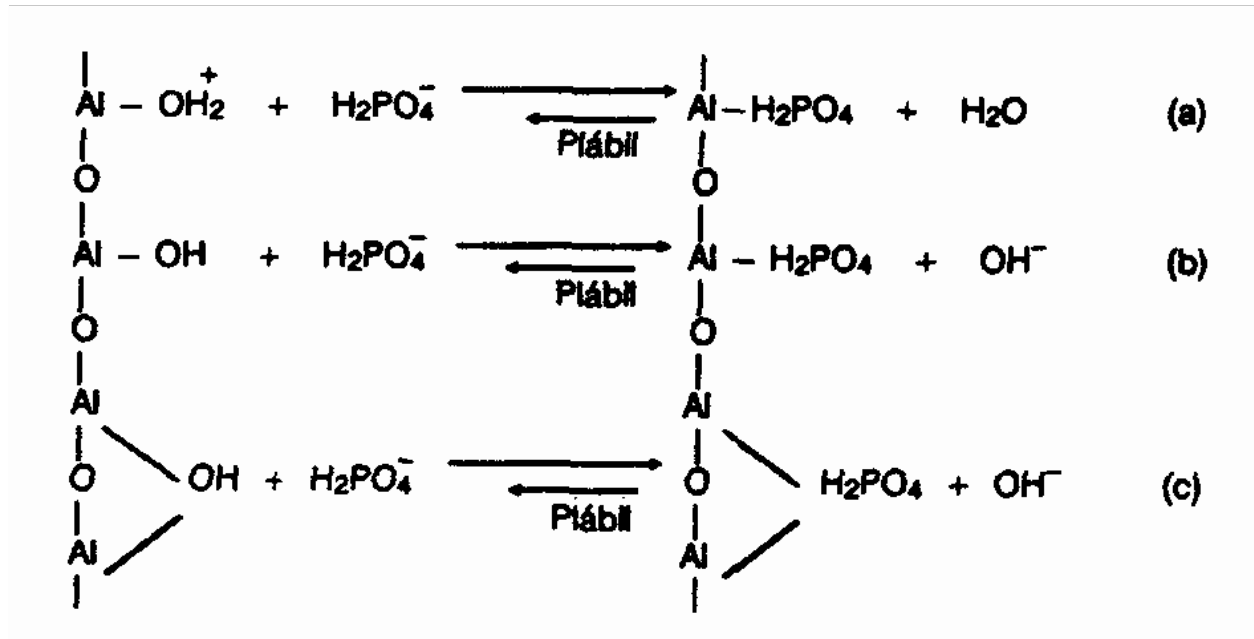


Figura 12.4. Representação esquemática de adsorção de fosfato em superfície de óxido hidratado de alumínio, mostrando a substituição de um grupo "aquo" (a), "hidroxila" (b) e grupo "ol" (c).

Merece destaque na Figura 12.4 a proposição de Hingston et al. (1974) de que o fosfato adsorvido por troca com o grupo "ol" (letra c) é irreversivelmente adsorvido.

A fixação de fósforo tem relevância no manejo da fertilidade do solo, visando maior eficiência de uso de fertilizantes fosfatados. Em função do que foi visto, quanto mais ácido, quanto maior teor de argila e, principalmente, quanto maior o predomínio de óxidos de ferro e de alumínio na fração argila, maior é a capacidade de fixação. Em termos práticos, o teor de argila é uma característica a ser considerada, pois apresenta elevada correlação com a fixação de fosfatos por solos sob vegetação de cerrado (Lopes, 1983), dado à grande ocorrência de óxidos de alumínio e ferro na fração argila destes solos.

A análise da Figura 12.4 permite inferir que uma calagem prévia à adubação fosfatada, reduz a fixação de fósforo, por promover a diminuição de cargas positivas disponíveis para adsorção de fosfato e por reduzir a adsorção por substituição direta, dado a maior atividade de hidroxila no meio.

#### 12.1.4. Fósforo Mineralogicamente Estável

O fósforo removido da solução por precipitação ou adsorção, com o passar do tempo, tende a formar ligações mais estáveis com Al, Fe ou Ca, resultando na formação de compostos mineralogicamente estáveis. Enfim com o passar do tempo – reações lentas – o fósforo lábil torna-se P não-lábil, o qual constitui, portanto, o fósforo mineralogicamente estável da Figura 12.1.

Na dinâmica dos nutrientes no solo, esta é uma particularidade para o fósforo, no sentido de que é o único nutriente que “envelhece” no solo. Tal envelhecimento, passando-se da forma lábil para a não-lábil, implica na diminuição da disponibilidade do fósforo aplicado ao solo em adubações, com o passar do tempo (Figura 12.5). Nos cultivos sucessivos, a reciclagem do fósforo através do adequado manejo de resíduos vegetais tende a reduzir o problema imposto pela reação de envelhecimento, na medida em que grande parte do fósforo absorvido retorna ao solo em forma orgânica e, enquanto nesta forma, permanece isento de reações de fixação. Portanto, o problema tende a ser mais significativo no caso, por exemplo, de uma fosfatagem corretiva efetuada com grande antecedência ao plantio. Ademais, é preciso considerar a possibilidade do P não-lábil sofrer solubilização e fornecer fosfato para a solução (Figura 12.1). Além de não se conhecer os mecanismos exatamente envolvidos no envelhecimento do fósforo, ainda não se sabe muito a respeito do retorno deste fósforo para a solução, que, se ocorrer, é muito lento (Figura 12.1).

---

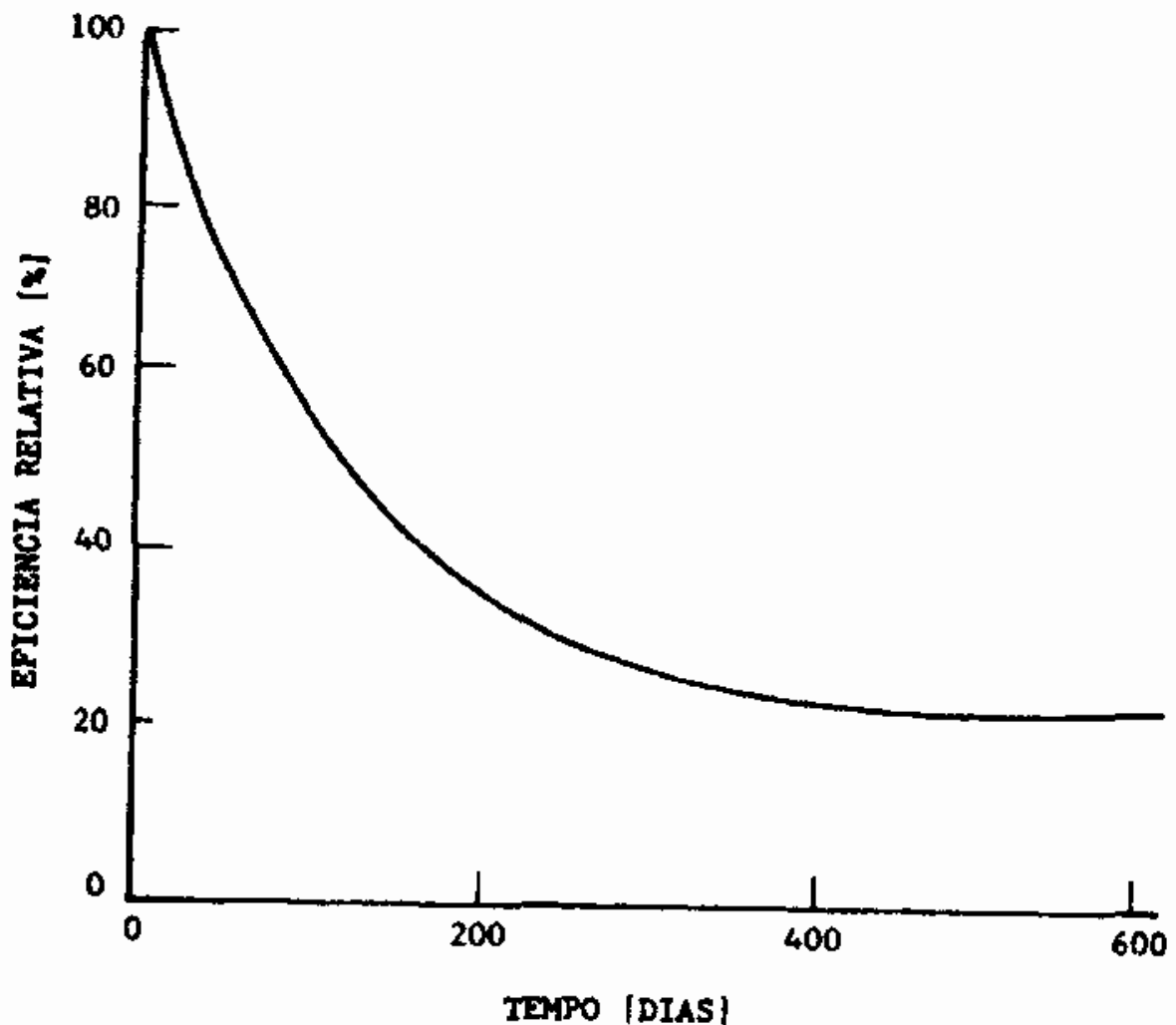
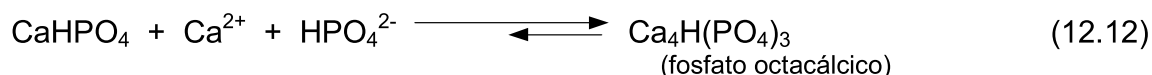


Figura 12.5. Efeito do tempo de incubação de fosfato com o solo na eficiência – disponibilidade– de fósforo para a planta (Barrow, 1980).

A título de ilustração, as reações 12.11, 12.12 e 12.13, em seqüência, procuram mostrar possíveis reações de envelhecimento do fosfato aplicado em solo alcalino, rico em cálcio. Inicialmente, conforme já discutido, forma-se fosfato bicálcico (monetita), que ainda é capaz de manter uma boa parte do fósforo na forma lábil, ou seja, em equilíbrio rápido com o fósforo da solução. Com o tempo, devido à grande afinidade do fósforo com o cálcio, estes dois elementos continuam a reação, nesse meio rico em cálcio e em oxidrila, formando compostos mais estáveis de fósforo, como fosfato octo cálcico e, finalmente, hidroxiapatita. Este último mineral, quase não mais mantém fósforo na solução (vide tamanho da seta na reação 12.13 e compare com 12.11), ou seja, trata-se de composto fosfatado altamente estável, com quase 100% de seu fósforo na forma não-lábil. Este é o mineral que tende a predominar nos principais fosfatos naturais brasileiros.

Assim sendo, a adubação com fosfato natural implica na aplicação de grande quantidade de P não-lábil. Não deixa de ser um grande contrasenso e, na verdade, um desperdício de um recurso natural não-renovável.



Quanto ao retorno do P não-lábil para a solução, em primeiro lugar é preciso considerar que é um processo lento. Em segundo lugar, que trata-se de processo que depende de alterações químicas no solo, tais como de acidez ou de potencial de oxidação-redução. A acidificação do solo implica, por exemplo, numa maior solubilização da hidroxiapatita (Figura 12.3), ou seja, na passagem de parte do P não-lábil para a solução do solo (Figura 12.1). Sob anaerobiose, o fósforo não-lábil ligado a ferro pode ser liberado para a solução devido a redução do  $\text{Fe}^{3+}$  para  $\text{Fe}^{2+}$  (Ponnamperuma, 1972).

O fósforo não-lábil constitui a maior parte do fósforo inorgânico do solo, portanto, é a forma de fósforo predominante na maioria dos solos. E, infelizmente, pelo que foi visto, em princípio, trata-se de forma inerte para as plantas.

Todavia, em virtude da grande quantidade de P não-lábil presente nos solos e a escassez de fontes naturais de fósforo, cada vez mais tem-se preocupado em conhecer a capacidade das plantas em utilizar este fósforo. Neste sentido, os microrganismos e, a própria planta, podem vir a representar importante papel. Já foi destacada a capacidade das plantas em alterar a acidez e o potencial de oxidação-redução da rizosfera, o que pode implicar num uso de P não-lábil do solo, maior do que normalmente se imagina. Por exemplo, as espécies capazes de promover maior acidificação da rizosfera são mais eficientes em fazer uso de P não-lábil ligado a cálcio (Raij e Diest, 1979; Bekele et al., 1982). Tais evidências reforçam uma vez mais, o papel da planta em alterar a disponibilidade dos nutrientes no solo.

### 12.1.5. Fósforo Orgânico

A última forma de fósforo no solo a ser destacada é o fósforo orgânico (Figura 12.1), que pode representar de 20 a 70% do fósforo total da camada arável. Logicamente, a sua contribuição será tanto maior quanto maior for o teor de matéria orgânica do solo.

O fósforo orgânico apresenta-se basicamente na forma de ésteres do ácido ortofosfórico, principalmente representados por fosfatos de inositol, fosfolipídeos, ácidos nucléicos, nucleotídeos e açúcares fosfatados.

Os aspectos básicos envolvidos na mineralização do P orgânico são praticamente os mesmos discutidos para o nitrogênio orgânico, pois, antes de mais nada, é preciso



considerar a decomposição da matéria orgânica como um todo. Merece destaque o fato de que uma relação C/P no resíduo orgânico maior que 300 tem sido associada a um predomínio da imobilização de fósforo sobre a mineralização. Em termos de concentração de fósforo no resíduo, o valor crítico parece ser de 0,2%.

Levando-se em consideração diversos aspectos discutidos na mineralização do nitrogênio orgânico e que a matéria orgânica do solo tem cerca de 0,5% P, pode-se considerar que para cada 1% de matéria orgânica no solo haverá a mineralização de 1 a 4 kg P/ha, equivalentes a 3-10 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.

Um aspecto de mais alta relevância relacionado ao fósforo orgânico, distinguindo-o das formas orgânicas de outros nutrientes, diz respeito a atuação muito particular da enzima fosfatase, que desempenha importante papel na mineralização do fósforo orgânico no solo.

A fosfatase pode ser produzida por raízes de plantas e excretada para a rizosfera, onde pode estar presente livre no solo ou associada a parede celular das raízes, ou pode ser produzida por diversos microrganismos. Esta enzima produz a defosforilação de todo e qualquer composto orgânico fosfatado normalmente presente no solo, promovendo a liberação de fosfato para a solução do solo (Figura 12.1). Quanto maior a atividade da fosfatase mais rápida será a liberação.

A atividade da fosfatase, principalmente na rizosfera (Figura 4.1), pode exercer importante papel no aumento da disponibilidade de fósforo às plantas, em face da expressiva quantidade de fósforo orgânico existente no solo. A sua contribuição real precisa ser melhor avaliada, em estudos mais aprofundados envolvendo a relação solo-planta-microrganismos.

## 12.2. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO

Pelo exposto até então, a disponibilidade de fósforo no solo depende de quatro fatores:

### a) Fator capacidade ou poder tampão de fósforo

Capacidade da fase sólida em ressuprir a solução do solo, através da solubilização ou dessorção do P lábil. É dado pela relação entre os fatores quantidade e intensidade.

### b) Fator transporte

O fósforo é transportado de um dado ponto da solução do solo até a superfície da raiz quase que exclusivamente por difusão.

---

### **c) Fator planta**

No caso do fósforo, aspectos relacionados a morfologia e crescimento radicular além de alterações promovidas pelas plantas na rizosfera são da maior importância.

### **d) Fator microrganismos**

As hifas dos fungos micorrízicos minimizam o fator transporte. E, os mais diversos microrganismos, promovendo a síntese de fosfatase, podem, a um dado momento ou localizadamente, aumentar o poder tampão para fósforo.

É quase impossível pensar-se num método prático de avaliação da disponibilidade de fósforo capaz de expressar o efeito de todos os quatro fatores citados.

Todavia, em termos práticos, o poder tampão de fósforo tende a ser o mais importante para fins de avaliação da disponibilidade e de recomendação de adubação. Na verdade, em face do exposto no Capítulo 3 para o papel tanto da fase sólida quanto da solução do solo na nutrição das plantas, a disponibilidade de fósforo é avaliada pelo fator quantidade, representado pelo fósforo da fase sólida que pode passar para a solução, ou seja, pelo fósforo lábil.

Existem vários extratores químicos de fósforo em uso no mundo, o que reflete a dificuldade de avaliação da disponibilidade deste nutriente. Considerando os quatro fatores anteriormente citados bem como a complexidade da dinâmica do fósforo no solo, concluí-se que a tarefa do extrator é realmente difícil.

Os diferentes métodos de extração resultam em valores distintos para o fósforo disponível, dificultando comparações. Por exemplo, este problema não ocorre para o potássio, em função de sua dinâmica no solo ser muito simples.

Basicamente, são quatro as reações pelas quais o fósforo lábil é extraído da fase sólida, procurando-se determinar o fator quantidade. Essas reações são:

#### **a) Ação solubilizadora de ácidos**

As soluções ácidas utilizadas, com pH na faixa de 2 a 3, promovem a solubilização de precipitados de fosfatos de cálcio, alumínio e ferro, com a seguinte ordem de solubilidade: P-Ca > P-Al > P-Fe. Assim sendo, dado a grande solubilização de P-Ca, os extratores ácidos são mais adequados para avaliarem a disponibilidade de P ligado a Al e Fe. Esta é a situação prevalecente na grande maioria dos solos do Brasil. Todavia, se o solo recebeu grandes quantidades de fosfato natural, o uso de extratores ácidos promove a solubilização de grande quantidade de P ligado a cálcio, representado por P não-lábil (hidroxiapatita), superestimando a disponibilidade de fósforo.

Os ácidos mais usados são HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e HCl. O extrator mais conhecido é o formado da mistura de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 N + HCl 0,05 N, desenvolvido por Mehlich na Universidade Estadual da Carolina do Norte-EUA. Passou a ser testado no Brasil a partir de 1965, sob a denominação de extrator ou método de Mehlich ou Carolina do Norte. Hoje, é usado em todos os estados do Brasil, exceto São Paulo.

---

### b) Substituição de ânions

O fosfato adsorvido na superfície de óxidos de ferro e de alumínio e de carbonatos de cálcio, que representa a outra forma de P lábil, pode ser substituído em desorção por ânions tais como sulfato, cloreto, acetato, citrato e carbonato. Na verdade, desde 1894 tem-se estudado o uso de ácido cítrico como extrator de fósforo.

Então, o extrator Mehlich, por exemplo, procura extrair todo o P lábil, tanto por solubilização – efeito da acidez – do fosfato precipitado, quanto por desorção – efeito do ânion do ácido – do fosfato adsorvido.

### c) Complexação de cátions ligados a P

O ânion fluoreto é muito eficiente na complexação dos cátions alumínio e cálcio, os quais apresentam-se combinados com fósforo nos solos. Assim, por exemplo, o extrator  $\text{NH}_4\text{F}$  promove a complexação de alumínio e/ou cálcio, liberando o ion fosfato ligado a esses cátions. Os ânions citrato e lactato também são eficientes na complexação de alumínio.

### d) Hidrólise de cátions ligados a P

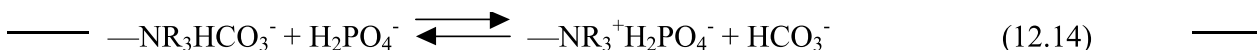
Em soluções alcalinas tamponadas, os íons oxidrila extraem fósforo ligado a ferro ou alumínio por hidrólise desses cátions. O extrator  $\text{NaHCO}_3$  a pH 8,5 foi desenvolvido para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos calcários, pois o ânion  $\text{HCO}_3^-$  é muito efetivo em substituir o fosfato adsorvido em  $\text{CaCO}_3$  ao mesmo tempo em que o sódio diminui a atividade de cálcio em solução, reduzindo a precipitação do fósforo. Posteriormente, verificou-se que este extrator é igualmente eficiente em solos ácidos, por promover a hidrólise do ferro e do alumínio ligados a fósforo.

### e) Resina trocadora de ânions

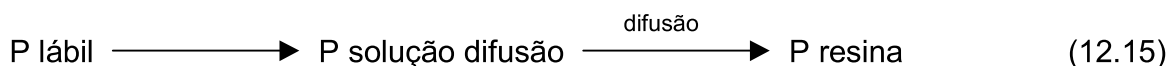
Uma forma alternativa de extração do fósforo, que parece extrair apenas as formas de P lábil, sejam elas P-Ca, P-Fe ou P-Al, e, de certa forma, que parece também imitar mais o processo natural de liberação e transporte do fósforo para absorção, diz respeito ao uso de resina trocadora de ânions (Raij, 1991). Segundo esse autor, o processo de extração de fósforo pela resina tem características que lhe dão um suporte teórico que outros métodos – uso de extratores químicos – não têm. Todavia, em todo o mundo, o uso da resina em análise de rotina tem-se restringido ao estado de São Paulo.

A resina trocadora de ânions é constituída de esferas com diâmetro de aproximadamente 1 mm, bastante porosas e com grande quantidade de radicais de amônio quaternário ( $-\text{NR}_3^+ \text{OH}^-$ ).

A resina é normalmente saturada com bicarbonato, de forma que numa suspensão aquosa de solo e resina tem-se:



Em função da grande capacidade de adsorção de ânions da resina, o equilíbrio da reação 12.14 é favorável à direita, ou seja, a resina atrai o fósforo da solução (simulando a absorção pelas raízes) e, por consequência, atrai o P lábil. Enfim, parece ocorrer uma maior analogia com o processo de aquisição de fósforo pelas raízes, conforme esquematizado a seguir:



Em estudos específicos envolvendo a avaliação da fertilidade do solo, a maneira de se comparar extratores de um dado nutriente é através de correlações entre as respostas de plantas ao nutriente e os teores do mesmo no solo. A resposta das plantas pode ser expressa como quantidade do nutriente absorvido pela planta, teor do nutriente na planta, crescimento, ou produção relativa. Quanto maior o coeficiente de correlação, melhor é o extrator ou método de extração.

Fixen e Grove (1990), com base em dados da literatura, observaram uma ampla faixa em coeficientes de correlação para os métodos de avaliação da disponibilidade de fósforo (Quadro 12.2). Os métodos variaram de correlações não-significativas até explicar mais de 90% da variabilidade na disponibilidade de fósforo.

**Quadro 12.2. Amplitude de variação de coeficientes de correlação obtidos em diversos estudos de avaliação da disponibilidade de fósforo.**

Método	Extrator	Coeficiente de correlação	
		Mínimo	Máximo
Bray 1	HCl 0,025N+NH <sub>4</sub> F 0,03N	0,13	0,98
Olsen	NaHCO <sub>3</sub> 0,5M a pH 8,5	0,03	0,96
Mehlich 1	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,025 N + HCl 0,05 N	0,25	0,91
Resina	Resina Trocadora de Ânions	0,69	0,98

Conforme a tendência dos dados do Quadro 12.2, o método da resina adapta-se a uma maior variação nas condições prevalentes nos solos, pois o valor mais baixo de coeficiente de correlação reportado literatura foi de 0,69. Em princípio, conforme destacado, isto se deve ao fato deste método independer do fósforo estar ligado a Ca, Fe ou Al.

Quanto ao extrator Mehlich 1, o mais usado no Brasil, é preciso estar sempre atento, conforme já discutido, para o fato de que o fósforo disponível será superestimado em solos que receberam grandes quantidades de fosfatos parcialmente solubilizados ou de fosfatos naturais. Com uma boa probabilidade, os baixos coeficientes de correlação (Quadro 6.2.) para este extrator devem ter sido obtidas em condições de grande quantidade de fósforo ligado a cálcio.

### 12.3. ADUBAÇÃO FOSFATADA CORRETIVA

Um dos aspectos mais preocupantes para a produção vegetal na maioria dos solos do Brasil, notadamente da área sob vegetação de cerrado, é a baixa fertilidade natural. Além da prática da calagem, que visa corrigir os problemas relacionados com a acidez, muitas vezes tem-se adotado a prática de adubação corretiva, de forma a permitir uma rápida construção da fertilidade destes solos e uma maior eficiência das adubações de manutenção.

A adubação corretiva, conforme a própria designação caracteriza, é uma prática corretiva (vide Figura 2.1) que também é uma prática de adubação propriamente dita. Na verdade, a conotação de prática corretiva é mais apropriada apenas para a construção da fertilidade do solo em fósforo, através da adubação fosfatada corretiva ou fosfatagem corretiva. Neste caso, a aplicação de fósforo em toda a área antes do plantio, em sua maior parte, visa saciar a fome do solo em fósforo, não eliminando a necessidade de aplicação deste nutriente na adubação de plantio para atendimento mais direto e imediato das plantas.

#### 12.3.1. Princípios Gerais

A adoção da prática da adubação fosfatada corretiva ou fosfatagem corretiva torna-se mais indicada à medida que a reação do nutriente com componentes do solo se torna mais intensa, ou, por outro lado, à medida que a mobilidade do elemento no solo se torna menor. Dentre os nutrientes, o destaque neste sentido é justamente o fósforo que, além de se apresentar com baixa disponibilidade natural, sofre reações intensas de precipitação e de adsorção – fixação do fósforo. Com isto, esse nutriente apresenta baixa mobilidade no solo.

Para o fósforo, a sua quase total dependência na difusão constitui em uma séria limitação na aquisição deste nutriente pelas plantas, ou seja, a disponibilidade de fósforo é grandemente afetada pelo fator transporte – suprimento do mesmo até a superfície da raiz. A localização do fertilizante fosfatado no sulco de plantio ou na cova, apresenta a vantagem de diminuir a fixação do fósforo (Kovar e Barber, 1989), conseqüentemente aumentando a difusão por aumentar o gradiente entre a solução e a superfície da raiz.

Basicamente, a fixação diminui com aplicação localizada, pois ela aumenta com o volume de solo com o qual o fosfato entra em contato (Novais et al., 1985). Todavia, essa localização, ao concentrar o fósforo em reduzido volume do solo, reduz a proporção de raízes que entram em contato com o nutriente. Tal situação tende a ser muito drástica para a produtividade vegetal quando da ocorrência de veranicos. Diversos estudos têm mostrado que a aplicação de doses mais elevadas de fósforo a lanço, de forma a promover contato com o maior volume possível de raízes é condição para sua maior absorção e crescimento das plantas (Kamprath, 1967; Anghinoni e Barber, 1980; Wagner, 1986).

---

Usualmente, aplicações de doses mais elevadas a lanço têm proporcionado maiores rendimentos que aquelas localizadas, nos primeiros cultivos, tendo em vista o maior crescimento radicular proporcionado pela fosfatagem corretiva, especialmente nas regiões mais sujeitas aos veranicos. Com cultivos subsequentes, essa diferença tende a desaparecer, pois o resíduo de fertilizantes fosfatados aplicados localizadamente passa a ser misturado com o restante do solo, em face das sucessivas operações de preparo do solo. Considerando-se resultados a longo prazo, a produção cumulativa tem sido função mais da dose de fósforo aplicada do que do método (fosfatagem corretiva a lanço ou adubação de manutenção no sulco) de aplicação do fertilizante fosfatado (Goedert, 1987).

Vale ressaltar que, quando da abertura de novas áreas de cerrado para a produção de grãos, a combinação de aplicações de adubação fosfatada corretiva a lanço e posteriores adubações de manutenção no sulco de plantio é recomendada (Lopes, 1983).

### **12.3.2. Diagnóstico e Cálculo da Necessidade de Fosfatagem Corretiva**

A princípio, a prática da fosfatagem corretiva é indicada para solos com disponibilidade de fósforo bastante reduzida. Lopes e Abreu (1987) sugerem sua indicação para solos arenosos com até 5 mg P/dm<sup>3</sup> e para solos de textura média e argilosa com até 3 mg P/dm<sup>3</sup>, em ambos os casos considerando o teor de fósforo extraído pelo Mehlich 1. Ainda, esses autores sugerem que a necessidade de fosfatagem corretiva pode ser obtida através do teor de argila do solo, visto que há boas correlações entre este parâmetro e as quantidades de fósforo indicadas para adubação fosfatada corretiva. Neste contexto, recomenda-se as doses de 3 a 10 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel para cada 1% de argila.

Mais recentemente, Sousa et al. (1987) apresentaram duas proposições para a recomendação de adubação fosfatada corretiva para a soja, as quais, com as devidas adaptações, podem até ser extrapoladas para outras culturas. A primeira proposição consiste na correção do solo de uma só vez, com manutenção do nível de fertilidade atingido (Quadro 12.3), enquanto que a segunda consiste na correção gradativa, através de aplicações anuais no sulco de plantio (Quadro 12.4).

---

**Quadro 12.3. Recomendação de adubação fosfatada corretiva, a lanço, de acordo com a classe de disponibilidade de fósforo e o teor de argila.**

Teor de argila (dag/kg)	Teor de P (método de Mehlich 1 - mg/dm <sup>3</sup> )		Adubação Fosfatada Corretiva	
	Muito baixo	Baixo	P muito baixo	P baixo
			.....kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha *	
61 a 80	0-1,0	1,1-2,0	240	120
41 a 60	0-3,0	3,1-6,0	180	90
21 a 40	0-5,0	5,1-10,0	120	60
< 20	0-6,0	6,1-12,0	100	50

\* Fósforo solúvel em citrato de amônio neutro para os fosfatos acidulados e fósforo solúvel em ácido cítrico 2% (relação 1:100) para termofosfatos e escórias.

**Quadro 12.4. Recomendação de adubação fosfatada corretiva gradual no sulco de plantio, num período máximo de seis anos, de acordo com a classe de disponibilidade de fósforo e teor de argila.**

Teor de argila (dag/kg)	Adubação Fosfatada Corretiva Gradual	
	P muito baixo *	P baixo *
	.....kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha **	
61 a 80	100	90
41 a 60	90	80
21 a 40	80	70
< 20	70	60

\* Classe de disponibilidade de fósforo (vide Quadro 12.3); \*\* Fósforo solúvel (vide observação no Quadro 12.3).

Segundo Souza et al. (1987), doses inferiores a 100 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha devem ser aplicadas localizadamente no sulco de plantio.

A adubação corretiva gradual pode ser utilizada quando não se tem condições – capital, retorno econômico esperado e nível tecnológico – para fazer a correção do solo de uma única vez. Essa prática consiste em aplicar, no sulco de plantio, uma quantidade de fósforo superior à indicada para a adubação de manutenção, elevando-se a disponibilidade de fósforo em toda a área pelas misturas sucessivas do excedente com o passar do tempo, em face das arações e gradagens no preparo do solo. Enfim, é uma fosfatagem corretiva a médio prazo, num período máximo de quatro a seis anos.

### 12.3.3. Forma de Aplicação, Época e Fertilizantes na Fosfatagem Corretiva

Devido à baixa mobilidade do fósforo, é muito importante a distribuição do fertilizante fosfatado em toda a área – aplicação a lanço – bem como a sua incorporação através de gradagem.

A utilização de fontes solúveis de fertilizantes fosfatados – superfosfato simples, superfosfato triplo e termofosfato – tem de ser feita após a devida reação do calcário, quando a calagem também for necessária. Portanto, a fosfatagem corretiva é feita pouco antes do plantio.

Dentre os fertilizantes fosfatados solúveis, o uso de superfosfato simples resulta, indiretamente, na aplicação de gesso ao solo. Isto porque, o  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  se faz presente no superfosfato simples em 50%, com base em peso. Assim, por exemplo, para um solo com 50% de argila e com a opção de se aplicar 7 kg/ha de  $\text{P}_2\text{O}_5$ /1% de argila, seriam aplicados cerca de 1000 kg/ha de gesso. Ademais, em termos de enxofre, seriam aplicados 200 kg/ha deste nutriente. Por sua vez, o uso de termofosfato pode representar um significativo acréscimo no teor de magnésio, o que pode ser importante se, apesar da necessidade, foi usado um calcário menos rico em magnésio. Para cada 1% de MgO no termofosfato, quando se aplica 1 t/ha, adiciona-se 0,025 cmol<sub>c</sub> Mg/dm<sup>3</sup> solo. E, dependendo do termofosfato, pode-se também, indiretamente, fazer uma adubação corretiva com micronutrientes.

Devido a baixa reatividade das rochas fosfatadas – fosfatos naturais – brasileiras, o seu uso não é indicado para fosfatagem corretiva, tanto na implantação de culturas anuais quanto perenes, visando à produção de grãos. Isto porque, a calagem, praticamente inevitável no cultivo da maioria dos solos, reduz ainda mais a eficiência agrônômica dos fosfatos naturais.

Admite-se o uso destas fontes para aplicação direta em cultivo inicial de áreas de cerrado com arroz de sequeiro por 1 a 3 anos, seguido de pastagens com espécies tolerantes à acidez, ou, ainda, diretamente, na implantação de pastagens tolerantes à acidez (Lopes e Guilherme, 1992). De qualquer forma, o uso de fosfato natural, conforme já destacado, representa o desperdício de fonte não-renovável e com reduzida abundância no Brasil.

### 12.3. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE FÓSFORO NA ADUBAÇÃO

Se for feita opção pela prática da fosfatagem corretiva, a quantidade de fósforo a ser aplicada é bem mais alta e objetiva elevar, de uma única vez, a disponibilidade deste nutriente no solo. A disponibilidade de fósforo apenas é significativamente elevada após saciar grande parte da fome do solo por este nutriente. Mesmo que o teor de fósforo no solo seja elevado para alto, a adubação de plantio com esse nutriente não pode ser dispensada. Isto porque, dada à baixa mobilidade do fósforo no solo, a aplicação localizada é de fundamental importância no crescimento inicial das raízes.

---



No caso das recomendações para fósforo normalmente feitas nos boletins, pode-se definir pela aplicação de uma quantidade de fósforo superior à indicada para adubação de manutenção, de forma a proceder uma fosfatagem corretiva a médio prazo. Enfim, por tudo já discutido anteriormente, em qualquer investimento a ser feito no sentido de se construir a fertilidade do solo, a prioridade entre os nutrientes tem de ser dada para o fósforo.

Em solos com baixa disponibilidade de fósforo, a quantidade desse nutriente aplicada tem de ser elevada, justamente para vencer a fome do solo. Apesar de ser o macronutriente menos exigido pelas plantas, é aquele, normalmente, aplicado em maiores quantidades. Todavia, uma vez vencida a grande fome do solo – de uma única vez ou em cultivos sucessivos – as quantidades aplicadas terão de ser suficientes apenas para atender os acréscimos de produtividade. A título de ilustração, a Figura 12.6 mostra as quantidades de nutrientes a serem aplicadas para o milho visando obter uma produtividade referencial (P.M.E.) hipotética de 5 ton/ha e, como tendência geral, as quantidades para duplicar a produtividade, em ambos os casos considerando-se um solo com baixa fertilidade natural, mas já devidamente calcariado.

---

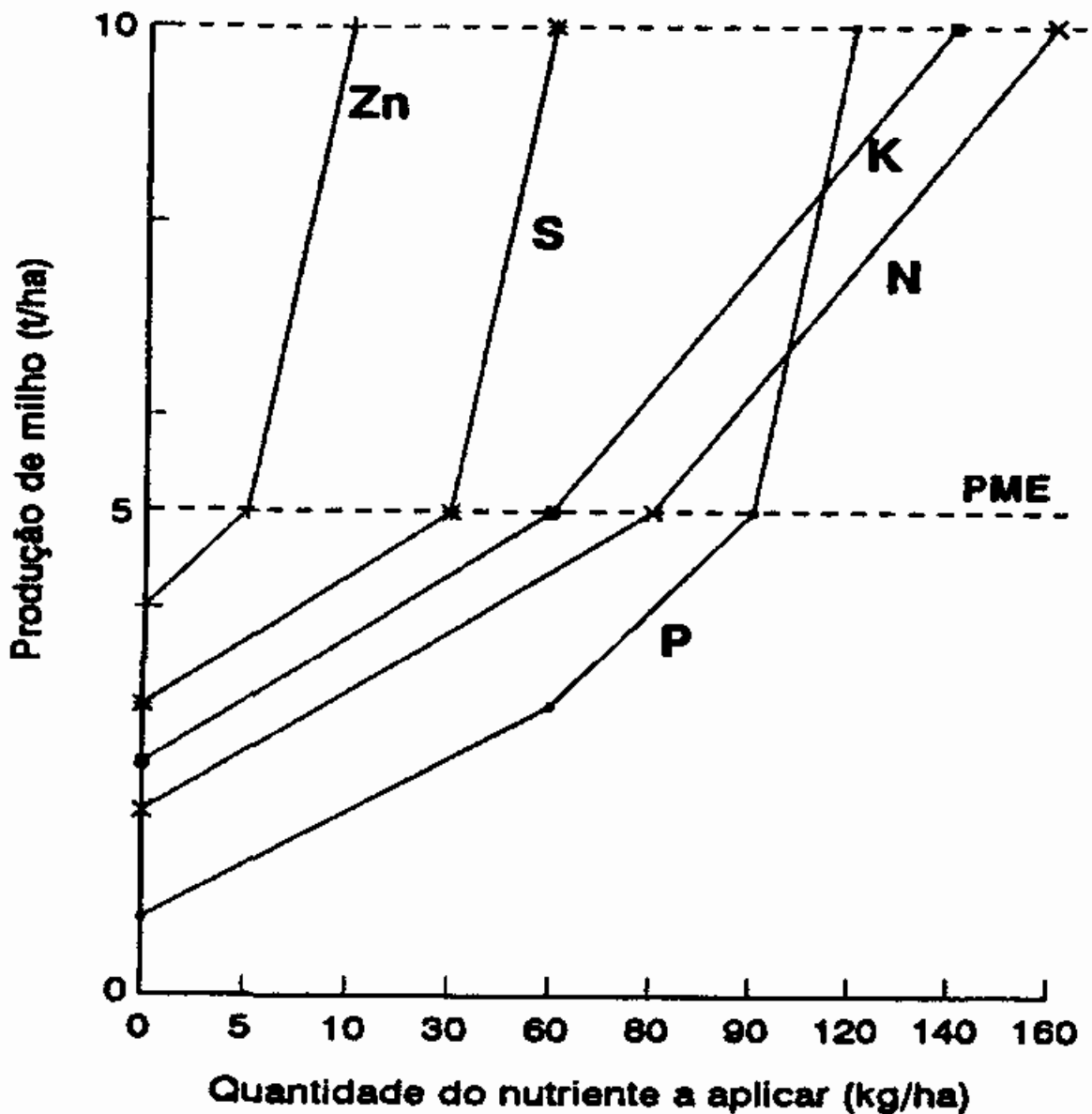


Figura 12.6. Representação esquemática para a relação entre a quantidade de nutrientes a aplicar em solo de baixa fertilidade para atingir uma Produção Máxima Econômica (PME) hipotética para o milho e, para duplicar essa produção, com base na exigência da planta.

Da análise da Figura 12.6, pode-se tirar algumas conclusões importantes, de caráter geral, no tocante às quantidades de nutrientes a aplicar. Dentre essas, destacam-se:

- a) O fósforo tende a ser o nutriente que mais limita a produção vegetal no Brasil, sendo que a baixa quantidade aplicada desse nutriente via formulados pouco concentrados, tais como 04-14-08, representa um dos grandes fatores a limitar os acréscimos em produtividade. O agricultor com menor nível tecnológico tem no

fósforo, normalmente, o grande desafio a ser vencido. Isto, sem esquecer a acidez do solo e, também, o papel da calagem em aumentar a eficiência da adubação fosfatada.

- b) Uma vez vencida a grande fome do solo em fósforo, as quantidades a serem aplicadas são, praticamente, para atender a exigência da planta, de tal sorte, que a curva do fósforo passa a paralelar a do enxofre, pois ambos são exigidos igualmente. Para o agricultor de nível tecnológico mais elevado, o fósforo, normalmente, não representa mais qualquer desafio.
- c) Considerando os nutrientes destacados e uma produtividade de milho de até cerca de 5 t/ha, o sucesso em obter tal produtividade, que representaria um aumento de mais de 100% na produtividade nacional, depende, em ordem decrescente de importância, das disponibilidades de P, N, K, S e Zn. Em situações específicas pode haver mudanças nessa ordem e, até mesmo, outros nutrientes podem limitar a produtividade para abaixo de 5 t/ha. Logicamente, apenas a análise do solo permitiria um diagnóstico preciso.
- d) À medida que se sobe na escala de produtividade, acima de 5 t/ha para o milho, o equilibrado suprimento de todos os nutrientes – Lei de Liebig – passa a ser cada vez mais importante. Por exemplo, não se consegue a produtividade de 10 t/ha de milho se o solo não for capaz de suprir cerca de 1 kg/ha de molibdênio. Se não houver tal capacidade e o molibdênio não for aplicado, de nada adiantaria aplicar cerca de 500 kg/ha dos demais nutrientes em conjunto.

A disponibilidade de fósforo num solo é influenciada pela textura do mesmo, conforme verifica-se nos boletins de Minas Gerais (CFSEMG, 1999) e Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Siqueira et al., 1989), de onde foram compiladas as informações dos Quadros 5.4 e 5.8, respectivamente. Dessa forma, depreende-se que a definição da quantidade de fósforo a ser aplicada também dependerá da textura

Considerando os dados do Quadro 5.4 para o fósforo, a CFSEMG (1999) recomenda para o milho, cultura tomada como exemplo, as seguintes quantidades de fósforo para a adubação de plantio (Quadro 12.5).

---

**Quadro 12.5. Quantidades de fósforo para adubação do milho no estado de Minas Gerais, visando uma produtividade de 6-8 t/ha.**

Teor de P no solo*		
Baixo	Médio	Bom
.....kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha.....		
100	80	50

\* Para interpretação do teor de P no solo consulte Quadro 5.4.

Mesmo que o teor de fósforo seja alto no solo, os resultados de pesquisa mostram que é muito importante a aplicação localizada no sulco ou cova de plantio de uma pequena dose de fósforo, o que promove um crescimento inicial vigoroso das raízes. Tal padrão de crescimento pode ser vital para uma maior produtividade, principalmente em regiões com ocorrência de veranicos

Com base nos dados do Quadro 5.8, Siqueira et al. (1989) recomendam para o milho, as seguintes quantidades de fósforo para a adubação de plantio (Quadro 12.6).

**Quadro 12.6. Quantidades de fósforo para adubação do milho nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, visando uma produtividade de 6 t/ha.**

Teor de argila (daq/ka)	Cultivos	Interpretação de P no solo (Níveis)*					
		Limitante	Muito baixo	Baixo	Médio	Suficiente	Alto
.....kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha.....							
≤ 10	1 <sup>o</sup>	120	90	60	40	20	≤ 20
	2 <sup>o</sup>	70	50	R**	R	R	≤ R
	3 <sup>o</sup>	50	R	R	R	R	R
11-25	1 <sup>o</sup>	110	80	50	30	20	≤ 10
	2 <sup>o</sup>	60	40	R	R	R	≤ R
	3 <sup>o</sup>	40	R	R	R	R	R
26-40	1 <sup>o</sup>	110	80	50	30	20	≤ 10
	2 <sup>o</sup>	60	40	R	R	R	≤ R
	3 <sup>o</sup>	40	R	R	R	R	R
41-55	1 <sup>o</sup>	120	90	60	40	20	≤ 20
	2 <sup>o</sup>	70	50	R	R	R	≤ R
	3 <sup>o</sup>	50	R	R	R	R	R
> 55	1 <sup>o</sup>	130	100	70	50	30	≤ 20
	2 <sup>o</sup>	80	40	40	R	R	≤ R
	3 <sup>o</sup>	60	40	R	R	R	R

\* Para interpretação do teor de P no solo consulte o Quadro 5.8.

\*\* Valor R (Reposição): < 3 t/ha = 25 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha; 3-6 t/ha = 40 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha; > 6 t/ha = 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.

Para o estado de São Paulo, Raij e Cantarella (1994) fazem uma recomendação para o milho com base na disponibilidade de fósforo e na produtividade esperada (Quadro 12.7). O uso da expectativa de produção variando numa faixa mais ampla é sempre bem vindo, facilitando as decisões por parte do técnico.

#### Quadro 12.7. Quantidades de fósforo para adubação do milho no estado de São Paulo.

Produtividade esperada (t/ha)	Interpretação P* (método da resina - mg/dm <sup>3</sup> )			
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto
	.....kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha.....			
2-4	60	40	30	20
4-6	80	60	40	30
6-8	90	80	50	30
8-10	100	90	60	40
10-12	120	100	70	50

\* Para interpretação do teor de P no solo consulte o Quadro 5.10.

### 12.4. FERTILIZANTES FOSFATADOS

Os fertilizantes fosfatados usados na agricultura são obtidos a partir de rochas fosfatadas, cujo mineral predominante é a apatita. Sua fórmula geral é  $Ca_{10}(PO_4)_6(X)_2$ , onde X pode ser F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> ou OH<sup>-</sup>. A mais comum é a fluorapatita. A fluorapatita com substituição parcial por carbonato, gerando o carbonato-fluorapatita ou francolita, representa um mineral de maior solubilidade, portanto, com certa viabilidade de uso direto. Todavia, para a fluorapatita ou hidroxiapatita, dada à estabilidade desses minerais, tem-se que proceder o tratamento ácido ou térmico, de forma a quebrar as ligações da apatita e aumentar o teor de fósforo solúvel em água.

#### 12.4.1. Rochas Fosfatadas ou Fosfato Natural

Os fosfatos brasileiros – fosfato de Araxá, fosfato de Patos de Minas, fosfato de Tapira e fosfato de Catalão – são constituídos basicamente de fluorapatitas e, portanto, praticamente não apresentam fósforo solúvel em ácido cítrico a 2% ou em água, ou seja, são de eficiência agrônômica muito baixa (Quadro 12.8).

**Quadro 12.8. Composição de alguns fosfatos naturais apatíticos brasileiros**

Fosfato	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> solúvel			
	Total	Ácido cítrico a 2%	Citrato neutro de amônio - CNA	Água
.....%.....				
Abaeté (MG)	24	4	1	0
Araxá (MG)	36	6	2	0
Patos de Minas (MG)	23	4	1,5	0
Tapira (SP)	37	2,5	2,0	0
Catalão (GO)	37	2,5	0,5	0
Alvorada (SP)	33	6	2,5	0
Ipanema (SP)	39	3	2	0
Jacupiranga (SP)	33	2	-	0

Os fosfatos naturais brasileiros nunca devem ser usados em adubações de plantio de culturas anuais, principalmente em solos menos ácidos ou que receberam calcário. Nessas condições, o índice de eficiência agrônômica é muito baixo.

A eficiência agrônômica, entretanto, pode ser aumentada para aplicação em solos ácidos, em forma de pó bem fino e incorporado ao solo, no caso de instalação de pastagens ou culturas perenes tolerantes à acidez. De qualquer forma, mesmo neste caso, é um desperdício de um recurso natural não-renovável e com reservas muito limitadas no Brasil.

**12.4.2. Superfosfato Simples**

O superfosfato simples é obtido do tratamento da rocha fosfatada apatítica com ácido sulfúrico concentrado (Reação 12.16).

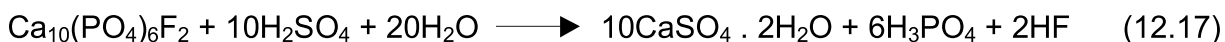


O fertilizante superfosfato simples é, portanto, uma mistura de fosfato monocálcico com gesso, onde o CaSO<sub>4</sub> representa 50% em peso. Assim, uma fosfatagem corretiva com superfosfato simples, indiretamente, promove uma gessagem.

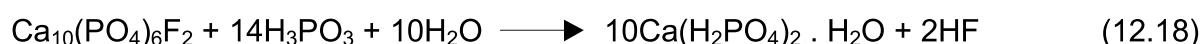
O superfosfato simples contém de 16 a 22% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em ácido cítrico a 2%, dos quais cerca de 90% é solúvel em água. Em adição, apresenta cerca de 12% de S e 26% de CaO.

### 12.4.3. Superfosfato Triplo

O tratamento da rocha fosfatada com elevada quantidade de ácido sulfúrico, resulta na produção de ácido fosfórico e gesso (Reação 12.17).



O gesso acumula como subproduto, enquanto que o ácido fosfórico é separado por filtração para ser usado na produção do superfosfato triplo (Reação 12.18).



Pela separação do gesso e enriquecimento com ácido fosfórico, obtém-se um fertilizante com 44 a 52% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  solúvel em ácido cítrico a 2%, dos quais cerca de 90% é solúvel em água. Apesar da vantagem do alto teor de fósforo, o superfosfato triplo apresenta as desvantagens de um menor teor de CaO (15%) do que o superfosfato simples (26%) e de não conter enxofre.

### 1.4.4. Termofosfatos

Os termofosfatos são obtidos por tratamento térmico de rochas fosfatadas em misturas com silicatos de magnésio. No processo de fusão podem ainda ser misturados fontes de micronutrientes, obtendo-se, neste caso, um fertilizante enriquecido nos mesmos.

Os termofosfatos têm cerca de 16%  $\text{P}_2\text{O}_5$  solúvel em ácido cítrico, cerca de 26% CaO, 15% MgO e, quando for o caso, micronutrientes. Além disto, merece destaque o seu equivalente em  $\text{CaCO}_3$  de +50 (Quadro 10.1). São, portanto, muito eficientes para fosfatagem corretiva em solos levemente ácidos. Assim, por exemplo, em uma fosfatagem corretiva com aplicação de 1 ton/ha de termofosfato magnesiano, são aplicados ao solo 160 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ /há; 0,47 cmol<sub>c</sub> Ca/dm<sup>3</sup> solo; e 0,37 cmol<sub>c</sub> Mg/dm<sup>3</sup> solo, além de ocorrer uma ação neutralizante da acidez equivalente à aplicação de 400 kg/ha de calcário com PRNT de 100%.

### 12.4.5. Fosfatos de Amônio

São fertilizantes obtidos pela reação da amônia com ácido fosfórico, produzindo o monoamônio fosfato (MAP) ou diamônio fosfato (DAP), conforme mostram as reações 12.19 e 12.20, respectivamente.



O MAP apresenta 11% de N e 48 a 55% de  $P_2O_5$  solúvel em ácido cítrico a 2%, enquanto que o DAP apresenta 18% de N e 46 a 53% de  $P_2O_5$  solúvel em ácido cítrico a 2%.

Ambos tem tido seu uso muito aumentado nos últimos anos, tanto para uso como fertilizante simples quanto para preparar formulados sólidos de alta concentração. Também, por serem completamente solúveis em água, são usados para preparo de fertilizantes fluidos e em fertirrigação.

Ambos podem ser usados no plantio, inclusive, há fortes evidências de que a presença de amônio aumenta a absorção de fosfato. Todavia, deve-se tomar muito cuidado com a aplicação do DAP em solos com pH mais elevado, pois a amônia ( $NH_3$ ) formada é fitotóxica para sementes e plântulas. Na solubilização do DAP, o pH ao redor do grânulo atinge valores próximos de 9,0, o que favorece o acúmulo localizado de  $NH_3$  e a fitotoxidez.

#### **12.4.6. Ácido Fosfórico**

O ácido fosfórico usado como fertilizante apresenta de 52 a 54% de  $P_2O_5$ . Basicamente, seu uso fica quase que restrito para produção de misturas fluidas. Com adequação do sistema de irrigação, tem sido usado em fertirrigação, principalmente em irrigação por subsuperfície, pois, a sua acidez evita a penetração de raízes nas tubulações.

---



## POTÁSSIO NO SOLO, FERTILIZANTES E ADUBAÇÃO POTÁSSICA

---

O potássio é absorvido pelas plantas em grandes quantidades. Na verdade, para várias espécies, como por exemplo banana, citros, abacaxi e batata, a exigência é muito maior do que para o nitrogênio.

Além de sua importância na produção vegetal propriamente dita, o potássio é muitas vezes associado a uma maior resistência das plantas a condições adversas, tais como baixa disponibilidade de água e extremos de temperatura. Este nutriente, mais do que qualquer outro, é conhecido por reduzir a incidência de doenças e ataque de insetos.

Ainda, o potássio é, normalmente, descrito como o “nutriente da qualidade” na produção vegetal. Com isto, os benefícios do potássio na qualidade dos produtos colhidos não podem ser ignorados na análise econômica da adubação potássica, principalmente quando a qualidade do produto é tão procurada quanto a produção.

O comportamento do potássio no solo é bastante simples, notadamente na maioria dos solos brasileiros. Soma-se a isto o fato de que a adubação potássica também não apresenta maiores complicações, mesmo porque existe praticamente um único fertilizante potássico de maior importância, o cloreto de potássio.

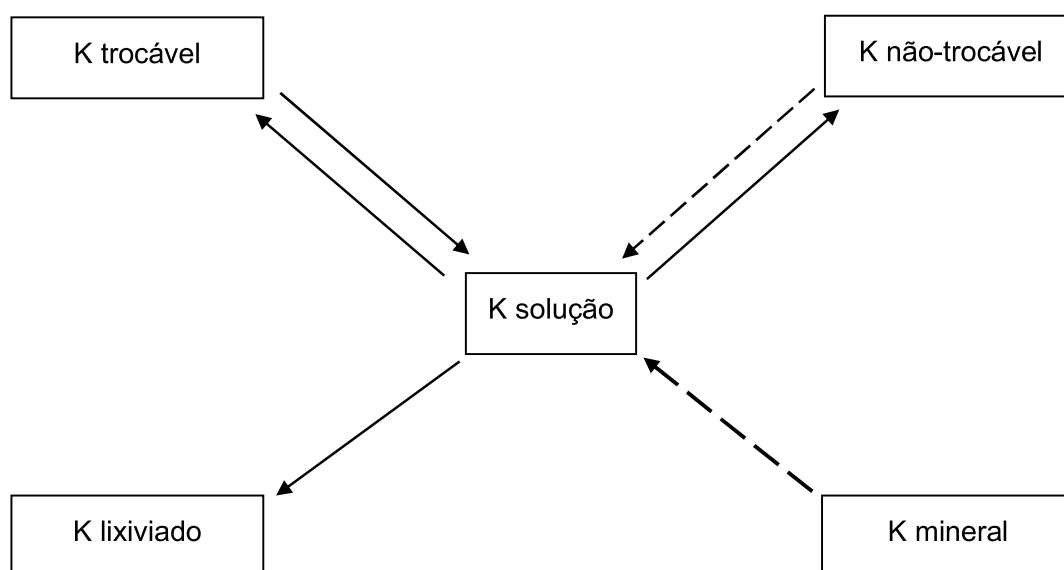
### 13.1. FORMAS E DINÂMICA DO POTÁSSIO NO SOLO

O potássio apresenta-se no solo apenas como íon monovalente, numa dinâmica bastante simples conforme ilustra a Figura 13.1.

#### 13.1.1. Potássio na Solução

A solução do solo é a fonte imediata de potássio para as plantas. Apesar de muito variável – 1 a 100  $\mu\text{g/L}$  – o potássio na solução do solo representa apenas uma pequena fração do potássio trocável.

---



**Figura 13.1. Representação simplificada das formas de potássio no solo e sua dinâmica. O tracejado representa uma liberação muito mais lenta do potássio.**

A concentração de potássio na solução controla a difusão deste nutriente até a superfície das raízes, portanto, controla a absorção de potássio pelas plantas (Mengel & Von Braunschweig, 1972). Assim como o fósforo, o potássio depende largamente da difusão para chegar na superfície das raízes. Todavia, como a concentração de potássio é muito maior que a de fósforo, sua dependência na difusão é menos crítica. De qualquer forma, os fatores que afetam a difusão, afetam sobremaneira a disponibilidade de potássio.

Ainda, com relação à disponibilidade de potássio, é preciso destacar a interação deste nutriente com outros cátions normalmente presentes na solução, tais como  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , durante o processo de absorção (Figura 4.1).

Sob condições de reduzida taxa de nitrificação, o predomínio da forma amoniacal na solução do solo pode reduzir em cerca de 50% a absorção de potássio (Vale et al., 1988).

A interação entre cátions é tão importante que merece destaque o fato de que em solos mal aerados de várzeas ou sob inundação, o excesso de  $\text{Fe}^{2+}$  na solução pode inibir a absorção de  $\text{K}^+$  e causar toxicidade de ferro, distúrbio normalmente conhecido como bronzeamento. Por outro lado, o aumento na disponibilidade de potássio reduz a absorção de ferro e, portanto, a ocorrência desta desordem fisiológica.

Em termos de interação, é importante considerar também a presença dos cátions  $\text{Al}^{3+}$  em solos ácidos e do  $\text{Na}^+$  em solos salinos.

A quantidade de potássio presente na solução do solo é insuficiente, muitas vezes, para atender as exigências da cultura por mais de um dia de cultivo. Principalmente

considerando a grande exigência por este nutriente, o potássio da solução do solo tem de ser continuamente ressuprido pelo potássio da fase sólida (Figura 13.1).

Portanto, em termos práticos, o poder tampão do solo para potássio é muito mais importante para a sua disponibilidade do que a concentração deste nutriente na solução. Neste sentido, considerando a relação entre as fases sólida e líquida, o potássio trocável assume papel de destaque.

### 13.1.2. Potássio Trocável

O potássio trocável representa a fração do potássio da fase sólida capaz de prontamente ressuprir a solução do solo, à medida que a planta absorve este nutriente.

Em outras palavras, é representado pelos íons  $K^+$  adsorvidos nas cargas negativas dos colóides do solo por atração eletrostática, facilmente deslocados ou trocados por outros cátions da solução. Trata-se, portanto, de uma forma de potássio prontamente disponível às plantas, representando, do ponto de vista conceitual de disponibilidade, o fator quantidade para o potássio.

É importante destacar que as argilas do tipo 2:1 adsorvem potássio em sítios de adsorção com diferentes seletividades para este íon. A Figura 13.2, mostra os três diferentes sítios de adsorção para a illita e vermiculita, conforme proposição de Schouwenburg e Schuffelen (1963).

O potássio pode ser adsorvido na posição planar – posição “*p*” –, representada pelas superfícies externas destas argilas. Esta posição não tem especificidade para os íons  $K^+$  ou seja, o potássio compete com os demais cátions pelas cargas negativas desta posição. O potássio pode ainda ser adsorvido na posição “*e*”, referente às cargas negativas nas margens mais externas dos espaços entre as camadas e na posição “*i*”, representada pelas cargas situadas na posição interna entre as camadas. Estas duas posições, principalmente a posição “*i*”, apresentam alta seletividade para o potássio.

Desta forma, os íons  $K^+$  adsorvidos em “*p*” estão em equilíbrio com os íons  $K^+$  da solução do solo, ou seja, são trocáveis. Já a quantidade de potássio na solução do solo em equilíbrio com potássio adsorvido nas posições “*e*” e “*i*”, principalmente nesta última, é bastante baixa. Assim, nestas duas posições o potássio é considerado não-trocável.

---

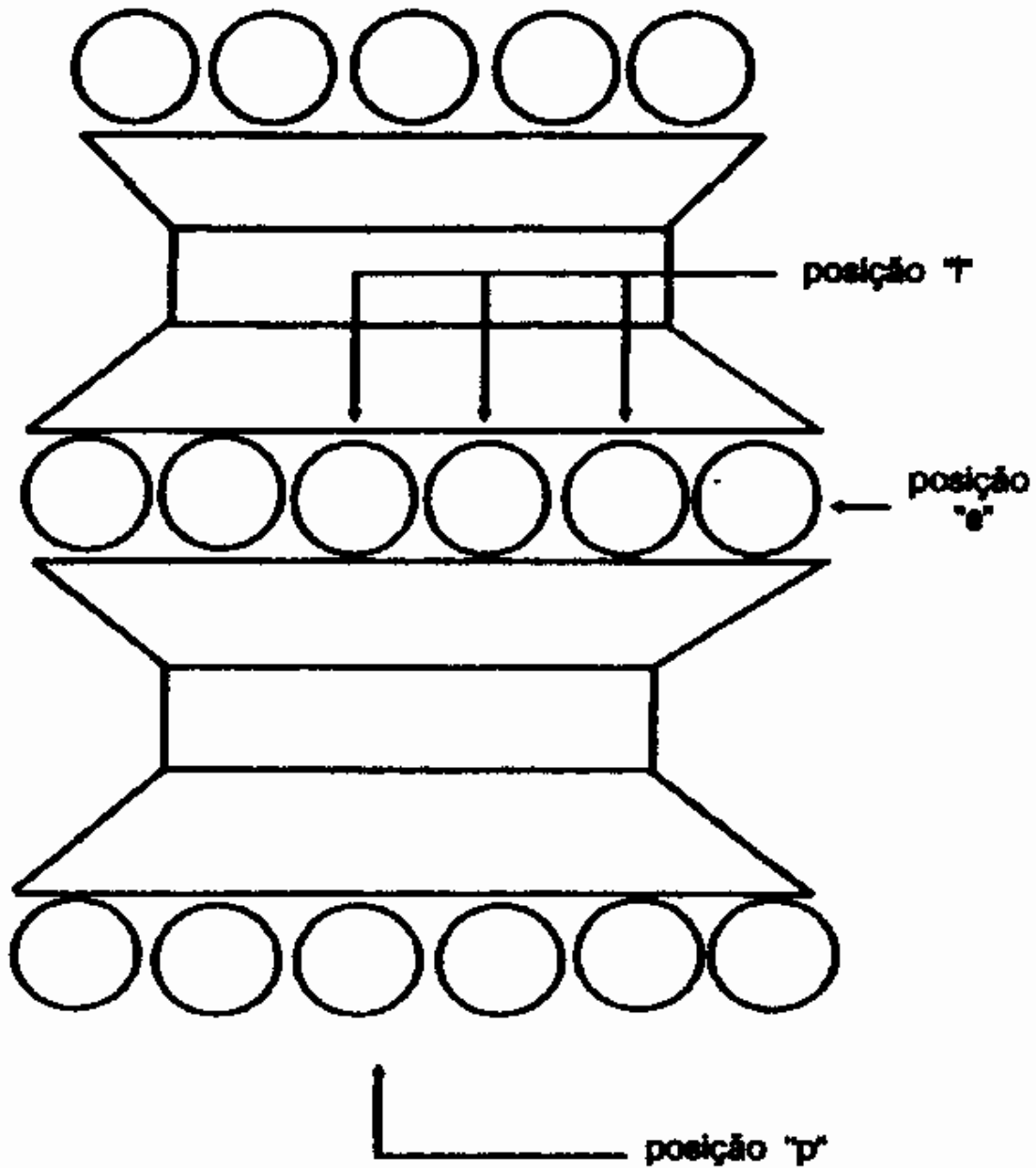


Figura 13.2. Sítios de adsorção para potássio em argilas do tipo 2:1.

Na grande maioria dos solos brasileiros, com ausência quase completa de argilas do tipo 2:1, a capacidade de adsorção de potássio é dada pelo teor de matéria orgânica, pelas argilas do tipo 1:1 e por óxidos hidratados de ferro e de alumínio. Para estes colóides, a seletividade de adsorção por íons  $K^+$  é similar àquela dos sítios da posição "p" das argilas do tipo 2:1 (Ehlers et al., 1968). Nestes casos, o potássio é adsorvido fracamente, podendo ser facilmente substituído por outros cátions, tais como  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ .

Em solos de clima temperado, o potássio trocável usualmente representa menos de 1% do potássio total do solo. Por outro lado, em solos tropicais, que na sua maioria só contém colóides orgânicos, caulinita e óxidos hidratados de ferro e de alumínio como materiais responsáveis pela capacidade de retenção de cátions, o potássio trocável pode representar até 10% do potássio total (Prezotti e Defelipo, 1987).

Sem dúvida, na grande maioria dos nossos solos, o potássio trocável é a principal forma responsável pelo suprimento deste nutriente às plantas. É facilmente determinado através do uso de soluções salinas, de ácidos diluídos ou de resina trocadora de íons.

Uma saturação de potássio entre 3 a 5% da CTC a pH 7,0 tem sido tomada como ideal para o crescimento da maioria das espécies em nossas condições.

### 13.1.3. Potássio Não-Trocável

Devido ao raio iônico dos íons  $K^+$  ser praticamente do tamanho do espaço existente entre as camadas de argilas do tipo 2:1, notadamente, de illita e vermiculita, os sítios de adsorção representados pelas cargas negativas situadas na posição interna – posição “i” – apresentam elevada especificidade ou seletividade para o potássio.

Assim sendo, adição de potássio a solos com predomínio destas argilas resulta numa forte adsorção dos íons  $K^+$  nesta posição, num processo denominado de fixação de  $K^+$ . Os íons  $K^+$  fixados são considerados como não-trocáveis.

Na verdade, como os íons  $NH_4^+$  e  $H^+$  apresentam raio iônico muito similar ao  $K^+$ , ambos competem com  $K^+$  pelos sítios de adsorção internos (Bartlett e Simpson, 1967). Neste sentido, o teor de K não-trocável normalmente é determinado com extrator ácido concentrado –  $HNO_3$  1N.

Embora a reserva de K não-trocável não seja prontamente disponível, esta pode vir a exercer importante papel no suprimento de  $K^+$  às plantas a médio/longo prazo, após esgotamento do K trocável. Com o abaixamento da concentração de potássio na solução do solo e aumento da concentração de íons  $H^+$  – exsudados pela raiz com a absorção de  $K^+$  – aumenta a liberação do nutriente fixado, em troca com os íons  $H^+$ .

A contribuição do potássio não-trocável para a nutrição das plantas só ocorre após sensível redução da reserva de potássio trocável e, logicamente, é mais significativa em solos menos intemperizados e em horizontes sub-superficiais.

Contudo, no Brasil, mesmo para solos mais intemperizados, tem-se observado significativa contribuição de potássio não-trocável para a nutrição das plantas. Por exemplo, a falta de resposta da soja à adubação potássica em solo com baixo teor de K trocável foi demonstrada por Rosolem et al. (1988) como sendo devida à significativa contribuição de formas não-trocáveis do nutriente. Ainda, merecem destaque estudos de Rajj e Quaggio (1984), mostrando que amostras de solos do horizonte B são mais importantes que a camada arável em liberar potássio não-trocável.

---

#### 13.1.4. Potássio Mineral

O potássio mineral representa o potássio estrutural, ou seja, o potássio como constituinte de minerais primários. A liberação do potássio mineral para a solução do solo ocorre através da intemperização dos minerais primários, caracterizando-se por um processo relativamente lento (Figura 13.1). De qualquer forma, trata-se da principal fonte de potássio para as plantas crescendo sob condições naturais.

Os mais importantes minerais primários potássicos são as micas e os feldspatos. O conteúdo de potássio no ortoclásio e microclina é cerca de 16 % de  $K_2O$ , enquanto que na biotita é de 8,2% e na muscovita 10,5%.

A biotita, com as três posições octaedrais ocupadas por cátions tais como  $Mg^{2+}$  e  $Fe^{2+}$ , o primeiro facilmente hidrolizável e o segundo facilmente oxidável, decompõe-se com maior facilidade, liberando mais rapidamente o potássio existente entre as camadas de silicatos. Assim, os solos que se originam de rochas ricas em biotita raramente são deficientes em potássio. A sequência de liberação de potássio, em ordem decrescente, usualmente segue a ordem biotita > flogopita > muscovita > microclina > ortoclásio.

A capacidade natural de suprimento de potássio depende diretamente do material de origem e do grau de intemperização do solo. Nos mais intemperizados, como a maioria dos solos cultivados no Brasil, há uma tendência de, mesmo naqueles formados de rochas ricas em biotita, não se detectar mais este mineral primário nas frações silte e areia. Na verdade, Ricci et al. (1989), estudando diversos solos de Minas Gerais, observaram que as frações areia e silte mostraram-se, de maneira geral, muito pobres em minerais potássicos primários. O quartzo foi o único mineral encontrado na fração areia.

De qualquer forma, o conhecimento da mineralogia das frações silte e areia é de grande importância, uma vez que nelas se encontram minerais que constituem a fonte natural de potássio para as plantas. Dados de levantamentos de solos são, portanto, muito importantes para se avaliar minerais potássicos, notadamente a maiores profundidades no solo.

#### 13.1.5. Potássio Lixiviado

O potássio lixiviado não representa uma forma de potássio propriamente dita, mesmo porque pode tratar-se de potássio em solução, potássio trocável ou não-trocável. Apenas, refere-se ao potássio removido para camadas mais profundas, com o movimento descendente da água.

Dentro da dinâmica do potássio no solo (Figura 13.1), é muito importante destacar a possibilidade de sua movimentação para camadas do solo fora do alcance das raízes. Isto porque, a lixiviação de potássio pode representar perdas deste nutriente, ou seja, diminuição da eficiência da adubação potássica.

A quantidade de potássio que lixivia para abaixo da camada do solo ocupada pelas raízes depende do volume de água percolada, da concentração deste nutriente na solução do solo, da CTC do solo, do tipo de ânions presentes na solução, da cobertura

---

vegetal e do método de aplicação do potássio.

Em solos de baixa CTC, o potássio aplicado tende a permanecer em grande parte na solução do solo, aumentando as chances de perda por lixiviação, com a água de percolação. Souza et al., (1979) verificaram em um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso de cerrado que cerca de 25% dos 600 kg/ha de  $K_2O$  incorporados na camada de 0-10 cm na forma de KCl, deslocou-se para a camada abaixo de 30 cm de profundidade, durante o ciclo de uma cultura de milho. Sem dúvida, trata-se de uma adubação pesada, o que acarreta uma maior concentração de potássio na solução. Mas, de qualquer forma, a magnitude da lixiviação de potássio é um indicador do potencial de perdas deste nutriente.

Os principais ânions que acompanham os cátions, dentre os quais o potássio, na descida através do perfil do solo são o nitrato, cloreto e o sulfato. A lixiviação de potássio será tanto maior quanto mais expressiva for a presença, em solução, de ânions com menor capacidade de adsorção, lembrando que tem-se no solo a seguinte ordem preferencial de adsorção:  $H_2PO_4^- > SO_4^{2-} > NO_3^- \cong Cl^-$ .

Estudando a distribuição do potássio no perfil de um solo Podzólico Vermelho-Amarelo, Sanzonowicz e Mielniczuk (1985) observaram que o nutriente, quando aplicado na forma de KCl – praticamente único fertilizante potássico encontrado no mercado –, sofreu maior lixiviação do que quando aplicado na forma de  $K_2SO_4$  ou de  $KAlSiO_4$  (Figura 13.3). A kalsilita ( $KAlSiO_4$ ) além de apresentar baixa solubilidade em água contém o ânion  $SiO_4^{4-}$ , que é mais fortemente adsorvido do que o próprio  $H_2PO_4^-$ .

O método de aplicação dos fertilizantes potássicos também pode influir na lixiviação deste nutriente. A aplicação no sulco faz com que o potássio fique concentrado numa pequena porção do solo, mantendo alta concentração na solução e, por conseqüência, favorecendo a lixiviação. Quando a aplicação é feita a lanço – potassagem – o maior contato do potássio com o solo favorece a sua adsorção, reduzindo, dessa forma, a lixiviação (Ritchey, 1982; Sanzonowicz e Mielniczuk, 1985).

As perdas de potássio por lixiviação podem ser reduzidas através do uso de fertilizantes menos solúveis e/ou contendo ânions pouco móveis no solo; através de aplicação a lanço, quando se tratar da necessidade de uso de maiores doses; e através do aumento da CTC do solo pela calagem ou pela adição de resíduos orgânicos ao solo.

---

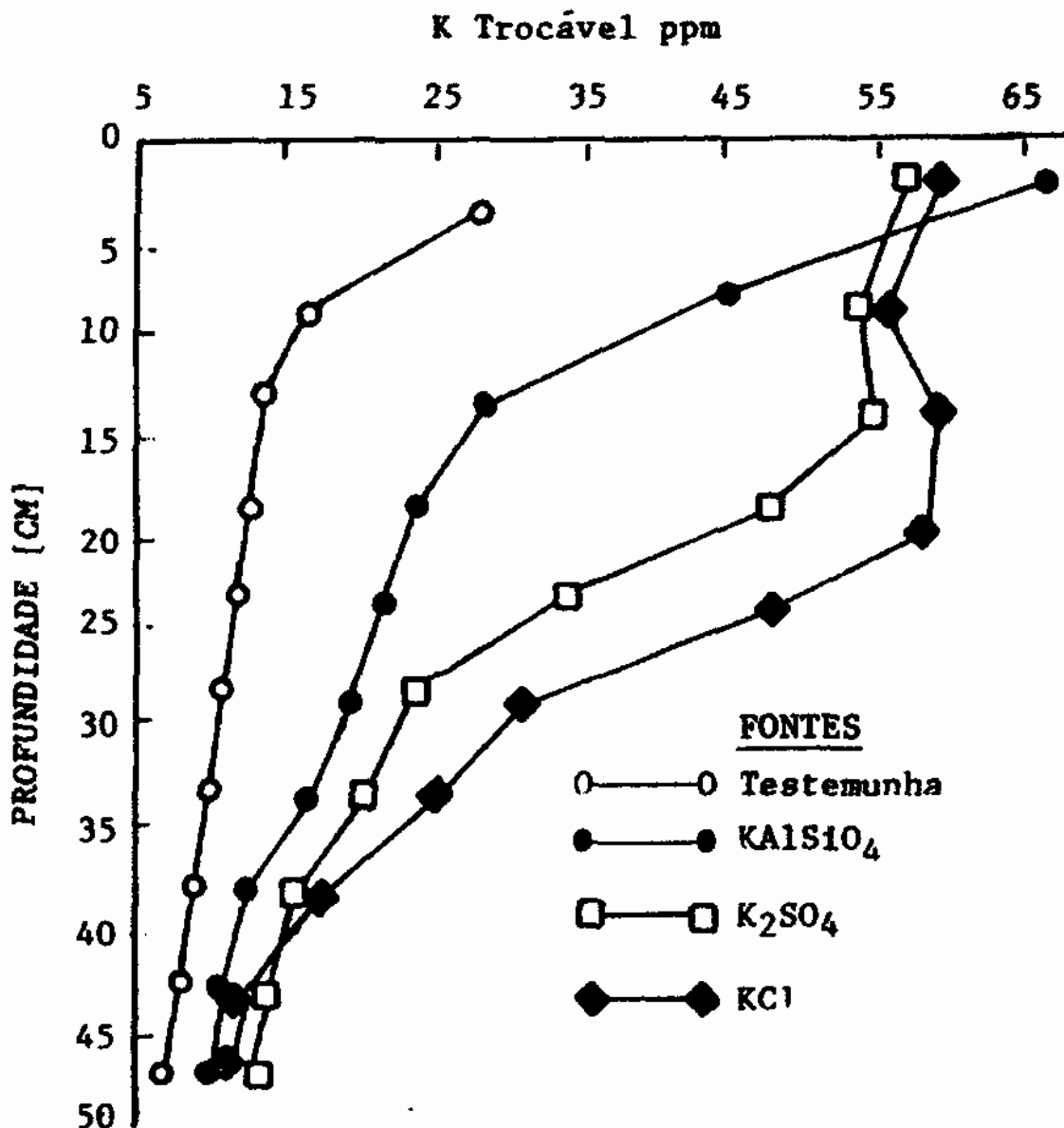


Figura 13.3. Valores de K trocável no perfil do solo, amostrado 150 dias após a aplicação de 0 e 300 kg/ha de K, na forma de KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e KAlSiO<sub>4</sub>.

### 13.2. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO NO SOLO

Na maioria dos países, o potássio trocável – extraído com acetato de amônio 1 N – tem sido o índice mais utilizado para avaliar a disponibilidade do nutriente no solo para as plantas.

No Brasil, dado a pouca contribuição de formas não-trocáveis para a maioria dos solos, o teor de potássio trocável é um parâmetro bastante adequado para avaliar a disponibilidade deste nutriente.



Considerando a facilidade de desorção do potássio trocável, soluções salinas e de ácidos diluídos são usadas com igual sucesso na determinação do teor de K trocável. No Brasil tem sido mais usado o extrator Mehlich – HCl 0,05 N + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 N –, também usado como extrator de fósforo.

No caso do uso do extrator Mehlich ou, até mesmo de soluções salinas, o nível crítico para potássio tem situado na faixa de 80 a 100 mg/dm<sup>3</sup>. Todavia, há estudos cujos resultados sugerem a necessidade de inclusão de fatores do solo, principalmente da CTC, nas interpretações das análises de solo para fins de recomendação de adubação potássica (Silva e Meurer, 1988). O estudo destes autores, conduzido em casa de vegetação, permitiu a definição de três grupos de CTC – menor que 5 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>, entre 5 e 9 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> e maior que 9 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> –, os quais proporcionaram o rendimento máximo de matéria seca de trigo com teores de K trocável de 85, 115 e 156 mg/dm<sup>3</sup> de solo, respectivamente.

Para a maioria dos solos brasileiros, com valores de CTC normalmente abaixo de 5 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>, a inclusão da CTC não deve contribuir significativamente para melhorar a recomendação de adubação potássica. Porém, solos com maior CTC, notadamente com elevado teor de argilas do tipo 2:1, realmente podem ter nível crítico de potássio mais elevado. Uma outra condição passível de ocorrência, seria quando do uso de grandes quantidades de matéria orgânica na adubação, o que pode, com o tempo, promover uma elevação substancial da CTC do solo e, conseqüentemente, do nível crítico de potássio. Tal situação parece ser responsável pelo aparecimento de deficiência em cafezais bem adubados do Sul de Minas Gerais, onde o teor de K<sup>+</sup> na análise de solo ultrapassa 150 mg/dm<sup>3</sup>, mas os valores de CTC são superiores a 10 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>.

Deve-se ressaltar que a camada arável pode representar muito pouco para avaliar a disponibilidade de potássio, em função do processo de lixiviação deste nutriente. Portanto, não havendo qualquer restrição ao crescimento das raízes em profundidade, as plantas podem buscar grande parte do potássio em profundidade, abaixo da camada arável.

Não se deve esquecer também da possibilidade de contribuição do K não-trocável – K fixado – e, até mesmo, do K mineral para a nutrição das plantas. Quando esta contribuição é mais significativa, o teor de potássio trocável pode dizer muito pouco sobre a disponibilidade do nutriente. Tal contribuição tende a ser maior em camadas mais profundas.

### 13.3. ADUBAÇÃO POTÁSSICA CORRETIVA

Devido à baixa disponibilidade de potássio em muitos solos, pode ser viável proceder a uma adubação potássica corretiva, à lanço, visando uma rápida correção dessa deficiência.

Uma das proposições para cálculo da quantidade de K<sub>2</sub>O a ser aplicada, refere-se ao cálculo da dose visando atingir 3 a 5% da CTC a pH 7,0 saturada em íons K<sup>+</sup> (Lopes e

Guilherme, 1992). Para facilidade no cálculo, deve-se lembrar que para se elevar o teor de potássio no solo em  $0,1 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$  tem-se que aplicar  $9,4 \text{ kg}$  de  $\text{K}_2\text{O}/\text{ha}$  a lanço e incorporá-lo na camada de  $0\text{-}20 \text{ cm}$ . Assim, por exemplo, num solo com T igual a  $6,0 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$  e com potássio disponível igual a  $0,1 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ , tem-se que aplicar  $313 \text{ kg}/\text{ha}$  de KCl para atingir 5% de T saturada com potássio.

A recomendação para adubação corretiva com potássio para a soja, de acordo com análise do solo, é apresentada no Quadro 13.1 (Sousa et al., 1989).

A adubação corretiva total com potássio, portanto, deve ser feita apenas em solos com teor de argila acima de 20%. Uma outra alternativa apresentada no Quadro 13.1 é a adubação corretiva gradual, que consiste de aplicações anuais no sulco de plantio, em quantidades superiores à adubação de manutenção. Com isto, espera-se que, após um período máximo de cinco anos, o solo esteja com o nível de potássio próximo ao suficiente, ou seja,  $50 \text{ mg K}/\text{dm}^3$  para solos com teor de argila acima de 20% e/ou CTC potencial acima de  $4 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$  (Sousa et al., 1989).

**Quadro 13.1. Interpretação da disponibilidade de potássio e recomendação de adubação corretiva total a lanço e adubação corretiva gradual no sulco de plantio em solos dos cerrados.**

Teor de K ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ )	Interpretação	Corretiva total .....Kg $\text{K}_2\text{O}/\text{ha}$ .....	Corretiva gradual
.....Teor de argila abaixo de 20%.....			
< 15	Baixo	-	$70^2$
16 a 30	Médio	-	60
> $30^1$	Bom	-	0
.....Teor de argila acima de 20%.....			
> 25	Baixo	100	70
26 a 50	Médio	50	60
> $50^1$	Bom	0	0

<sup>1</sup> Após atingir o nível do potássio extraível acima desse valor, recomenda-se uma adubação de manutenção de 20 quilos de  $\text{K}_2\text{O}$  para cada tonelada de grãos de soja que se espera produzir.

<sup>2</sup> Recomenda-se parcelar a aplicação

Todavia, mesmo em solos arenosos, apesar da maior probabilidade de perdas de potássio por lixiviação, a adubação potássica corretiva se apresenta com grande potencial (Oliveira, 1985), conforme mostra o Quadro 13.2.

**Quadro 13.2. Produção de grãos de soja para diferentes modos de adubação potássica, em um solo arenoso da região de Barreiras-BA.**

Dose de Potássio (kg K <sub>2</sub> O/ha)	Modo de Aplicação	Produção de Grãos (kg/ha)
0	-	2252
60	No sulco de plantio	2618
60	À lanço antes do plantio	2881
60	No sulco (½ plantio + ½ cobertura)	2979

A aplicação do potássio em solos arenosos e mesmo em solos argilosos de cerrado com baixa CTC, preferencialmente, deve ser feita a lanço, na forma de potassagem corretiva, ou, aplicada de forma parcelada pelo menos a metade no plantio e o restante em cobertura junto com o nitrogênio. Essa recomendação faz sentido, principalmente, para aplicação de potássio em quantidade acima de 60 kg K<sub>2</sub>O/ha. A aplicação de grandes quantidades de potássio, distribuído num restrito volume de solo, aumenta a probabilidade de perdas por lixiviação. Ademais, pelo elevado índice salino do KCl, aumenta os danos às sementes pela salinidade, o que resulta em uma menor população de plantas.

**13.4. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE POTÁSSIO NA ADUBAÇÃO**

Conforme foi visto, é possível decidir-se pela adubação de potássio através da potassagem corretiva, o que poderia dispensar a adubação de plantio por um ou mais cultivos. Entretanto, o mais comum para o potássio são as adubações de plantio ou de manutenção, levando-se em conta a disponibilidade desse nutriente no solo e a produtividade esperada.

Como exemplo para definição da dose de potássio, veja-se a indicação da CFSEMG (1999) para a cultura do milho na adubação de plantio (Quadro 13.3).

**Quadro 13.3. Quantidades de potássio para adubação do milho no estado de Minas Gerais em função da produtividade esperada.**

Interpretação da disponibilidade de K no solo <sup>*</sup>	Produtividade esperada (t/ha)		
	4-6	6-8	> 8
	.....kg K <sub>2</sub> O/ha.....		
Baixa	50	70	90
Média	40	60	80
Boa	20	40	60

\* Para interpretação da disponibilidade vide Quadro 5.4.

Por sua vez, para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, Siqueira et al. (1989) recomendam as seguintes quantidades de potássio para o plantio de milho (Quadro 13.4).

**Quadro 13.4. Quantidades de potássio para a adubação do milho nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, para uma produtividade de 6 t/ha.**

Interpretação de K no solo <sup>*</sup>	Teor de K (mg/dm <sup>3</sup> )	Cultivo		
		1 <sup>o</sup>	2 <sup>o</sup>	3 <sup>o</sup>
		.....kg K <sub>2</sub> O/ha.....		
Limitante	0-20	130	80	60
Muito Baixo	21-40	100	60	R**
Baixo	41-60	70	R	R
Médio	61-80	40	R	R
Suficiente	81-120	20	R	R
Alto	> 120	≤ 20	≤ R	R

\* Para interpretação da disponibilidade vide Quadro 5.8.

\*\* Valor R (Reposição): < 3 t/ha = 30 kg K<sub>2</sub>O/ha; 3-6 t/ha = 60 kg K<sub>2</sub>O/ha; > 6 t/ha = 100 kg K<sub>2</sub>O/ha.

A consulta também ao boletim do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Quadro 13.4), e não apenas ao de Minas Gerais (Quadro 13.3), proporciona ao técnico novos elementos para uma melhor definição da quantidade de potássio a aplicar, assim como já observado para o fósforo.

O sistema de adubação proposto para esses dois estados (Siqueira et al., 1989) aplica-se para uma sucessão de três cultivos, no caso de culturas anuais. Desta forma,

tanto para fósforo quanto para potássio, incorporou-se ao sistema de recomendação, o aproveitamento do efeito residual dos fertilizantes bem como o aproveitamento de nutrientes reciclados ao solo via palhada. Essa é a razão básica da redução na quantidade recomendada com o suceder dos cultivos. Por exemplo, a título de ilustração, para a produção de 5 t/ha de grãos de milho, há uma retirada de cerca de 125 kg K<sub>2</sub>O/ha do solo (Quadro 9.2). Portanto, para um solo com menos de 20 mg K/dm<sup>3</sup> de solo, há necessidade de se aplicar 130 kg de K<sub>2</sub>O/ha para o milho em primeiro cultivo (Quadro 13.4). Todavia, como 60% do potássio encontra-se na palhada e 40% nos grãos, cerca de 80 kg K<sub>2</sub>O/ha pode retornar ao solo com a incorporação da palhada, tornando-se disponível, em parte, para o cultivo seguinte.

No sistema de adubação proposto para o RS e SC, está implícito que o resultado da análise do solo poderia servir para realizar a recomendação de adubação de até três cultivos sucessivos. A partir daí, apenas uma nova análise do solo poderia especificar qualquer alteração ocorrida na disponibilidade dos nutrientes.

Há estudos cujos resultados sugerem a necessidade da inclusão da CTC nas interpretações das análises de solo para fins de recomendação de adubação potássica (Silva e Meurer, 1988). Neste sentido, Silva et al. (1995) sugerem o uso da CTC a pH 7,0 na definição da quantidade de potássio a ser aplicada para o algodoeiro (Quadro 13.5).

**Quadro 13.5. Quantidades de potássio na adubação de plantio do algodoeiro, para uma produtividade ao redor de 2 t/ha de algodão em caroço.**

K trocável (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	CTC a pH 7,0 (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )		
	0-4	4,1-8,0	> 8,0
	.....kg K <sub>2</sub> O/ha.....		
0-0,07	60	60*	80*
0,08-0,16	60	60	60*
0,16-0,30	40	60	60
0,31-0,60	20	40	60
> 0,60	20	20	40

\* Complementar com cobertura de 25 kg K<sub>2</sub>O/ha, 30 a 40 dias após a emergência das plantas, logo após o desbaste, isto é, junto com a adubação de cobertura nitrogenada.

## 13.5. FERTILIZANTES POTÁSSICOS

### 13.5.1. Cloreto de Potássio

O cloreto de potássio é extraído diretamente de depósitos naturais, com pureza variada – presença de cloretos e sulfatos de sódio, magnésio e cálcio. Por tratamentos

apropriados, obtém-se um fertilizante com alto grau de pureza, contendo cerca de 60% de  $K_2O$ . No Brasil, a principal jazida de KCl localiza-se no município de Carmópolis, em Sergipe.

O KCl é de longe o fertilizante potássico mais usado no Brasil, tanto como fertilizante simples quanto para preparo de formulados sólidos e líquidos. Suas desvantagens estão relacionadas com o índice salino (vide Quadro 10.3) e com a presença do cloreto, que é tido como indesejável para a qualidade de certos produtos – por exemplo, fumo e batata.

### **13.5.2. Sulfato de Potássio**

O sulfato de potássio, contendo cerca de 50% de  $K_2O$ , apresenta as vantagens da presença de 17% de enxofre e da menor salinidade. Pelo custo e disponibilidade no mercado, seu uso fica quase que restrito em algumas situações como no cultivo de fumo, batata e citros. No cultivo de espécies sensíveis à salinidade (vide Quadro 10.4), essa fonte pode ser preferida em relação ao cloreto de potássio.

### **13.5.3. Nitrato de Potássio**

O nitrato de potássio, já descrito nos fertilizantes nitrogenados, é outro fertilizante potássico que tem tido seu uso ampliado no mercado, basicamente, pelos problemas de salinidade e toxidez do cloreto para algumas espécies vegetais.

---

Apesar de ser um nutriente bastante exigido pelas plantas, sendo o terceiro em exigência, a deficiência de cálcio não é muito comum, mesmo em solos ácidos ou solos arenosos.

Todavia, para várias espécies tais como tomate, repolho, beterraba, aipo, citros, maçã, amendoim e batata pode haver necessidade de adubações específicas com cálcio, por tratarem-se de espécies muito exigentes neste nutriente.

Merece destaque especial a importância que o cálcio desempenha no crescimento radicular, através de seu papel na divisão e alongação das células. Trata-se do único nutriente, cujo suprimento externo às raízes é crucial para o crescimento das mesmas. Portanto, em solos altamente intemperizados e ácidos o crescimento radicular pode ser grandemente reduzido, principalmente abaixo da camada arável, devido a baixa disponibilidade de cálcio.

A limitação imposta ao enraizamento profundo, em parte devido a deficiência de cálcio, tem sido citada como um dos grandes desafios a serem vencidos no manejo da fertilidade do solo para obtenção de maiores produtividades em solos ácidos do Brasil.

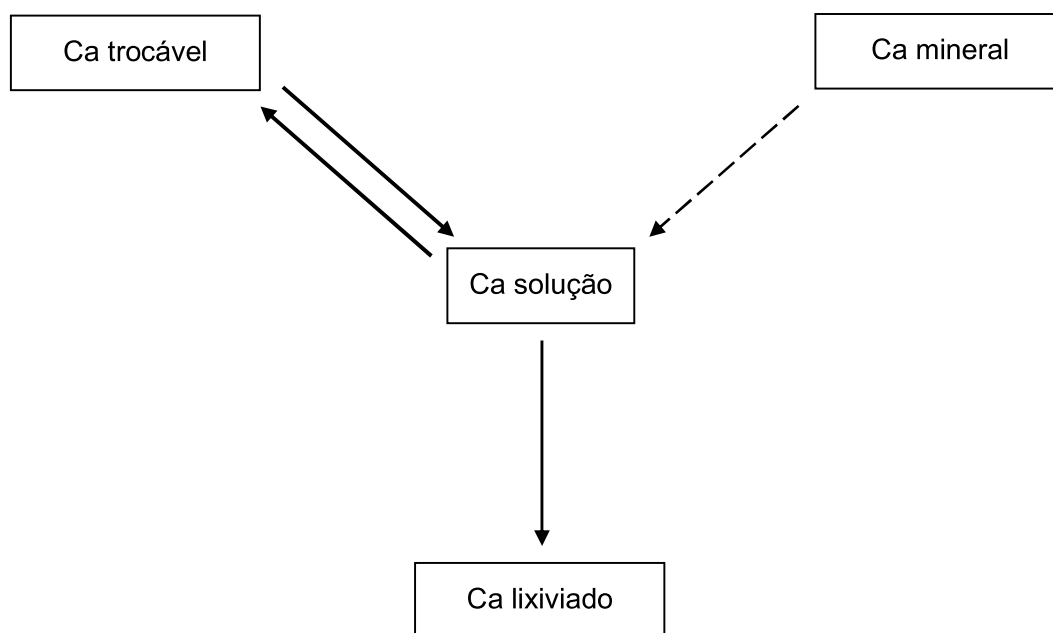
O cálcio ocorre no solo apenas na forma catiônica de  $\text{Ca}^{2+}$ , apresentando uma dinâmica muito simples, à semelhança do que é observado para  $\text{K}^+$  e  $\text{Mg}^{2+}$ .

Quando há necessidade, a aplicação de cálcio no solo está, normalmente, ligada a prática da calagem. Em situações em que o cálcio é requerido sem a necessidade de corrigir a acidez do solo, fertilizantes específicos podem ser usados.

#### **14.1. FORMAS E DINÂMICA DO CÁLCIO NO SOLO**

Na Figura 14.1 é mostrada a dinâmica deste nutriente com a interrelação entre as diversas formas.

---



**Figura 14.1. Representação simplificada das formas de cálcio no solo e da sua dinâmica. O tracejado representa uma liberação muito mais lenta do cálcio.**

#### 14.1.1. Cálcio na Solução

O cálcio, exceto em solos altamente intemperizados e ácidos, apresenta-se na solução do solo em concentrações relativamente elevadas. Em média, a concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  é cerca de dez vezes maior que a de  $\text{K}^+$ , muito embora o cálcio seja bem menos absorvido pelas plantas do que o potássio.

O fator transporte praticamente não exerce qualquer efeito na disponibilidade de cálcio. Isto porque, na quase totalidade dos solos cultivados, aqui incluídos os solos ácidos devidamente corrigidos com a calagem, a quantidade de cálcio requerida pelas plantas pode ser suficientemente transportada por fluxo de massa. Isto, sem contar a contribuição da interceptação radicular, que, quando a concentração de cálcio é mais elevada, pode contribuir em muito para a aquisição deste nutriente.

É evidente que, sob menor disponibilidade de cálcio no solo, com o cultivo de espécies muito exigentes, a disponibilidade pode depender da difusão. Nesta situação, principalmente em períodos de grande exigência, pode haver necessidade de adubação com cálcio. Não se deve esquecer que o cálcio é praticamente imóvel na planta, portanto, um contínuo suprimento é essencial.

Neste sentido, sob condições mais úmidas e com baixa taxa de transpiração dos frutos, ou baixo teor de água no solo, salinidade e/ou elevada concentração de cátions competidores com o cálcio na absorção, são comuns os sintomas de deficiências em



cálcio, aparecendo as conhecidas desordens fisiológicas, por exemplo, em maçã, tomate, pimentão, cenoura, aipo e melancia.

A disponibilidade de cálcio, com enfoque para o processo de sua absorção, é muito afetada por outros cátions normalmente presentes na solução do solo, tais como  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$  e  $Al^{3+}$  em solos ácidos, e  $Na^+$  em solos salinos.

Uma relação cálcio/total de cátions na solução de 0,10 a 0,15 é a desejada para o crescimento de raízes de algodão, enquanto a alongação de raízes de soja ocorre na taxa máxima quando a relação é de 0,10 a 0,20 (Lund, 1970). Por sua vez, desordens fisiológicas em tomate, são evitadas com a manutenção desta relação na solução entre 0,16 e 0,20.

A absorção de  $Ca^{2+}$  sofre inibição competitiva com  $NH_4^+$ , o qual é rapidamente absorvido pelas plantas. Neste caso, o  $Ca^{2+}$  sofre competição com o  $NH_4^+$  propriamente dito e com os íons  $H^+$  liberados com a absorção desta forma nitrogenada. Portanto, sob condições de reduzida taxa de nitrificação, o uso de fertilizantes amoniacais pode induzir a deficiência de cálcio, notadamente para as espécies mais exigentes neste nutriente.

Conforme destacado no Capítulo 6, o alumínio afeta grandemente a aquisição de cálcio pelas plantas. A absorção de cálcio pelas plantas é quase que restrita à região apical da raiz, ou seja, à porção da raiz sem endoderme suberizada. Esta é a parte da raiz mais afetada pelo alumínio, de forma que a absorção de cálcio é influenciada, não por competição direta mas por alterações na região da raiz capaz de absorver este nutriente.

#### 14.1.2. Cálcio Trocável

Assim como acontece com os demais cátions, o cálcio da solução do solo está em equilíbrio dinâmico com o cálcio trocável, ou seja, com o cálcio adsorvido nos colóides orgânicos ou inorgânicos (Figura 14.1.). Se a atividade do cálcio decresce em solução – através da absorção pelas plantas ou da lixiviação – há um deslocamento de íons  $Ca^{2+}$  da fase sólida para a fase líquida. Por outro lado, se a atividade de na solução aumenta – através da calagem ou adubação – há uma adsorção dos íons  $Ca^{2+}$  pelos colóides.

Nenhuma argila apresenta sítios seletivos de adsorção para cálcio, portanto, os íons  $Ca^{2+}$  são igualmente adsorvidos a despeito da mineralogia do solo. Por se tratar de cátion divalente e com pequeno raio de hidratação, o cálcio é fortemente adsorvido pelos colóides, muito mais fortemente que  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Na^+$  e  $Mg^{2+}$ .

A ligação de adsorção do cálcio aos colóides orgânicos, principalmente aos ácidos húmicos, é mais específica do que para os demais cátions macronutrientes.

O complexo de troca de cátions do solo dominado pelo  $Ca^{2+}$  está, normalmente, associado com maiores produtividades. A maioria das espécies, exceto aquelas adaptadas a solos ácidos, respondem a adubação com o nutriente quando a saturação de  $Ca^{2+}$  está abaixo de 25%. Uma alta saturação de cálcio é indicativo de prevalecer no solo uma faixa de pH ideal, baixa concentração ou ausência de alumínio em solos ácidos e baixa concentração de sódio em solos salinos.

---

O tipo de argila influencia a disponibilidade de cálcio. As argilas do tipo 2:1 requerem uma saturação de cálcio de 70 a 80% para liberar este nutriente suficientemente para a solução do solo. As argilas do tipo 1:1 e os óxidos de ferro e de alumínio, por outro lado, satisfazem os requerimentos de cálcio da maioria das plantas, com saturação entre 40 e 50%. Em termos práticos, pode-se considerar como ideal para a maioria dos nossos solos e das espécies cultivadas uma saturação entre 50 e 70%. Dependendo da espécie, considerando sua resistência a solos ácidos, pode-se ter crescimento muito satisfatório com saturações bem abaixo de 50%.

Em solos que não contém minerais primários capazes de liberar  $\text{Ca}^{2+}$ , como é o caso de muitos solos ácidos e intemperizados do Brasil, o suprimento de cálcio para a solução do solo e, conseqüentemente, para as plantas, fica totalmente na dependência da quantidade de cálcio trocável.

### 14.1.3. Cálcio Mineral

A anortita –  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  – é o mais importante mineral primário contendo cálcio. A augita e hornblenda também são comuns e contém cálcio. Pequenas quantidades de cálcio também podem originar-se da biotita, apatita e certos borossilicatos.

A calcita normalmente é o mineral dominante como fonte de cálcio em solos de regiões áridas e semi-áridas. Nestas condições, a dolomita e gesso também podem se fazer presentes. Os solos dessas regiões geralmente são ricos em cálcio, como resultado da baixa precipitação e, conseqüentemente, da baixa lixiviação.

Deve-se ressaltar que através das práticas de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva com fosfato natural está-se aplicando ao solo formas de cálcio mineral.

O cálcio é liberado lentamente para a solução (Figura 14.1.) a partir do momento em que os minerais primários citados sofrem intemperização ou decomposição no solo. O aumento da atividade de íons  $\text{H}^+$  na solução e também de agentes quelantes acelera o processo de intemperização dos minerais cálcicos.

A decomposição dos carbonatos é muito dependente da produção de  $\text{CO}_2$  no solo. A calcita é um mineral de baixa solubilidade. Todavia, na presença de  $\text{CO}_2$ , forma-se carbonato ácido de cálcio, que é muito mais solúvel (Reação 14.1).



Em solos formados de rochas com baixo teor de minerais primários contendo cálcio ou em solos altamente intemperizados, a contribuição do cálcio mineral é muito restrita. A menos que, conforme já enfatizado, alguns dos minerais citados sejam adicionados ao solo.

---

#### 14.1.4. Cálcio Lixiviado

O cálcio lixiviado não representa uma forma de cálcio propriamente dita, mesmo porque pode tratar-se de cálcio em solução ou de cálcio trocável. Apenas, refere-se ao cálcio removido para camadas mais profundas, com a percolação de água.

Como o cálcio é mais fortemente adsorvido que amônio, potássio e magnésio, sua lixiviação não é tão intensa e, na verdade, não chega a ser preocupante em termos de perdas.

De qualquer forma, dentro da dinâmica do cálcio no solo (Figura 14.1), é muito importante destacar a possibilidade de sua movimentação para camadas abaixo da camada arável. Isto porque, o enriquecimento de camadas mais profundas com cálcio – via gessagem, por exemplo – pode ser de grande importância para o enraizamento em profundidade, quando se trata de solos altamente intemperizados e ácidos (vide Quadro 8.3).

A lixiviação do cálcio para camadas mais profundas no solo depende do volume de água percolada, da concentração deste nutriente na solução do solo, da CTC do solo, do tipo de ânion presente na solução e da concentração de  $\text{CO}_2$  no solo.

Conforme já discutido para potássio, a lixiviação de cálcio será tanto maior quanto maior for a presença na solução de ânions com menor capacidade de adsorção, de acordo com a ordem:  $\text{H}_2\text{PO}_4^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- \cong \text{Cl}^-$ .

Finalmente, destaca-se o papel da concentração ou pressão parcial de  $\text{CO}_2$  no solo na lixiviação de cálcio através da formação de  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  em solos contendo  $\text{CaCO}_3$  livre, conforme destacado na reação 14.1. O  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  é muito mais solúvel que  $\text{CaCO}_3$  e pode movimentar-se mais em profundidade. Na verdade, mesmo em solos com apenas  $\text{Ca}^{2+}$  livre na solução pode-se formar  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . As principais fontes de  $\text{CO}_2$  para o solo são a água da chuva, a exsudação radicular e, de grande importância, a matéria orgânica através de sua decomposição (vide reação 6.1).

Portanto, a aplicação de resíduos orgânicos ao solo pode ser importante para aumentar a lixiviação de cálcio. Em solos que recebem calcário, a elevação do pH favorece a mineralização, aumentando a liberação de  $\text{CO}_2$  e, conseqüentemente, a percolação de  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  com a água. Até mais importante ainda, a combinação de calagem e incorporação de resíduos orgânicos pode promover uma significativa lixiviação de cálcio na forma de  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , devido a aceleração da nitrificação pelo aumento do pH. Em termos quantitativos, o  $\text{NO}_3^-$  desempenha um papel muito mais importante que  $\text{HCO}_3^-$  na lixiviação de cálcio.

## 14.2. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE CÁLCIO NO SOLO

Assim como acontece para o potássio, o cálcio trocável tem sido o índice mais utilizado para avaliar a disponibilidade deste nutriente no solo para as plantas.

---

A solução extratora mais comumente usada é o acetato de amônio 1 N a pH 7,0. Entretanto, outras soluções salinas, ácidos diluídos ou resina trocadora de íons resultam em resultados equivalentes. No Brasil, é muito comum a extração com KCl 1N.

A definição de níveis de fertilidade para o cálcio não tem grande importância no manejo da fertilidade do solo. Isto porque, o cálcio não recebe, normalmente, um tratamento específico em termos de adubação. A sua correção, quando exigida, é via calagem. Apenas em cultivos específicos de espécies exigentes é que a adubação com cálcio, em complementação ou não à calagem pode tornar-se uma preocupação.

A sua determinação no solo representa muito mais um indicativo adicional dos problemas inerentes à acidez do solo do que a sua disponibilidade propriamente dita. Com isto, muitos laboratórios do mundo nem determinam o cálcio, pois, se necessária a correção da acidez, este nutriente será suficientemente adicionado ao solo.

Em virtude das semelhanças na dinâmica de cálcio e magnésio e das estratégias de manejo de fornecimento, aliadas ao fato de, não raramente, o suprimento destes nutrientes ser feito utilizando uma única fonte, os itens referentes aos fertilizantes cálcicos e magnesianos e à definição da quantidade de cálcio e magnésio na adubação são tratados conjuntamente no capítulo a seguir.

---

O magnésio é pouco exigido pelas plantas, com exigência similar ao fósforo e enxofre. Com isto, considera-se que a disponibilidade de magnésio é satisfatória em boa parte dos solos e a deficiência deste nutriente não é muito comum.

Entretanto, podem surgir problemas com o suprimento de magnésio nas seguintes situações: em solos ácidos altamente intemperizados; em solos arenosos; em solos ácidos cultivados com aplicação de altas doses de calcário pobre em magnésio; em cultivo com adubações pesadas de potássio ou amônio; ou no cultivo de espécies mais exigentes em magnésio. Entre as espécies mais exigentes em magnésio, merecem destaque o milho, batata, algodão, citros e fumo.

O magnésio ocorre no solo apenas na forma catiônica de  $Mg^{2+}$  e apresenta, à semelhança do cálcio, uma dinâmica muito simples. A aplicação de magnésio no solo está, normalmente, associada à prática da calagem. Todavia, como os calcários muitas vezes apresentam baixo teor de magnésio, pode haver a necessidade de uso de fertilizantes específicos.

### **15.1. FORMAS E DINÂMICA DO MAGNÉSIO NO SOLO**

As formas e dinâmica do magnésio são apresentadas na Figura 15.1.

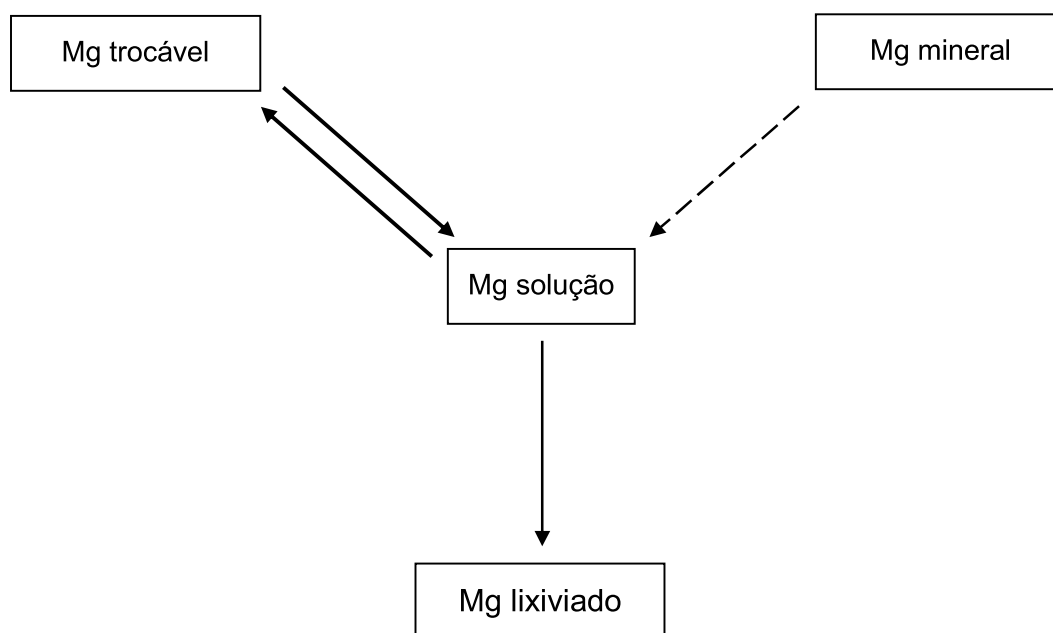
#### **15.1.1. Magnésio na Solução**

A solução do solo é a fonte imediata de magnésio para as plantas. Exceto em solos ácidos altamente intemperizados ou em certos solos arenosos, a concentração de magnésio na solução do solo é relativamente elevada.

Com isto, e em função da baixa demanda das plantas por este nutriente, o transporte de magnésio por fluxo de massa quase sempre é suficiente para atender tal demanda. Isto, em alguns casos, sem contar a contribuição da interceptação radicular.

De forma análoga ao que ocorre com o potássio e cálcio, a disponibilidade de magnésio, com ênfase para a sua absorção, é muito afetada pela presença de outros cátions na solução, tais como  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$  e  $Al^{3+}$  em solos ácidos, e  $Na^+$  em solos salinos.

---



**Figura 15.1. Representação simplificada das formas de magnésio no solo e da sua dinâmica. O tracejado representa uma liberação muito mais lenta do magnésio.**

Com respeito às interações entre cátions no solo, em termos de absorção pelas plantas, tem-se enfatizado mais a relação Ca/Mg. Existem recomendações técnicas para ajustar-se a relação Ca/Mg para valores entre 3 e 4, ou ainda, que a mesma seja de no máximo 7. Todavia, muitos resultados experimentais não sustentam tais recomendações.

Por exemplo, Quaggio et al., (1992) observaram que para a laranjeira existe forte antagonismo entre Ca e K, de forma que a relação Ca/K é importante para assegurar alta produtividade. Por outro lado, as relações Ca/Mg e Mg/K foram pouco importantes para a produtividade.

Enfim, a relação Ca/Mg parece não ser tão crítica quanto se pensava anteriormente, desde que o pH do solo esteja numa faixa adequada e não se tenha um destes dois nutrientes em valores muito reduzidos. A soja parece tolerar relações Ca/Mg no solo de até 20:1 (CFSEMG, 1999), desde que a disponibilidade de magnésio seja adequada. No caso do milho relações muito estreitas – menores que 3:1 – devem ser evitadas, porém há indicação prática de que a cultura do milho seria indiferente a relações Ca:Mg de até 10:1 (Coelho, 1994).

### 15.1.2. Magnésio Trocável

O magnésio trocável é representado pelos íons  $Mg^{2+}$  adsorvidos nas cargas negativas dos colóides do solo por atração eletrostática, facilmente deslocados ou trocados por outros cátions da solução. Trata-se, portanto, do magnésio da fase sólida

capaz de prontamente ressuprir a solução do solo, à medida que as plantas absorvem este nutriente.

O magnésio trocável normalmente perfaz de 2 a 20% do complexo de troca catiônica do solo. A percentagem de saturação de magnésio necessária para ótimo crescimento das plantas depende da natureza do solo e da espécie vegetal. Na maioria das vezes, a saturação ideal está entre 10 e 20%.

Em termos práticos, a recomendação de uso de um calcário contendo magnésio ou de uso de fertilizantes magnesianos é feita quando a percentagem de saturação de magnésio é menor do que a de potássio, quando a percentagem de saturação de magnésio é menor que 3%, ou quando o teor de magnésio trocável é menor que 0,4 cmol/dm<sup>3</sup> de solo.

### 15.1.3. Magnésio Mineral

Em solos bem menos intemperizados, o magnésio presente em minerais primários tais como biotita, dolomita, hornblenda, olivina e serpentina pode ser importante para a disponibilidade deste nutriente, muito embora a taxa de liberação seja lenta em comparação com a demanda das plantas (Figura 15.1).

Na grande maioria dos solos brasileiros, a contribuição do magnésio mineral, mais provavelmente, é irrisória. A menos que o solo sob cultivo tenha recebido grande quantidade de calcário dolomítico ou magnesiano, os quais podem ainda apresentar grande quantidade de dolomita.

### 15.1.4. Magnésio Lixiviado

O magnésio lixiviado não representa uma forma de magnésio propriamente dita. Apenas é apresentado na dinâmica do magnésio no solo (Figura 15.1), para destacar a possibilidade de lixiviação deste nutriente para camadas do solo abaixo do alcance das raízes.

Como o magnésio é menos fortemente adsorvido que o cálcio e apresenta raio iônico hidratado maior, a sua lixiviação tende a ser mais intensa que a do cálcio.

Na verdade, merece destaque o fato de que, a longo prazo, o magnésio é mais suscetível de remoção do solo do que o cálcio, tanto por lixiviação quanto por remoção nas colheitas sucessivas de grãos e frutos. Dado à baixíssima mobilidade do cálcio nas plantas, seu teor em frutos e grãos é muito baixo. A concentração de magnésio nos grãos é muito maior que a de cálcio, enquanto que nos restos vegetais, que normalmente retornam ao solo, ocorre o oposto.

Quando se compara cálcio com magnésio, é preciso considerar que a lixiviação de cálcio em solos pobres neste nutriente é desejável, no sentido de se promover maior enraizamento em profundidade no solo. A lixiviação do magnésio, por sua vez, é indesejável. Por exemplo, o uso de gesso em quantidades elevadas em solos com baixa CTC pode promover uma acentuada lixiviação de magnésio.

---

A lixiviação do magnésio para camadas mais profundas do solo depende, à semelhança do que acontece para o cálcio, do volume de água percolada, da concentração deste nutriente na solução, da CTC do solo, do tipo de ânion presente na solução e da concentração de CO<sub>2</sub> no solo.

## **15.2. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE MAGNÉSIO NO SOLO**

Assim como acontece para potássio e cálcio, a avaliação da disponibilidade de magnésio no solo é feita com base na determinação do teor de magnésio trocável. As soluções extratoras mais usadas são as mesmas já destacadas para o cálcio.

O magnésio, normalmente, também não recebe um tratamento específico em termos de recomendação de adubação. Idealmente, quando exigido, sua correção deve ser feita através da prática da calagem.

Todavia, considerando que muitos calcários disponíveis no mercado são pobres em magnésio ou, até mesmo, não apresentam este nutriente em sua composição, a definição de níveis de fertilidade para o magnésio pode tornar-se mais importante que para o cálcio (vide Quadro 5.3).

## **15.3. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE CÁLCIO E MAGNÉSIO**

O cálcio e magnésio, normalmente, não recebem um tratamento específico em termos de adubação. Isto porque, a aplicação dos mesmos, quando necessária, deve ser feita, preferencialmente via calagem, conforme ressaltado no Capítulo 7.

Apenas em cultivos específicos de espécies exigentes em cálcio e/ou magnésio, sob condições de baixa disponibilidade destes nutrientes e com impossibilidade de supri-los totalmente via calagem, é que a adubação seria necessária. Entre algumas condições, cita-se, por exemplo, certas plantas exigentes em cálcio e magnésio cultivadas propositalmente em condições mais ácidas para o controle de doenças – como é o caso da batata –, mas com o solo apresentando baixa disponibilidade nestes nutrientes.

Quando necessária a adubação com cálcio e/ou magnésio, a definição da quantidade a ser aplicada dependerá basicamente da exigência da planta, através da produtividade esperada.

## **15.4. FERTILIZANTES CONTENDO CÁLCIO E MAGNÉSIO**

No caso da necessidade de cálcio via adubação, as fontes mais comuns são superfosfato simples, superfosfato triplo, termofosfatos, nitrocálcio, nitrato de cálcio, cloreto de cálcio (com 33% CaO) e o próprio gesso. Para o magnésio, além do termofosfato magnesiano e nitrocálcio, a fonte exclusiva fica quase que restrita ao sulfato de magnésio, que contém 15% de MgO e 13% de S.

---



O enxofre é exigido pelas plantas em quantidades aproximadamente iguais ao fósforo. Entretanto, diferentemente do fósforo, trata-se de um nutriente que, na maioria das vezes, não faz parte das principais preocupações do agricultor e, até mesmo, do técnico. A razão é muito simples, e está ligada ao fato do enxofre apresentar muito menor tendência de reagir com componentes do solo. Portanto, está sempre muito mais disponível que o fósforo.

Com a tendência de uso cada vez maior de fertilizantes concentrados – sem enxofre – e com a exploração de solos de fertilidade mais baixa, muitas vezes sob cultivo intenso e buscando-se altas produtividades, há necessidade de atentar para a capacidade do solo em suprir enxofre.

Enfim, apesar de pouco exigido, é um nutriente que pode, em várias situações, estar limitando a produção vegetal, principalmente para espécies mais exigentes em enxofre, como por exemplo o milho, cana de açúcar, leguminosas e crucíferas.

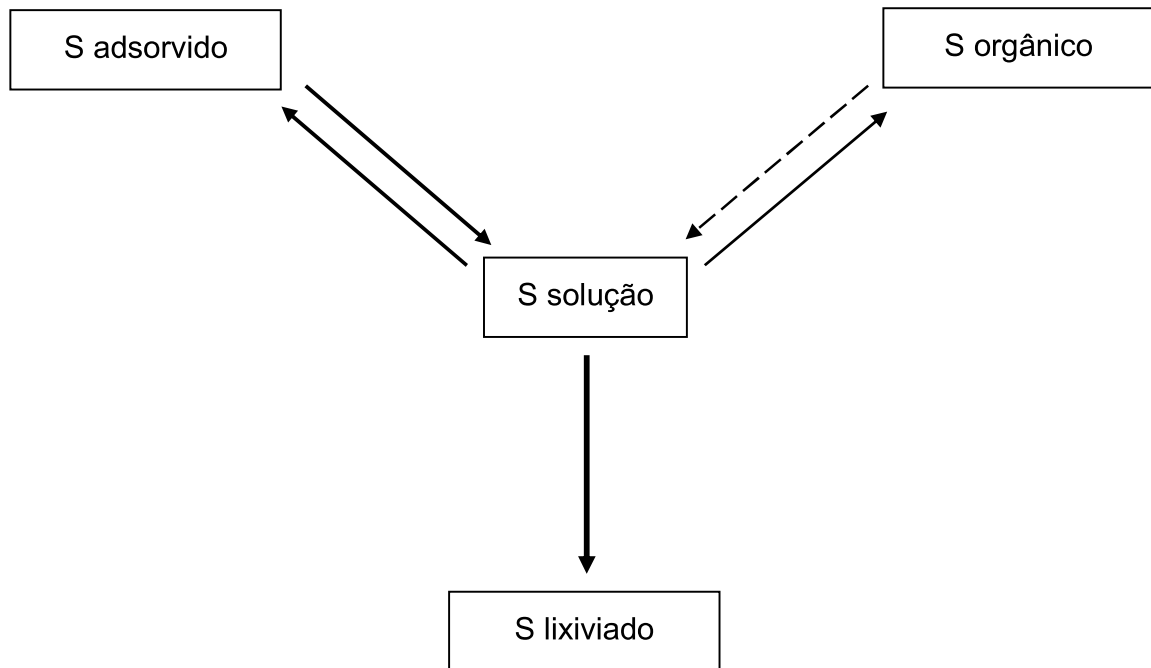
O enxofre, em vários aspectos, assemelha-se ao nitrogênio, principalmente por apresentar-se no solo quase que totalmente em formas orgânicas e por sofrer várias transformações em reações mediadas por microrganismos.

### **16.1. FORMAS E DINÂMICA DO ENXOFRE NO SOLO**

A Figura 16.1 mostra, de maneira simplificada, as principais formas e a dinâmica do enxofre no solo.

O teor de S total nos solos varia de 0,002 a 0,04% e está intimamente relacionado com o teor de matéria orgânica do solo. Na camada arável, de forma similar ao nitrogênio, mais de 90% do S total está na forma orgânica. Assim como acontece com o nitrogênio, a degradação da matéria orgânica do solo implica, a médio prazo, em redução na disponibilidade de enxofre. E, uma vez transformado para a forma inorgânica, o enxofre também fica muito suscetível a perdas, neste caso por lixiviação (Figura 16.1).

---



**Figura 16.1. Representação simplificada das formas e dinâmica do enxofre no solo. O tracejado representa uma transformação mais lenta.**

### 16.1.1. Enxofre na Solução

O enxofre ocorre na solução do solo na forma de  $\text{SO}_4^{2-}$ , que é a forma absorvida pelas raízes das plantas. Trata-se de uma forma bastante solúvel. Ao formar pares iônicos, com  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  lixiviam com relativa facilidade no solo (Figura 16.1). A perda de sulfato é maior com o predomínio de  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  na solução, quando comparados com  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ .

Assim sendo, principalmente em solos cultivados, que recebem muito cálcio e magnésio, via calagem, e potássio, via adubação, a tendência do sulfato é movimentar-se para camadas subsuperficiais (Figura 16.2). Neste sentido, é preciso considerar ainda que, na camada arável dos solos, o sulfato sofre competição na adsorção com as hidroxilas do calcário e com o fosfato da adubação. Portanto, tende a ficar mais em solução.

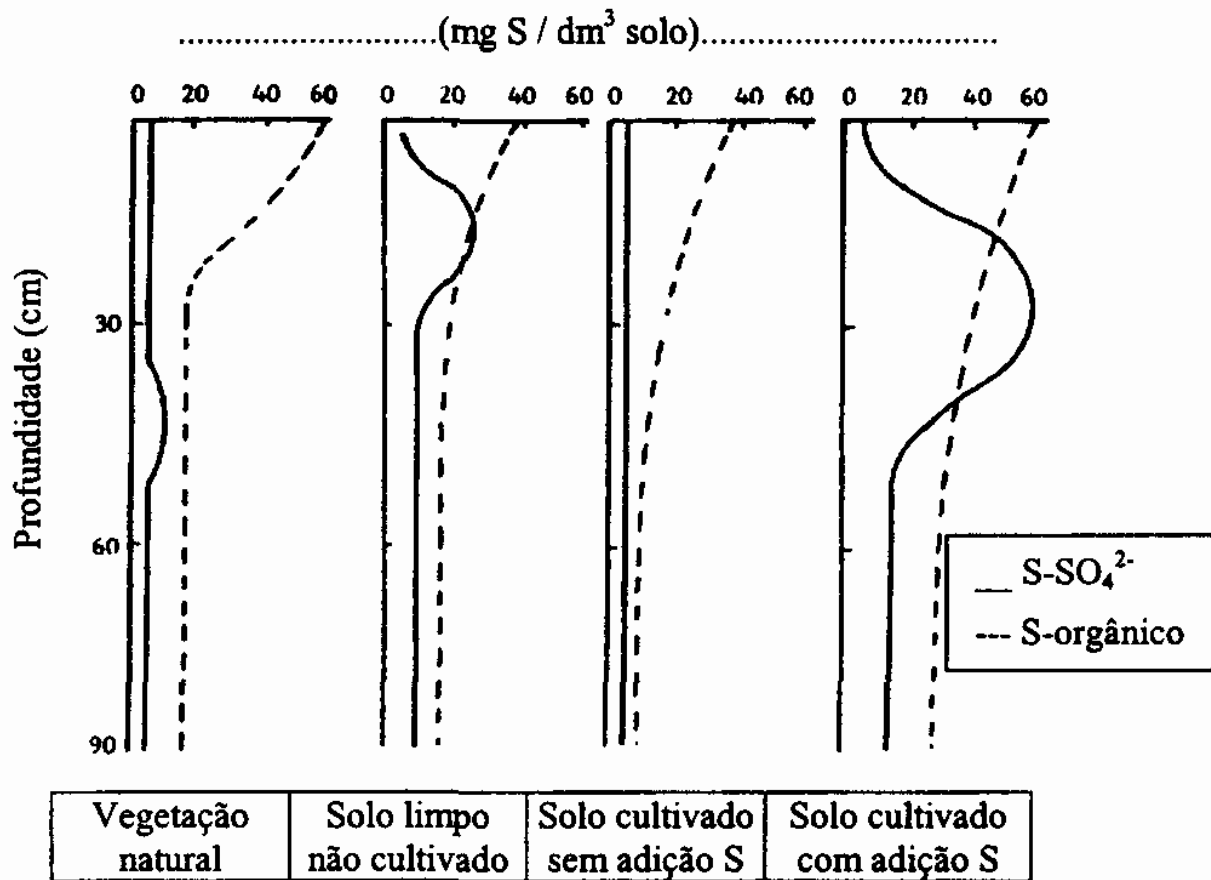


Figura 16.2. Teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e S-orgânico em função da profundidade e do manejo do solo durante seis anos (Adaptado de Bromfield, 1972).

Sob anaerobiose em solos inundados, com potencial de oxi-redução abaixo de -150 mV, o sulfato é reduzido para H<sub>2</sub>S. Tal redução é mediada principalmente por bactérias do gênero *Desulfovibrio*.

Na maioria dos solos inundados, o sulfeto é removido da solução por reação com Fe<sup>2+</sup>, formando FeS<sub>2</sub> (pirita), um composto de baixa solubilidade. Trata-se de reação desejável, pois reduz a toxidez às plantas do H<sub>2</sub>S e do próprio Fe<sup>2+</sup>, que é tóxico e também predomina sob anaerobiose. Na verdade, a formação de FeS<sub>2</sub> apenas é apreciável com potencial de oxi-redução abaixo de -400 mV. Uma vez formada, mesmo com a drenagem, a pirita tende a persistir no solo, isto é, resiste à oxidação.

Merece destaque também o fato de que no cultivo do arroz em solos ricos em matéria orgânica e pobres em ferro, pode haver acúmulo de H<sub>2</sub>S, o qual é bastante tóxico.

### 16.1.2. Enxofre Adsorvido

Os íons sulfato em solução, à semelhança do que ocorre com os íons fosfato, podem ser adsorvidos nas superfícies de óxidos de ferro e de alumínio. Todavia, a sua

capacidade de adsorção, quando em competição com fosfato e hidroxila, é muito pequena. Daí a importância de se atentar para os significados das setas nas Figuras 12.1 e 16.1, envolvendo a adsorção de fosfato e de sulfato.

Ao que tudo indica, a adsorção do sulfato ocorre quase que exclusivamente nas superfícies com cargas positivas, ou seja, por adsorção eletrostática na substituição de grupos "aquo". Portanto, além de depender do teor de óxidos de ferro e alumínio, a adsorção de sulfato depende do pH do solo (Figura 16.3).

Em solos cultivados, com aplicações freqüentes de enxofre, geralmente ocorre um aumento significativo no teor de  $\text{SO}_4^{2-}$  na camada imediatamente inferior àquela cultivada, conforme observa-se na Figura 16.2. Isto se deve, em parte à diminuição no teor de fosfato com a profundidade do solo, criando condições propícias para maior adsorção do sulfato.

As camadas subsuperficiais, portanto, podem apresentar grande reserva de sulfato adsorvido, representando em alguns casos, até mais de 50% do S total destas camadas. Este fato é de grande importância na avaliação da disponibilidade de sulfato, conforme será discutido adiante.

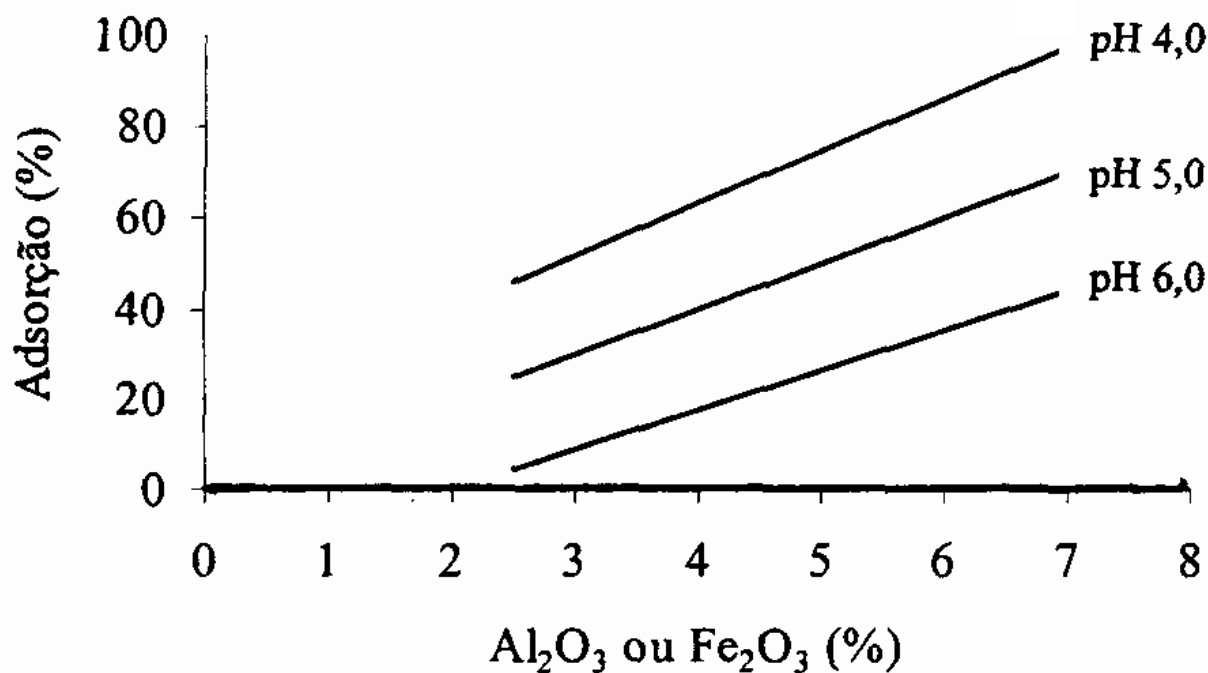


Figura 16.3. Relação entre os teores de óxidos hidratados de ferro e de alumínio e a adsorção do  $\text{SO}_4^{2-}$ , em solo com diferentes níveis de acidez (adaptado de Chao et al., 1964)

### 16.1.3. Enxofre Orgânico

Em geral, mais de 90% do S total da camada arável do solo encontra-se em formas orgânicas. Assim sendo, observa-se altas correlações entre os teores de matéria orgânica e os teores de S total ou orgânico.

Portanto, a mineralização é o processo natural de maior importância para a disponibilidade às plantas, já que as formas orgânicas constituem a maior parte do enxofre do solo. Aproximadamente, para cada 1% de matéria orgânica no solo a sua capacidade natural de suprimento de enxofre varia de 1 a 4 kg S/ha/cultivo.

Os fatores que afetam a decomposição da matéria orgânica, já discutidos no Capítulo 11 quando do estudo da mineralização do nitrogênio, devem, da mesma forma, ser levados em consideração para se avaliar a capacidade do solo em liberar o  $S-SO_4^{2-}$  para a solução do solo, via mineralização do S orgânico.

É importante também considerar que o cultivo do solo tende a resultar na redução do teor de matéria orgânica e, conseqüentemente, do teor de S orgânico (Figura 16.2). Se o solo for cultivado sem adubação com enxofre, em pouco tempo, dependendo do manejo, poderá ocorrer deficiência deste nutriente.

No processo de mineralização do S orgânico, pela atuação de diversos microrganismos heterotróficos, forma-se inicialmente  $H_2S$ . Sob aerobiose, que prevalece na maioria dos solos cultivados, o  $H_2S$  transforma-se instantaneamente para  $SO_4^{2-}$ , em transformação mediada por diversas bactérias quimioautotróficas, principalmente do gênero *Thiobacillus*. Sob anaerobiose, em solos inundados, o  $H_2S$  é o produto final da mineralização do S orgânico. Parte do  $H_2S$  é perdido por volatilização e, desejavelmente, uma fração do mesmo reage com  $Fe^{2+}$ , conforme já discutido.

## 16.2. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE ENXOFRE NO SOLO

Considerando o exposto no item anterior, a disponibilidade do enxofre, em primeiro lugar, está relacionada com o enxofre adsorvido, pois, esta forma seria a reserva de enxofre capaz de rapidamente ressuprir a solução do solo, à medida que a planta vai absorvendo este nutriente.

Todavia, é preciso estar sempre atento para o fato de que a adsorção é maior logo abaixo da camada arável, de tal sorte que a disponibilidade pode ser maior em profundidade. Portanto, assim como acontece com o nitrato, a correta avaliação da disponibilidade de sulfato no solo deve envolver também a análise química abaixo da camada arável.

Em segundo lugar, a disponibilidade de enxofre também está intimamente relacionada com o teor de enxofre orgânico, ou seja, com o teor de matéria orgânica do solo.

Assim, tanto em termos de movimentação em profundidade quanto pela predominância na forma orgânica, as preocupações com a avaliação da disponibilidade de enxofre se assemelham muito com aquelas para o nitrogênio.

Os estudos relacionados com a avaliação da disponibilidade de enxofre procuram usar extratores para extração do enxofre em solução, do enxofre em solução mais o adsorvido ou do enxofre em solução, mais o adsorvido e mais o enxofre orgânico facilmente mineralizável.

---

Normalmente, o enxofre em solução é determinado com água ou com soluções salinas diluídas. Mas, conforme já destacado várias vezes, a concentração de qualquer nutriente em solução diz muito pouco a respeito de sua disponibilidade.

O enxofre adsorvido, procurando-se determinar o fator quantidade, é extraído com  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  ou acetato de amônio.

E, no caso de procurar extrair também o enxofre orgânico facilmente mineralizável, tem-se estudado o uso de  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em meio ácido.

Na verdade, no caso do enxofre, pouco ainda é conhecido sobre a natureza das formas extraídas por determinado método, pois, por exemplo, métodos tidos como extratores apenas do S inorgânico podem extrair parte do S orgânico facilmente mineralizável (Biederbeck, 1978).

No Brasil, poucos estudos tem sido desenvolvidos para a determinação de índices de disponibilidade do enxofre. Dentre os extratores usados por alguns laboratórios destacam-se o  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  com 500 ppm de P, conforme proposto por Fox et al., (1964) e a mesma solução em ácido acético 2N, segundo proposição de Hoefft et al., (1973). O primeiro extrai o sulfato adsorvido enquanto que o segundo, além do adsorvido, extrai parte do S orgânico mineralizável.

O maior problema na avaliação da disponibilidade de enxofre é a determinação analítica do sulfato. O método mais usado é a determinação turbidimétrica, que envolve a precipitação do sulfato com um sal de bário. O sulfato de bário que permanece em suspensão reduz a intensidade de luz que passa através da solução, que é medida em espectrofotômetro.

Este método é altamente afetado por variáveis operacionais, sendo especialmente importantes as condições de mistura dos reagentes para a formação do precipitado e o intervalo de tempo até a leitura no espectrofotômetro.

### 16.3. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE ENXOFRE

Em solos deficientes em enxofre (Quadros 5.5, 5.9 e 5.11), a quantidade a ser aplicada pode ser definida pela produtividade esperada e pelo conhecimento da exigência de cada espécie vegetal.

Situações previsíveis de condições de menor disponibilidade, tais como solos desprovidos de quantidades razoáveis de matéria orgânica, uso contínuo de fertilizantes concentrados e/ou maior exportação do nutriente em lavouras de alta produtividade, pressupõem a necessidade de suprimento do enxofre nas adubações.

### 16.4. FERTILIZANTES CONTENDO ENXOFRE

O enxofre, na grande maioria das vezes, é fornecido indiretamente na adubação com outros nutrientes. Dentre os fertilizantes destacam-se: sulfato de amônio,

---

superfosfato simples, sulfato de potássio, sulfato de cálcio e sulfato de magnésio. Pela acidificação produzida, sulfato de amônio é o menos indicado. Maior detalhamento sobre as características dos fertilizantes sulfatados foram já mencionadas nos capítulos referentes aos outros macronutrientes presentes nessas fontes.

---

## MICRONUTRIENTES: DINÂMICA NO SOLO E FERTILIZANTES

---

Os micronutrientes são o ferro, cobre, manganês, zinco, molibdênio, boro e cloro. É possível que novos elementos sejam acrescentados a esta lista, com o avanço no estudo do metabolismo das plantas.

Os micronutrientes ocorrem em teores muito baixos no solo. O ferro pode ser considerado como exceção e, também o manganês em alguns solos. Mas, são exigidos em quantidades extremamente pequenas pelas plantas. A razão da pouca exigência está ligada ao fato de que a principal função de quase todos é a de atuarem como catalisadores de reações enzimáticas, muitas vezes formando metaloenzimas. Muitos dos sistemas enzimáticos são comuns entre plantas e animais, de forma que, exceto boro e cloro, eles também são essenciais aos animais.

Em face da pequena exigência, as deficiências de micronutrientes são menos comuns que as de macronutrientes. As deficiências que mais tem sido constatadas no Brasil são as de zinco e boro.

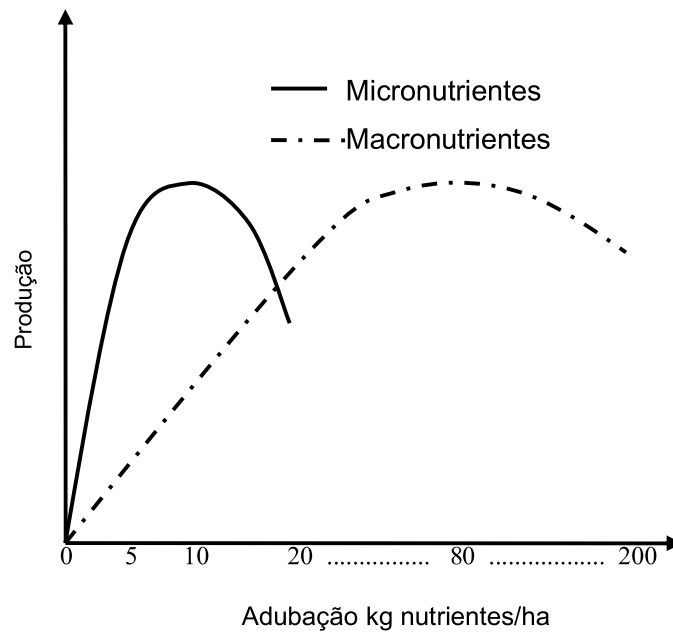
No entanto, a preocupação é cada vez maior com a disponibilidade de micronutrientes no solo. Entre as principais razões, destacam se:

- cultivo intensivo em solos com alta fertilidade natural, levando-os à exaustão;
- cultivo em solos de baixa fertilidade natural, ou seja, originalmente deficientes;
- uso inadequado da calagem, com elevação excessiva do pH do solo e conseqüente redução da disponibilidade de micronutrientes;
- uso de genótipos com alto potencial de produção e grande demanda em nutrientes;
- uso crescente de fertilizantes mais concentrados, com menores quantidades de micronutrientes como impurezas.

Uma característica marcante dos micronutrientes, principalmente do boro, é que o limite entre a essencialidade e a toxidez para as plantas é muito estreito (Figura 17.1). Assim sendo, um aspecto importante do manejo da fertilidade do solo diz respeito a definição da quantidade de micronutriente a aplicar.

---

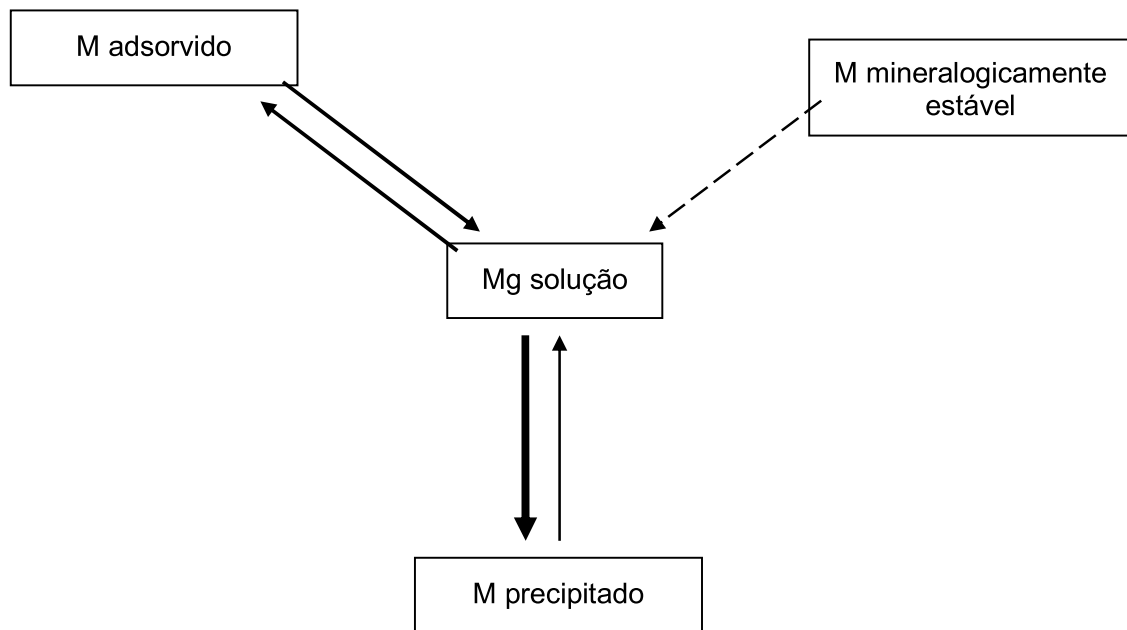




**Figura 17.1. Representação esquemática de respostas das culturas ao fornecimento de macro e micronutrientes (notadamente boro).**

**17.1. FORMAS E DINÂMICA DOS MICRONUTRIENTES NO SOLO**

De maneira geral, a dinâmica dos micronutrientes no solo pode ser representada conforme mostra a Figura 17.2.



**Figura 17.2. Representação simplificada das formas e dinâmica dos micronutrientes no solo. O símbolo M representa qualquer micronutriente. As setas cheias dão uma idéia da intensidade das transformações, enquanto o tracejado representa uma transformação muito mais lenta.**

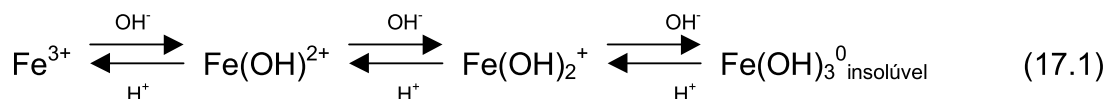
De acordo com a Figura 17.2, o teor de micronutrientes na solução do solo é controlado pela adsorção e a precipitação. A adsorção normalmente é reversível, ocorrendo na superfície dos colóides inorgânicos e orgânicos. A precipitação ocorre especialmente com íons os inorgânicos  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  presentes na solução do solo e, quando ocorre, a disponibilidade do micronutriente fica na dependência do produto de solubilidade do composto formado.

### 17.1.1. Ferro

O ferro inorgânico solúvel inclui o  $\text{Fe}^{3+}$  e suas formas hidrolisadas  $\text{FeOH}^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$  e  $\text{Fe}(\text{OH})_3^0$ . As três primeiras espécies predominam em solo ácido, enquanto a última em pH acima de 7,0. Ainda, o ferro pode ocorrer na forma reduzida de  $\text{Fe}^{2+}$ , que é bastante solúvel.

A baixa solubilidade dos compostos inorgânicos contendo Fe limita grandemente a disponibilidade e absorção desta forma oxidada. De qualquer forma, a solubilidade de ferro é praticamente controlada pelos óxidos hidratados de  $\text{Fe}^{3+}$ , pois o  $\text{Fe}^{2+}$  contribui muito pouco para o total de ferro solúvel em solos aerados.

A solubilidade de ferro em solução é muito dependente do pH. Conforme mostra a reação a seguir, a atividade de  $\text{Fe}^{3+}$  decresce com o aumento de pH.



Na faixa de pH normalmente encontrada nos solos cultivados, a atividade de  $\text{Fe}^{3+}$  solução decresce 1000 vezes para cada aumento de 1 unidade no pH. O teor de ferro solúvel torna-se mínimo a pH acima de 7,0. A deficiência de ferro é uma das grandes causas do menor crescimento das plantas em solos alcalinos.

As reações de oxi-redução, em função das alterações na pressão parcial de  $\text{O}_2$ , influenciam grandemente a disponibilidade de ferro na solução do solo. A forma bastante insolúvel  $\text{Fe}^{3+}$  predomina em solos bem aerados. Por outro lado, sob anaerobiose ocorre redução do ferro para  $\text{Fe}^{2+}$  (reação 17.2.), resultando num aumento da solubilidade deste micronutriente. Algumas vezes, o aumento é tanto que causa toxidez às plantas. Este pode ser um grande problema no cultivo do arroz inundado.



A redução é promovida, na verdade, por bactérias anaeróbicas, as quais, na ausência de  $\text{O}_2$ , podem usar o ferro como aceptor de elétrons no seu metabolismo. Assim, uma inundação ou anaerobiose mais prolongada, em solo com alto teor de ferro e de matéria orgânica, pode resultar em grande quantidade de  $\text{Fe}^{2+}$  em solução (Mandall, 1961).

Uma importante propriedade dos micronutrientes catiônicos, incluindo-se o ferro, é a de formarem complexos ou quelados com radicais orgânicos. Alguns compostos orgânicos, principalmente ácidos húmicos, são insolúveis e podem, até mesmo, adsorver irreversivelmente os micronutrientes catiônicos. Todavia, muitos compostos tais como ácidos carboxílicos, aminoácidos, fenóis e ácidos fúlvicos são solúveis e formam complexos ou quelados que permanecem em solução (Stevenson e Ardakani, 1972).

Na verdade, a presença de agentes complexantes ou quelantes na solução do solo aumenta grandemente a disponibilidade de micronutrientes catiônicos para as plantas. A concentração em solução é muito maior do que a de sistemas com apenas compostos inorgânicos e, por conseqüência, o transporte até as raízes é aumentado.

Esta complexação ou quelação explica o grande sucesso no uso de fertilizantes quelatados ou quelatizados para a adubação com micronutrientes. Na verdade, pode-se corrigir deficiência de micronutrientes com aplicação de agentes quelantes sem os mesmos. Isto porque, estes agentes sequestram os micronutrientes catiônicos de formas insolúveis no solo, aumentando a disponibilidade dos mesmos.

Também a incorporação de material orgânico ao solo, principalmente naqueles arenosos e com baixo teor de matéria orgânica, pode aumentar a aquisição de micronutrientes pelas plantas. Neste sentido, os fertilizantes minerais em base orgânica, de uso mais recente em países desenvolvidos, tem apresentado excelente resultado em termos de suprimento de micronutrientes.

Conforme já ressaltado para os macronutrientes, a adsorção representa, no geral, um importante processo de manutenção dos nutrientes no sistema solo, em forma capaz de ressuprir a solução prontamente. O ferro, assim como os demais micronutrientes catiônicos podem ser adsorvidos em cargas negativas de colóides orgânicos, de óxidos ou de argilas em formas trocáveis e, portanto, capazes de ressuprir a solução do solo (Figura 17.2).

Os micronutrientes, principalmente os catiônicos, também reagem com espécies iônicas da solução formando precipitados. Neste caso, a disponibilidade de micronutrientes, ou seja, o retorno dos mesmos à solução do solo (Figura 17.2) depende da solubilidade dos compostos formados. As reações com  $\text{OH}^-$  da solução formam hidróxidos, que são compostos de baixa solubilidade, principalmente o hidróxido férrico (vide reação 17.1). Por isto, o micronutriente livre na solução – não protegido por radical orgânico – fica muito sujeito a precipitação, principalmente com a elevação do pH.

A disponibilidade dos micronutrientes catiônicos, notadamente em solos com baixo teor de matéria orgânica, em grande parte, é controlada pela solubilidade dos hidróxidos ou óxidos hidratados formados. E, conforme já discutido, a solubilidade dos mesmos é altamente dependente do pH.

Os micronutrientes catiônicos podem ainda formar compostos menos solúveis com  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ .

---

A presença de micronutrientes em forma mineralógica estável como mineral primário apenas contribui com o suprimento de micronutrientes para a solução através do processo de intemperização, que é muito lento (Figura 17.2).

Alguns minerais mais comuns contendo ferro são olivina  $[(Mg,Fe)_2SiO_4]$ , pirita ( $FeS_2$ ), hematita ( $Fe_2O_3$ ) e magnetita ( $Fe_3O_4$ ).

### 17.1.2. Cobre

O cobre predomina na solução do solo na forma de  $Cu^{2+}$ . Também a solubilidade deste micronutriente é muito dependente do pH. A diminuição na sua disponibilidade é de 100 vezes para cada aumento de uma unidade de pH, portanto, com efeito menos intenso que o observado para o ferro.

O cobre é mais fortemente retido por radicais orgânicos que qualquer outro micronutriente – adsorção específica, portanto, de alta estabilidade. Muitos dos complexos ou quelados formados são solúveis. Na verdade, em função desta forte interação, mais de 98% do cobre da solução está ligado a compostos orgânicos solúveis (Hodgson et al., 1966).

No caso da adsorção por colóides orgânicos, conforme já visto, muitas vezes formam-se complexos ou quelados solúveis, o que é altamente desejável para aumentar a solubilidade e transporte até as raízes. Por outro lado, os ácidos húmicos, que são insolúveis adsorvem fortemente os micronutrientes catiônicos, algumas vezes até de forma irreversível. Dentre os micronutrientes catiônicos, o cobre é o mais fortemente adsorvido e, muitas vezes, é considerado como não-trocável. Por esta razão, os solos orgânicos tendem a apresentar baixa disponibilidade de cobre. Os dados do Quadro 17.1 mostram que a aplicação de cobre em solo orgânico reduziu a incidência da esterilidade masculina e aumentou a produção de trigo.

**Quadro 17.1. Esterilidade masculina e produção de grãos de trigo em resposta às doses de cobre (adaptado de Galrão, 1988).**

Cobre Aplicado (kg/ha)	Esterilidade Masculina (%)	Produção de Grãos (kg/ha)
0	18,4 a	3280 a
2	4,3 b	4292 b
4	4,9 b	4175 b
8	4,5 b	4097 b
16	4,0 b	4507 b

Em cada coluna, médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Duncan ao nível de 5%.

O cobre é também o micronutriente mais fortemente adsorvido por óxidos hidratados de ferro e de alumínio. Como estes óxidos possuem cargas dependentes de pH, a adsorção dos micronutrientes catiônicos aumenta com o pH do solo.

A calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) é o mineral de cobre mais comum, seguido da calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) e bornita ( $\text{CuFeS}_4$ ). Todos com liberação de nutrientes mais a longo prazo.

### 17.1.3. Manganês

A principal forma de manganês na solução é  $\text{Mn}^{2+}$  e sua concentração também diminui 100 vezes para aumento de uma unidade de pH. Esta é a forma de manganês absorvida pelas plantas. Por outro lado, em certos solos ácidos a sua disponibilidade pode ser elevada ao ponto de ocasionar toxidez. Obviamente, a solução para este problema é a calagem.

A concentração de  $\text{Mn}^{2+}$  na solução, à semelhança do ferro, também depende de reações de oxi-redução, de forma que a sua disponibilidade depende do teor de matéria orgânica, da atividade microbiana e da umidade do solo. Enfim, como mostra a Figura 17.3, a capacidade do solo em oxidar o manganês controla, em grande parte, a disponibilidade deste nutriente às plantas.

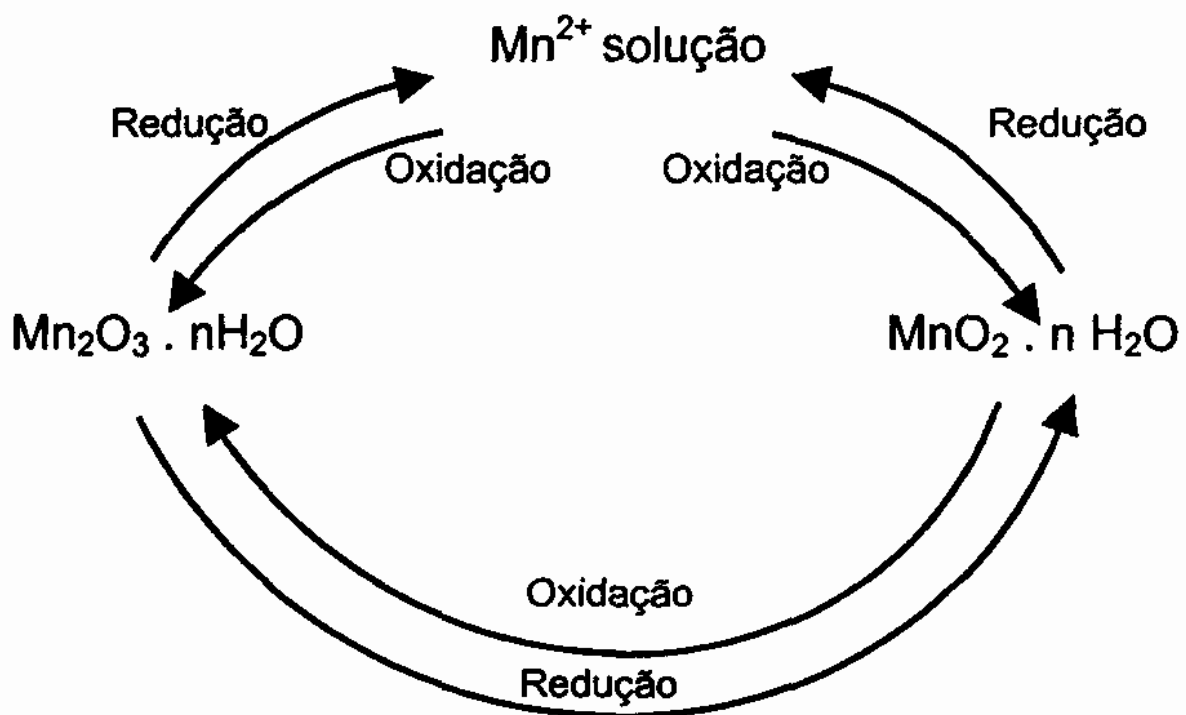


Figura 17.3. Ciclo de oxi-redução do manganês no solo.

Conforme já discutido para o ferro, o manganês também forma complexos ou quelados com compostos orgânicos solúveis, aumentando a solubilidade e transporte deste micronutriente até as raízes. Em solos com adequado teor de matéria orgânica, a maior parte de manganês ocorre em formas orgânicas.

Os minerais em que o manganês ocorre são compostos ferro-magnesianos tais como augita, horblenda e biotita.

#### 17.1.4. Zinco

O zinco ocorre na solução do solo na forma de  $Zn^{2+}$  que também é a forma absorvida pelas plantas. Sua concentração diminui cerca de 100 vezes para cada aumento de uma unidade de pH.

Sendo micronutriente catiônico, em solos com adequado teor de matéria orgânica, a maior parte do zinco da solução ocorre em formas complexadas ou queladas com radicais orgânicos.

Assim, em solos com pH mais elevado e/ou com baixo teor de matéria orgânica a deficiência de zinco pode ser um sério problema. Ademais, o cálcio, normalmente presente em grande quantidade em solos com pH elevado, é um potente deslocador do  $Zn^{2+}$  de complexos ou quelados, deixando este micronutriente livre na solução. Nesta condição, o zinco precipita na forma de  $Zn(OH)_2$ .

A formação de compostos menos solúveis com  $SO_4^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$  e  $H_2PO_4^-$ , porém com solubilidade ainda relativamente elevada, não limita a disponibilidade de micronutrientes. Inclusive, é o caso da formação do  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  que não parece ser o responsável pela deficiência de zinco induzida por adubações pesadas com fósforo.

A disponibilidade de zinco a longo prazo se dá também pelo intemperismo dos principais minerais contendo zinco, os quais sejam a esfalerita ( $ZnS$ ) e hemifortita [ $Zn_4(OH)_2Si_2O_7 \cdot H_2O$ ].

#### 17.1.5. Molibdênio

Contrariamente aos micronutrientes catiônicos, o molibdênio ocorre na solução do solo na forma aniônica e sua atividade aumenta com o aumento de pH (Figura 17.4). As principais espécies aniônicas, em ordem decrescente de importância são:  $MoO_4^{2-} > HMoO_4^- > H_2MoO_4$ . Na faixa de pH dos solos cultivados  $MoO_4^{2-}$  é a forma dominante e a forma absorvida pelas plantas.

---

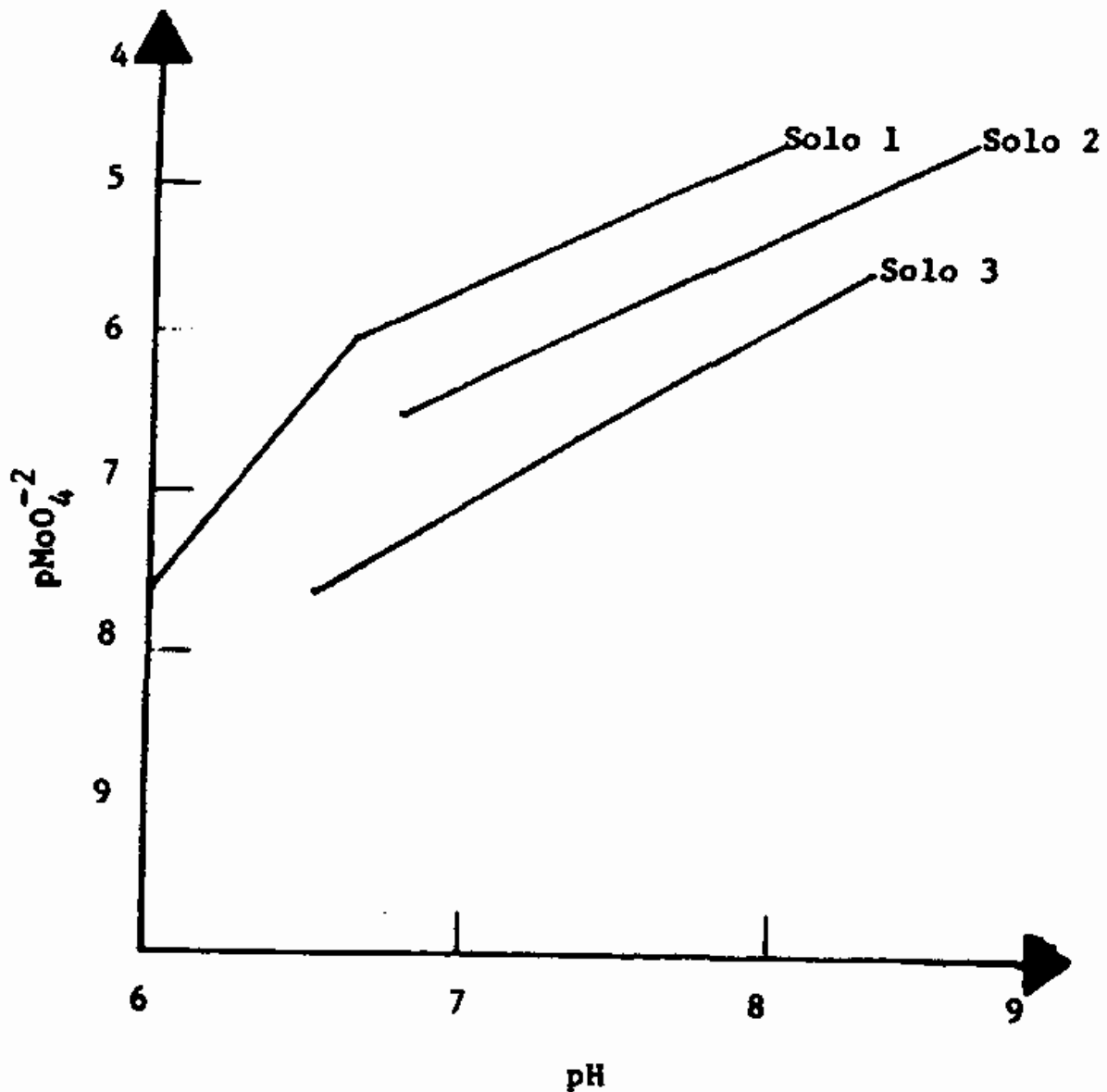


Figura 17.4. Efeito do pH na solubilidade do molibdênio em solos do Colorado (adaptado de Vlek e Lindsay, 1977).

No solo 1, abaixo de pH 7, houve um aumento de cerca de 100 vezes na solubilidade de molibdênio para cada aumento de uma unidade de pH. Acima deste pH, para o solo 1 e nos demais solos, o aumento correspondente foi de cerca de 10 vezes.

O molibdênio tem um comportamento químico no solo muito semelhante ao do fósforo. Desta forma, o molibdato é adsorvido por óxidos hidratados de ferro e de alumínio de maneira análoga ao fosfato. Na verdade, a adsorção do molibdato também é específica e, dentre os ânions, este só é menos fortemente adsorvido que o fosfato.

Conforme acontece com todos os ânions (vide item 12.1.3), a adsorção de molibdato diminui com o aumento do pH. Assim, muitos trabalhos indicam que o uso de calcário em solos ácidos elimina a resposta à fertilização com Mo, como por exemplo, mostram os resultados obtidos por Lantman et al. (1989) e apresentados no Quadro 17.2.

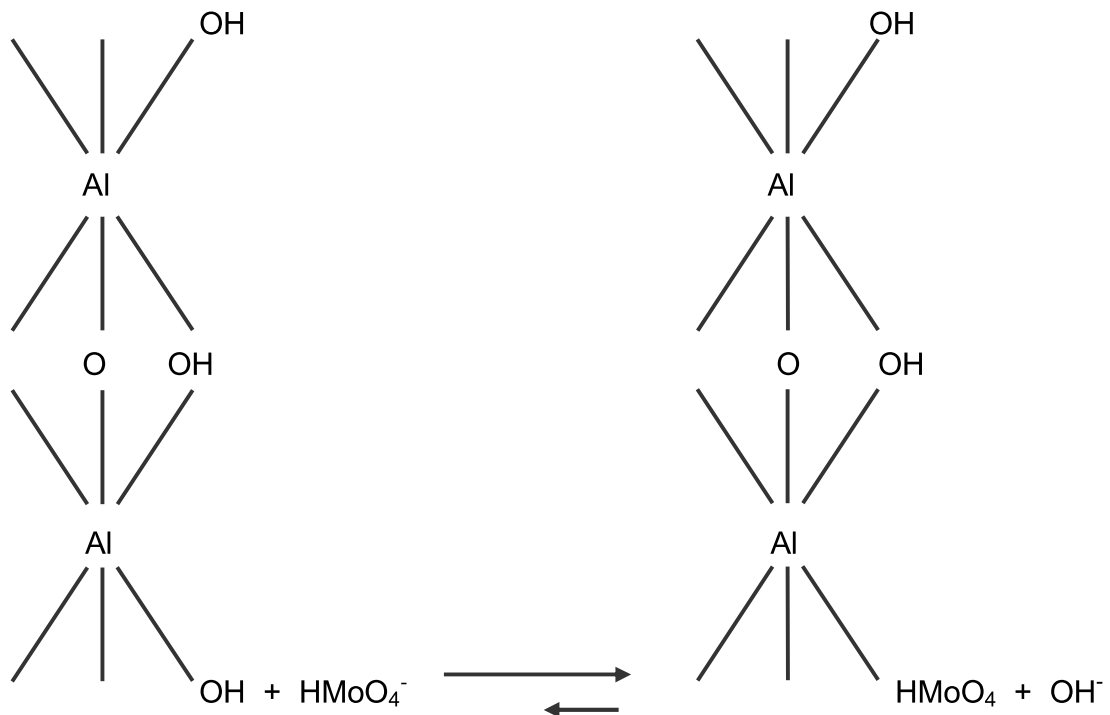
**Quadro 17.2. Rendimento de grãos de soja em função de doses de calcário e molibdênio em latossolo roxo álico de Campo Mourão (PR).**

Calcário (t/ha)	Dose de Mo (g/ha)	
	0	30
	.....t/ha.....	
0	2,34 dB	2,71 bA
2	2,59 cB	2,89 bA
4	3,09 bA	3,17 abA
6	3,18 abA	3,28 aA
8	3,27 abA	3,29 aA
10	3,40 aA	3,29 aA

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

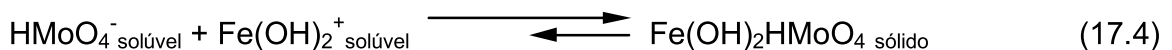
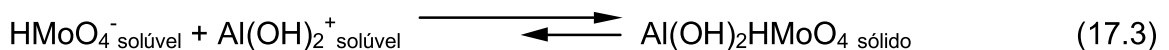
Portanto, em solos ácidos e com alto teor de óxidos hidratados de ferro e de alumínio, a forte adsorção do molibdato reduz em muito a disponibilidade deste micronutriente e, se for o caso, a eficiência da adubação com molibdênio. Através apenas da calagem pode-se corrigir uma provável deficiência de molibdênio, pois, a injeção de íons  $\text{OH}^-$  na solução do solo força a desorção de íons molibdato (Figura 17.5). Da mesma forma, adubações pesadas com fosfato podem produzir o mesmo efeito.





**Figura 17.5. Representação esquemática de possível mecanismo de adsorção de molibdênio em superfície de óxido hidratado de alumínio.**

Em solos ácidos, o molibdênio pode formar molibdatos de alumínio e de ferro insolúveis, de acordo com as reações a seguir:



Conforme acontece com o fósforo, em solos ácidos, a disponibilidade de molibdênio é reduzida tanto por adsorção em óxidos hidratados de ferro e de alumínio quanto por precipitação com íons alumínio e de ferro livres na solução. Todavia, ao contrário do fósforo, o molibdênio não forma compostos insolúveis com o cálcio em pH mais elevado.

Em termos mineralógicos, o molibdênio basicamente ocorre na forma de molibdatos de cálcio e de óxidos hidratados de molibdênio.

### 17.1.6. Boro

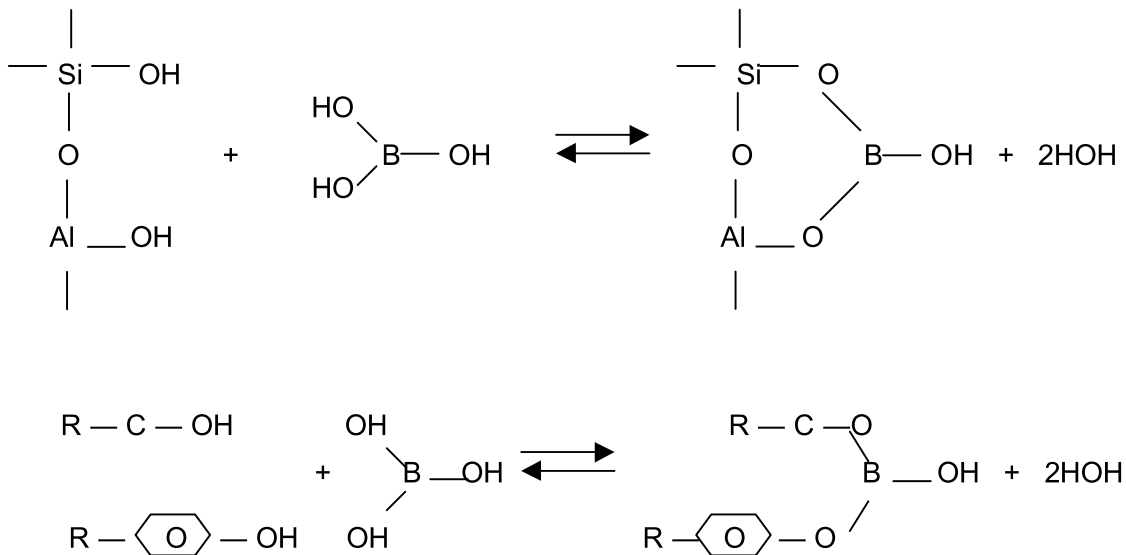
Na faixa de pH da maioria dos solos cultivados, o boro ocorre na solução do solo na forma de ácido bórico não dissociado (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>). É, portanto, o único nutriente que ocorre na solução na forma neutra. Por esta razão, é um micronutriente muito suscetível a perdas por lixiviação.

Ao que tudo indica, o boro é absorvido pelas plantas na forma de  $H_3BO_3$  e seu transporte na solução ocorre predominantemente por fluxo de massa.

O limite entre a toxidez e a essencialidade do boro é muito estreito (Figura 17.1). Felizmente, o boro não ocorre em altas concentrações na solução de solos cultivados, a menos que tenham sido feitas adubações mais pesadas ou tenha sido feito uso de água de irrigação com alto teor deste nutriente.

Apesar de se fazer presente na solução do solo apenas na forma neutra, o boro pode ser adsorvido, principalmente por óxidos hidratados de ferro ou de alumínio, formando um complexo borato-diol (Figura 17.6). A adsorção é dependente do pH do solo, sendo maior em torno de pH 7,0 para  $Al(OH)_3$  e em torno de pH 9,0 para  $Fe(OH)_3$ .

O boro, em realidade, é mais fortemente adsorvido pelos colóides orgânicos do que pelas argilas. A exata forma de combinação entre boro e matéria orgânica não é conhecida, mas, acredita-se na formação de compostos do tipo diol, através da ligação a grupos carboxílicos e/ou fenólicos (Figura 17.6).



**Figura 17.6. Representação esquemática do mecanismo de adsorção de boro segundo Sims e Bingham (1968).**

Assim sendo, os ácidos húmicos parecem constituir-se no principal reservatório de boro adsorvido para a solução do solo na maioria dos solos. Em outras palavras, a presença de matéria orgânica pode minimizar as perdas de boro por lixiviação.

Como fonte primária do micronutriente, a turmalina, um borossilicato complexo, é o principal mineral contendo boro na maioria dos solos. Em regiões áridas tendem a predominar os boratos de metais alcalinos e alcalino-terrosos.

### 17.1.7. Cloro

O cloro ocorre na solução do solo na forma de  $\text{Cl}^-$  e tem um comportamento muito similar ao  $\text{NO}_3^-$  quanto à adsorção em cargas positivas. Trata-se, portanto, do micronutriente com menor poder de adsorção, sendo facilmente lixiviado.

A deficiência de cloro é extremamente rara. Ao contrário, os maiores problemas estão associados à toxidez.

A concentração de cloro na solução do solo pode ser elevada excessivamente com adubações pesadas com KCl, ou em algumas áreas irrigadas ou ainda no cultivo em ambiente protegido – estufa. A presença de grande quantidade de  $\text{Cl}^-$  na água de irrigação, o uso de quantidade de água insuficiente para lavar o  $\text{Cl}^-$  da camada superficial e lençol freático elevado são alguns dos fatores que causam excesso de cloro para as plantas.

## 17.2. FATORES QUE AFETAM A DISPONIBILIDADE DE MICRONUTRIENTES

Conforme será discutido adiante, a avaliação da disponibilidade de micronutrientes através da análise química do solo ainda apresenta problemas. Portanto, é preciso estar atento para os fatores que afetam a disponibilidade dos mesmos quando se faz o manejo da fertilidade do solo.

### 17.2.1. pH do Solo

O pH é a propriedade do solo que mais afeta a disponibilidade dos micronutrientes. A Figura 17.7 sumariza o que foi visto para a influência do pH na solubilidade dos micronutrientes.

---

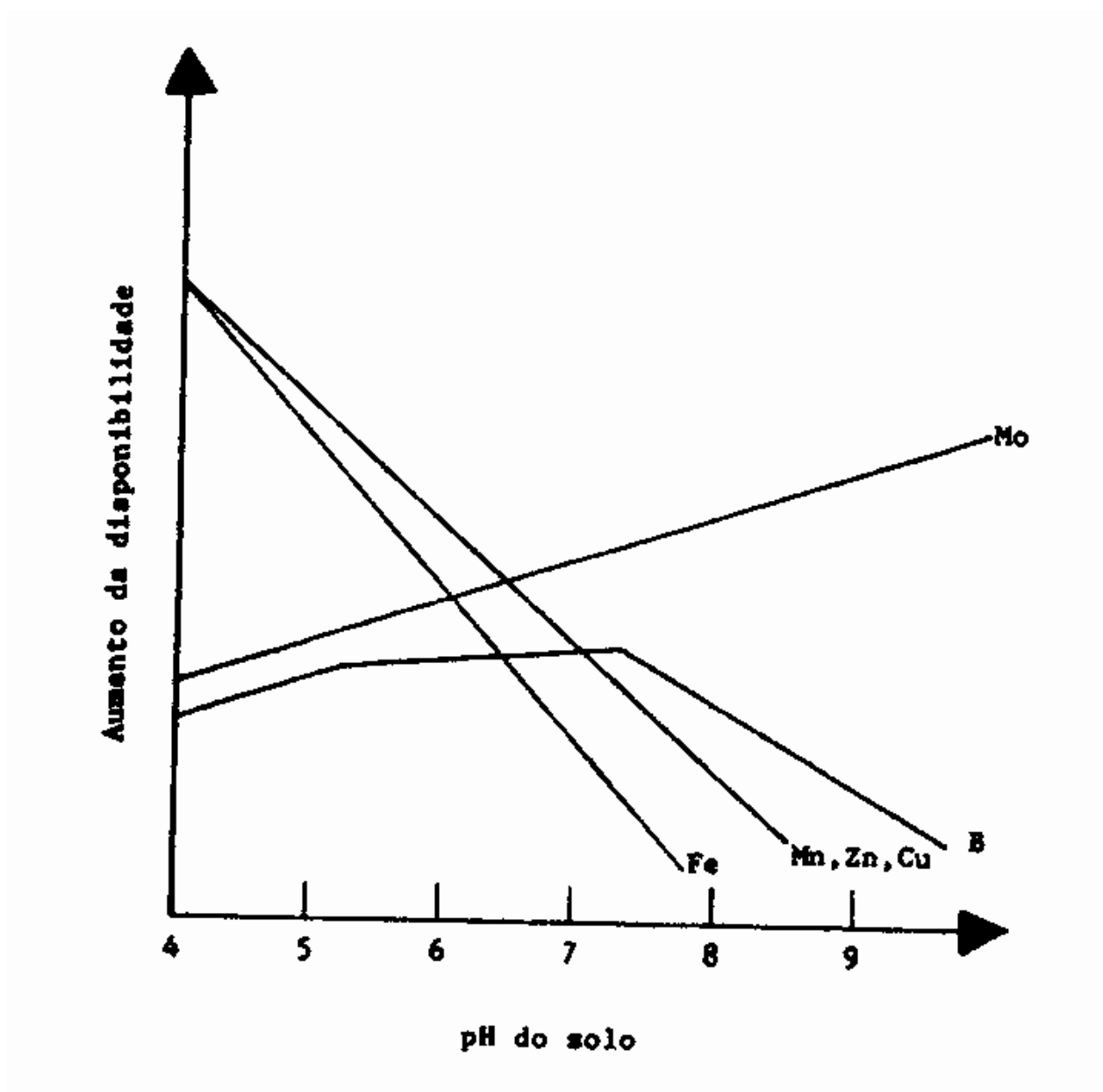


Figura 17.7. Relação esquemática entre pH do solo e a disponibilidade de micronutrientes.

Portanto, no manejo da fertilidade do solo a disponibilidade de micronutrientes pode ser grandemente alterada com a prática da calagem ou através do uso de fertilizantes de reação ácida.

### 17.2.2. Teor de Matéria Orgânica

A matéria orgânica é uma importante fonte de micronutrientes. Mas, muito mais relevante que isto é o papel de certos radicais orgânicos em aumentar a solubilidade e transporte dos micronutrientes catiônicos (Fe, Mn, Zn e Cu) até as raízes.

Portanto, mesmo em solos alcalinos, os micronutrientes catiônicos podem estar presentes em adequada disponibilidade, desde que complexados ou quelados em formas orgânicas. Uma vez na superfície das raízes, sistemas enzimáticos específicos quebram a ligação entre o micronutriente e o radical orgânico promovendo a absorção apenas do micronutriente.

Ligado a este efeito de compostos orgânicos na disponibilidade de micronutrientes, a própria planta pode exercer importante papel. A quelação ou complexação com substâncias orgânicas exsudadas pelas raízes aumenta a concentração de micronutrientes catiônicos na solução do solo da rizosfera, bem como o transporte dos mesmos até a superfície das raízes (vide Figura 4.1).

A incorporação de resíduos orgânicos, mesmo em pequenas quantidades, em solos arenosos com baixo teor de matéria orgânica pode ser uma prática de vital importância para a disponibilidade de micronutrientes.

Por outro lado, é preciso considerar que em solos com elevado teor de matéria orgânica como os solos orgânicos, por exemplo, a adsorção de micronutrientes catiônicos, principalmente do cobre, pode ser tão intensa ao ponto de causar deficiência (Quadro 17.1).

Ou outro aspecto advém do fato da matéria orgânica, por ser fonte de energia para bactérias anaeróbicas, exercer papel fundamental na intensidade da redução de ferro e manganês e, conseqüentemente, no aumento da disponibilidade destes micronutrientes, sob anaerobiose.

### 17.2.3. Interação entre Nutrientes

Os micronutrientes apresentam diversos tipos de interação entre si ou com macronutrientes durante o processo de absorção, alterando a sua disponibilidade (vide Figura 4.1).

Os micronutrientes catiônicos apresentam forte interação entre si em termos de absorção pelas plantas. Assim, uma elevada disponibilidade de um deles pode resultar em deficiência induzida de outro.

Alguns estudos tem mostrado que o  $\text{SO}_4^{2-}$  reduz a absorção de  $\text{MoO}_4^{2-}$  pelas plantas. Portanto, é preciso estar atento para o uso excessivo de gesso, principalmente em solos ácidos sem o devido uso de calcário.

Uma elevada concentração de cálcio na solução, como pode acontecer em solos calcários ou em solos ácidos que receberam quantidade excessiva de calcário, diminui a absorção de boro, sendo esta uma das principais razões para a redução da disponibilidade deste micronutriente em solos com pH acima de 7,0 (Figura 17.7).

---

#### 17.2.4. Fator Planta

Existe uma grande variabilidade genética para eficiência de aquisição de micronutrientes do solo. É a planta exercendo o seu papel na disponibilidade de micronutrientes (vide Figura 4.1).

Por exemplo, hoje em dia sabe-se muito mais a respeito do controle genético e das bases bioquímicas da eficiência de aquisição de ferro do que de qualquer outro nutriente. Em resumo, as raízes de genótipos ou espécies eficientes alteram a rizosfera de forma a aumentar a disponibilidade e aquisição de ferro. Algumas das alterações são:

- a) abaixamento do pH da rizosfera (excreção de  $H^+$ );
- b) excreção de compostos redutores;
- c) excreção de ácidos orgânicos capazes de aumentar a solubilidade de ferro na rizosfera e seu transporte até as raízes.

No caso do ferro, a estratégia de adaptar a planta ao solo já é uma realidade com o desenvolvimento de genótipos de soja, amendoim e citros eficientes em adquirir ferro em solos alcalinos.

A variação entre espécies na sensibilidade a baixa disponibilidade de micronutrientes no solo também é muito importante e precisa ser explorada na recomendação de adubação. A análise química do solo ainda é problemática para micronutrientes, de tal sorte que na tomada de decisão sobre aplicar ou não o micronutriente, o fator planta pode ser decisivo.

O Quadro 17.3, mostra a variabilidade de espécies quanto a sensibilidade a baixos teores de alguns micronutrientes no solo. A lista é parcial e uma dada espécie pode mudar do categoria em função de variações no tipo de solo, condições de crescimento e resposta diferencial de genótipos dentro de uma mesma espécie.

#### Quadro 17.3. Sensibilidade de algumas espécies a baixa disponibilidade de micronutrientes no solo.

Zn		B		Mn	
Sensível	Tolerante	Sensível	Tolerante	Sensível	Tolerante
Feijão, soja, citros, milho, cebola	Trigo, centeio, aveia, ervilha, cenoura	Crucíferas, alfafa, maçã, girassol	Gramíneas, feijão, soja, cebola	Batata, soja, feijão, sorgo, citros, cebola, trigo	Algodão, arroz, milho

#### 17.3. PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE MICRONUTRIENTES NO SOLO

Muitos laboratórios no Brasil já analisam micronutrientes, pois a demanda tem crescido bastante, mas ainda falta definição sobre as formas de extração.

O boro, em função da sua solubilidade, é extraído com relativo sucesso em água quente ou solução de  $\text{CaCl}_2$  0,01M a quente. O método de extração com água quente é o mais usado no mundo.

Os micronutrientes catiônicos tem sido extraídos com extratores ácidos ou com agentes complexantes tais como EDTA e DTPA.

O extrator HCl 0,1 N é bastante usado em vários países. No Brasil, é usado no Rio Grande do Sul e Santa Catarina para determinação da disponibilidade de cobre e zinco. Por sua vez, o extrator Mehlich ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,025 N + HCl 0,05 N) é preferido em alguns laboratórios, devido, entre outros aspectos, à praticidade por já ser usado para fósforo e potássio.

A avaliação da disponibilidade de molibdênio quase nunca é feita pelos laboratórios, por dificuldades analíticas.

#### 17.4. DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE MICRONUTRIENTES NA ADUBAÇÃO

Em solos deficientes em micronutrientes (Quadros 5.6, 5.9 e 5.11), a quantidade a ser aplicada de cada um desses nutrientes pode ser definida pela produtividade esperada e pelo conhecimento da exigência de cada espécie vegetal. Os níveis críticos de disponibilidade de micronutrientes em Minas Gerais situam-se em torno de 1,5 mg Zn/dm<sup>3</sup>; 8 mg Mn/dm<sup>3</sup>; 30 mg Fe/dm<sup>3</sup>; 1,2 mg Cu/dm<sup>3</sup> e 0,6 mg B/dm<sup>3</sup> (CFSEMG, 1999).

Um aspecto muito relevante a ser considerado na definição da quantidade de micronutriente a aplicar, especialmente para o boro, diz respeito ao fato de que para esses nutrientes o limite entre a essencialidade e a toxidez é muito estreito (Figura 17.1). Portanto, a análise do solo assume uma importância ainda maior na definição da quantidade a aplicar, principalmente de boro.

##### 17.4.1. Adubação de Segurança Com Micronutrientes

O princípio desta filosofia não considera dados de análise do solo ou de plantas. Sendo mais utilizada no passado, recomendava-se a aplicação à lanço e incorporação de um ou mais micronutrientes levando em conta prováveis problemas de deficiência em uma dada região, tipo de solo ou cultura.

Embora muito menos comum, no manejo visando à construção da fertilidade do solo pode-se fazer uso da adubação corretiva com micronutrientes através da aplicação a lanço dos micronutrientes com baixa disponibilidade, mais comumente zinco e boro.

Em Goiás recomenda-se adubação corretiva com 6 kg de zinco, 1 kg de boro, 1 kg de cobre e 0,25 kg de molibdênio, por hectare, com distribuição a lanço, e repetição a cada 4 ou 5 anos (CFSG, 1988).

---

A recomendação de micronutrientes para a cultura da soja é de se aplicar a lanço, pelo menos, 4 kg de zinco/ha (Sousa et al., 1989). A utilização de fritas (vide item 17.5), ao invés de apenas sulfato de zinco ou óxido de zinco, permitiria também a aplicação de outros micronutrientes. Em qualquer caso, espera-se um efeito residual de cerca de 4 anos.

Conforme já destacado, no caso de se realizar a fosfatagem corretiva, o uso de determinados termofosfatos implicaria na realização, indiretamente também de uma adubação corretiva com micronutrientes. No mercado encontra-se, por exemplo, termofosfato com 0,1% de B, 0,55% de Zn, 0,12% de Mn, 0,05% Cu e 0,006% de Mo. Assim, para um solo com 50% de argila e com a opção de se aplicar 5 kg  $P_2O_5$  / 1% de argila, seriam aplicados 250 kg de  $P_2O_5$ ; 1,5 kg B; 8,2kg Zn; 1,8 kg Mn; 0,75 kg Cu e 0,09 kg Mo por hectare.

#### **17.4.2. Adubação de Prescrição Com Micronutrientes**

A filosofia de prescrição vem ganhando aceitação entre agricultores e técnicos. Envolve a obtenção de dados de análises de solo e/ou foliares e calibração de forma a melhor estimar doses para a produtividade máxima econômica (PME).

A EMBRAPA (1996) recomenda a aplicação de doses variáveis de micronutrientes baseadas na análise foliar: 4-6 kg de Zn; 0,5-1,0 kg de B; 0,5-2,0 kg de Cu; 2,5-6,0 kg de Mn, 50-250 g de Mo; e 50-250 g de Co por hectare. A aplicação pode ser feita à lanço (com efeito residual de 5 anos) ou no sulco de plantio (dividindo-se a dose total em aplicações durante 4 anos). O cobalto e molibdênio devem ser adicionados também no tratamento de sementes nas doses de 1-5 g e 12-25 g por hectare, respectivamente.

#### **17.4.3. Adubação de Restituição Com Micronutrientes**

Indicada para lavouras com elevados tetos de produtividade e, conseqüentemente maior exportação de nutrientes. Compreende o conhecimento dos teores de nutrientes nas partes colhidas ou retiradas para fora da área de plantio e acompanhamento das produtividades obtidas, de forma a permitir a reposição das quantidades de micronutrientes exportada através das colheitas (CFSEMG, 1999). Embora exija maior refinamento no trabalho do técnico responsável e, apesar da carência de dados de experimentação regionais, esta técnica deve ter seu uso disseminado, face ao caráter cada vez mais competitivo da agricultura.

---



**17.5. FERTILIZANTES CONTENDO MICRONUTRIENTES****17.5.1. Óxidos, ácidos e sais**

Os óxidos, ácidos ou sais contendo micronutrientes constituem os fertilizantes mais usados nas adubações com micronutrientes, tanto para uso como fertilizantes simples quanto para enriquecimento de fertilizantes mistos ou formulados. O Quadro 17.5 apresenta as características dos principais óxidos, ácidos ou sais fertilizantes contendo micronutrientes.

**Quadro 17.5. Principais óxidos, ácidos e sais contendo micronutrientes usados como fertilizantes simples.**

Fertilizante	Fórmula	Teor do Micronutriente (%)	Solubilidade*
Boro			
Ácido bórico	$H_3BO_3$	17	S
Borax	$Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$	11	S
Solubor	$Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$ +	20	S
	$Na_2 B_{10}O_{16} \cdot 10H_2O$		
Colemanita	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$	10	I
Ulexita	$Na_2O \cdot 2CaO \cdot 5B_2O_3 \cdot 16H_2O$	08	I
Zinco			
Sulfato de zinco (monohidratado)	$ZnSO_4 \cdot H_2O$	35	S
Sulfato de zinco (heptahidratado)	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	20	S
Carbonato de zinco	$ZnCO_3$	52	I
Óxido de zinco	$ZnO$	78	I
Fosfato de zinco	$Zn_3(PO_4)_2$	51	I
Ferro			
Sulfato ferroso	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	19	S
Sulfato ferrico	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 4H_2O$	23	S
Óxido ferroso	$FeO$	77	I
Óxido férrico	$Fe_2O_3$	69	I
Fosfato ferroso amoniacal	$Fe(NH_4)PO_4 \cdot H_2O$	29	S

**Continua...**

## Continuação...

Cobre			
Sulfato de cobre (monohidratado)	$\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	35	S
Sulfato de cobre (pentahidratado)	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25	S
Óxido cuproso	$\text{Cu}_2\text{O}$	89	I
Óxido cúprico	$\text{CuO}$	75	I
Cloreto cúprico	$\text{CuCl}_2$	16	S
Manganês			
Sulfato de manganês	$\text{MnSO}_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	26	S
Óxido manganoso	$\text{MnO}$	41	I
Cloreto de manganês	$\text{MnCl}_2$	17	S
Molibdênio			
Trióxido de molibdênio	$\text{MoO}_3$	66	I
Molibdato de sódio	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	39	S
Molibdato de amônio	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	54	S

\* Solubilidade em água: S = solúvel; I = insolúvel

A solubilidade em água é uma característica importante dos fertilizantes contendo micronutrientes, relacionando-se com a possibilidade de aplicação em pulverização foliar ou via fertirrigação, com as perdas por lixiviação no solo e com possível fitotoxidez.

Por exemplo, para o boro tem-se que o ácido bórico é mais solúvel que o borax, o que traz vantagens para aplicações via água ou para ação mais rápida no solo. Todavia, o ácido bórico seria mais suscetível a perdas e apresenta maior potencial fitotóxico. Ainda, o solubor também é mais solúvel que o borax, mas, menos solúvel que o ácido bórico. A colemanita, dada à sua baixa solubilidade, é uma fonte muito indicada para solos arenosos, pois as perdas de boro por lixiviação seriam reduzidas em comparação com ácido bórico e borax.

O cobalto não é nutriente de plantas. Todavia, é essencial aos microrganismos fixadores do  $\text{N}_2$  como o rizóbio no cultivo da soja. Assim, notadamente para o cultivo de leguminosas sob fixação de  $\text{N}_2$ , deve-se fazer aplicação de cobalto. Mais comumente, tal aplicação é feita via tratamento da semente, juntamente com aplicação de molibdênio. Como fontes de cobalto são mais usados o cloreto de cobalto ( $\text{CoCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; 34% de Co; solúvel em água) e óxido de cobalto ( $\text{CoO}$ ; 75% de Co; insolúvel em água).

### 17.5.2 Quelados ou quelatos

A presença de agentes quelantes ou complexantes – originados da decomposição da matéria orgânica, da exudação radicular ou produzidos por microrganismos – na solução do solo aumenta a disponibilidade de micronutrientes catiônicos, por reduzir as reações de precipitação, notadamente com oxidrilas para formar hidróxidos (Stevenson e Ardakani, 1972). Com tal descoberta, os fertilizantes com micronutrientes catiônicos resultantes da mistura de óxidos ou sais com compostos orgânicos ou resultantes da produção específica de um quelato passaram a ganhar o mercado, principalmente em países tecnologicamente mais avançados.

No Quadro 17.6 são apresentados os quelatos mais indicados, principalmente considerando a estabilidade dos mesmos em função do pH. Os quelatos são solúveis em água, podendo ser aplicados tanto no solo quanto via foliar, em ambos os casos com grande eficiência. Todavia seu uso é ainda restrito principalmente em função do preço elevado dos fertilizantes quelatizados.

**Quadro 17.6. Principais quelatos sintéticos e materiais orgânicos naturais com capacidade quelante usados como fertilizantes contendo micronutrientes catiônicos.**

Fertilizante	Teor do micronutriente(%)
Ferro	
NaFe EDTA	5-14
NaFe HEDTA	5-9
NaFe EDDHA	6
NaFe DTPA	10
Orgânicos naturais	5-10
Zinco	
Na <sub>2</sub> Zn EDTA	14
NaZn NTA	13
NaZn HEDTA	9
Orgânicos naturais	5- 10
Cobre	
Na <sub>2</sub> Cu EDTA	13
NaCo HEDTA	9
Poliflavonóides	5-7
Manganês	
Mn EDTA	5-12
Orgânicos naturais	5-9

### 17.5.3. FTE

As “fritas” ou F.T.E. (Fritted Trace Elements) são fertilizantes formados pela fusão da sílica com óxidos, ácidos ou sais contendo micronutrientes ou, muitas vezes, formados pela fusão da sílica com resíduos industriais – principalmente da siderurgia – os quais podem conter também metais pesados. Trata-se de um produto vítreo, insolúvel em água, que libera lentamente os micronutrientes. O FTE somente pode ser aplicado diretamente no solo, por não ser solúvel em água. Os teores de micronutrientes e de cobalto de alguns FTE comercializados no Brasil são apresentados no Quadro 17.7.

**Quadro 17.7. Características de fertilizantes FTE comercializados no Brasil**

Fertilizante	Teor de micronutrientes						
	Zn	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Co
	.....(%).....						
FTE BR8	7,0	2,5	1,0	5,0	10,0	0,1	-
FTE BR10	7,0	2,5	1,0	4,0	4,0	0,1	0,1
FTE BR12	9,0	1,8	0,8	3,0	3,0	0,1	-
FIE BR24	18,0	3,6	1,6	6,0	4,0	0,2	-
Micronutri-121	12,0	1,0	-	-	-	0,6	0,15
Micronutri-301	30,0	1,0	1,0	-	-	-	-

## MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO E ADUBAÇÃO ORGÂNICA

---

Os grandes desafios da agricultura moderna estão relacionados com a produção vegetal em quantidades para atender uma demanda cada vez maior, com o uso mais eficiente de recursos naturais limitados e não-renováveis e com a preservação e uso racional de áreas não vocacionadas para a agricultura, dos recursos hídricos e dos solos. Tudo isso aliado ao desafio, cada vez mais intenso, de se conseguir a viabilidade econômica da atividade agrícola. Enfim, agricultura sustentável envolve a integração de várias tecnologias no sentido de sustentar ou, até mesmo, aumentar a produtividade vegetal, mantendo ou aumentando a produtividade do solo, o retorno econômico e a qualidade ambiental.

Do ponto de vista do solo, tarefas que se mostram imperiosas e se confundem com o conceito de sustentabilidade da fertilidade do solo estão relacionadas com a conservação do solo, com o combate à acidez e minimização da acidificação, com a reposição e o uso eficiente de nutrientes, notadamente fósforo e nitrogênio e com o uso racional de resíduos orgânicos.

O objetivo desse capítulo não é o de se discutir o papel de todos os fatores relacionados com a sustentabilidade. Mesmo porque, conservação do solo não é objetivo de estudo específico neste módulo. Dessa forma, será dado destaque à importância da matéria orgânica na sustentabilidade da fertilidade do solo. Adicionalmente, tratar-se-á de alguns aspectos relacionados ao emprego da adubação orgânica, utilizando como subsídios as informações apresentadas nos itens 10.3 e 10.4 do Capítulo 10.

### 18.1. IMPORTÂNCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO

Matéria orgânica pode ser considerada como sinônimo de fertilidade do solo. Sua presença no solo afeta sobremaneira atributos químicos, físicos e biológicos do mesmo o que, entre tantos benefícios, aumenta a disponibilidade de nutrientes para as plantas. O Quadro 18.1 resume o papel da matéria orgânica no solo.

---

**Quadro 18.1. Propriedades da matéria orgânica (M.O.) e seus efeitos sobre o solo o solo.**

Propriedade da M.O.	Caracterização	Efeito no Solo
Mineralização	A decomposição da matéria orgânica libera para a solução do solo todos os nutrientes e substâncias de crescimento.	É uma fonte completa de nutrientes para as plantas e microrganismos.
Quelação de Micronutrientes	Forma complexos solúveis com $Fe^{2+}$ , $Cu^{2+}$ , $Mn^{2+}$ e $Zn^{2+}$ .	Aumenta o transporte e, conseqüentemente, a disponibilidade de micronutrientes catiônicos.
Quelação de cátions tóxicos	Forma complexos estáveis com $Al^{3+}$ e metais pesados como $Hg^{2+}$ e $Pb^{2+}$ .	Reduz a toxicidade de alumínio bem como de metais pesados. Então, em parte, substitui o papel do calcário.
Capacidade de Troca de Cátions	A capacidade de troca de cátions do humus varia de 300 a 1400 $cmol_c/dm^3$ .	É, de longe, o componente que mais contribui para a CTC do solo. Reduz perdas por lixiviação e problemas com salinidade.
Ação Tamponante	As substâncias orgânicas são, ao mesmo tempo, grandes doadoras e receptoras de prótons.	Estabiliza o pH do solo, o que é de grande importância na minimização da acidificação.
Combinação com Moléculas Orgânicas	Afeta a bioatividade, persistência e biodegradabilidade de pesticidas e substâncias alelopáticas.	Modifica a ação de pesticidas no solo e altera efeitos alelopáticos.
Combinação com Argilas	Exerce importante ação cimentante na formação de agregados.	Melhoria na estruturação com impacto na aeração, permeabilidade, infiltração de água e redução da erosão.
Retenção de Água	A matéria orgânica retém até 20 vezes o seu peso em água.	Significativa melhoria na capacidade de retenção de água em solos arenosos e auxílio na minimização do fenômeno de fendilhamento do solo. Também, pela retenção de água, promove maior estabilização da temperatura do solo.
Cor	A cor mais escura do solo é devida à matéria orgânica.	Facilita o aquecimento do solo.
Cobertura Superficial do Solo	A matéria orgânica, principalmente na forma de resíduos não decompostos, promove um tapete de cobertura do solo.	Redução no impacto das gotas de chuva, reduzindo o encrostamento e erosão

## 18.2. SUSTENTABILIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO

O teor de matéria orgânica no solo é resultado do balanço entre a deposição de resíduos orgânicos no solo e a decomposição dos mesmos. Em ecossistemas de maior estabilidade, com elevada produção de fitomassa, como é o caso de florestas e pastagens naturais, ocorre um maior acúmulo e preservação da matéria orgânica. Todavia, o cultivo desses ecossistemas resulta em comprometimento na cobertura do solo, redução na taxa de deposição de resíduos orgânicos e em um aumento na taxa de decomposição dos resíduos.

O preparo do solo, por exemplo através das práticas de aração e gradagem, promove maior aeração, estimulando a atividade microbiana e, conseqüentemente, aumentando a taxa de decomposição da matéria orgânica. A taxa de decomposição depende do solo, clima e sistema de cultivo. Quando um solo virgem é cultivado, o teor de matéria orgânica decresce rapidamente nos primeiros 5 a 10 anos. Após 20-30 anos, um equilíbrio aparente no teor de matéria orgânica tende a ser alcançado.

Além do intenso e constante revolvimento do solo, a diminuição no teor de matéria orgânica é favorecida com o processo de erosão, com uma baixa produção de material vegetal, com o cultivo continuado de espécies vegetais de reduzida capacidade de incorporar resíduos orgânicos no solo via palhada.

As práticas de calagem e adubação mineral podem favorecer uma maior decomposição da matéria orgânica, principalmente em solos recém desbravados, pois os microrganismos decompositores são ativados com o aumento de pH e com a aplicação de nutrientes. Por outro lado, tais práticas também promovem maior produção de massa e de resíduos vegetais, que, se mantidos na área, contribuem para a manutenção ou mesmo o aumento dos níveis de matéria orgânica, sendo de crucial importância na sustentabilidade da mesma no solo.

A manutenção dos resíduos vegetais na superfície do solo, sem qualquer incorporação, promove uma maior cobertura do solo, uma menor perda de solo por erosão e um menor contato dos resíduos com os organismos decompositores. Portanto, é uma prática que favorece a sustentabilidade ou, na maioria das vezes, o aumento no teor de matéria do solo. Neste sentido, destaca-se o sistema de Plantio Direto que, entre outros benefícios, permite um aumento no teor de matéria orgânica do solo, quando comparado com o sistema de plantio convencional (Muzilli, 1981).

Na situação de grande parte do Brasil, em que as condições climáticas favorecem uma acentuada taxa de decomposição dos resíduos orgânicos, mesmo deixados à superfície, torna-se mais importante ainda a rotação de culturas, priorizando-se o cultivo de espécies com grande capacidade de retorno de resíduos ao solo. De todo modo, a rotação de culturas, incluindo-se a prática da adubação verde, é também indicada para promover maior sustentabilidade da matéria orgânica no solo.

A adoção da adubação orgânica, pode-se constituir também em importante estratégia de promover maior sustentabilidade da matéria orgânica no solo. O uso de

---

resíduos animais, vegetais, industriais e urbanos, (vide itens 10.3 e 10.4 do Capítulo 10) apresenta essa importante vantagem sobre os fertilizantes minerais, notadamente quando usados em maiores quantidades.

### 18.3. CÁLCULOS NA RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO ORGÂNICA

Sendo os fertilizantes orgânicos fonte da maioria dos nutrientes, porém em concentrações baixas e muito variáveis, dependendo da natureza e origem do material, a adubação orgânica é geralmente empregada independentemente da adubação mineral ou em substituição parcial a esta. De qualquer forma, o aproveitamento de resíduos e outros materiais orgânicos disponíveis na propriedade ou que possam ser adquiridos a um custo compensatório deve ser priorizado, visto que os efeitos para o solo, planta e ambiente são altamente favoráveis.

#### 18.3.1. Fertilizantes Sólidos

Conhecendo-se o teor de nutrientes no fertilizante orgânico sólido (Quadro 10.7), que é dado com base na matéria seca, o teor de matéria seca ou matéria orgânica e o índice de conversão(Quadro 10.6) da forma orgânica para a forma mineral, pode se calcular, dentro de um raciocínio lógico, a quantidade de fertilizante a ser aplicada para atender a necessidade de um dado nutriente ou a quantidade de nutriente suprida por uma certa quantidade de fertilizante aplicada. A seguinte fórmula pode ser útil para os referidos cálculos:

$$X = \frac{A}{B/100 \cdot C/100 \cdot D/100}$$

onde,

X= Quantidade do fertilizante orgânico sólido aplicado ou a aplicar (kg/ha; g/planta);

A = Quantidade do nutriente aplicado ou a aplicar (kg/ha; g/planta);

B = Teor de matéria seca do fertilizante (%);

C = Teor do nutriente na matéria seca (%);

D = Índice de conversão (%), apresentado no Quadro 10.6.

Tanto para a adubação com fertilizantes sólidos quanto líquidos, é muito provável que as necessidades de nutrientes para uma certa adubação não sejam supridas de forma equilibrada com a adubação orgânica. Isto porque, a concentração de nutrientes nos mesmos é variável e pode diferir em muito das relações das quantidades de nutrientes desejadas na adubação.

Considerando a baixa disponibilidade normalmente verificada para os fertilizantes orgânicos e considerando que se deve evitar a aplicação de nutrientes em quantidades muito superiores às recomendadas, os cálculos devem tomar por base, inicialmente, o nutriente cuja quantidade será satisfeita com a menor dose.



### 18.3.2. Fertilizantes Líquidos

Para o caso dos fertilizantes orgânicos líquidos (chorume, vinhaça, etc), a fórmula passa a ser a seguinte:

$$X = \frac{A}{C' \cdot D/100} \quad \text{onde,}$$

X = Quantidade do fertilizante orgânico líquido aplicada ou a aplicar (m<sup>3</sup>/ha; L/planta);

C' = Concentração do nutriente no fertilizante (kg/m<sup>3</sup>; g/L), VIDE Quadro 10.8;

D = Índice de conversão (%), apresentado no Quadro 10.6.

### 18.4. ÉPOCA E FORMA DE APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES ORGÂNICOS

Como discutido, a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo traz uma série de benefícios ligados à conservação do solo, mas, é menos eficiente, a curto prazo, do ponto de vista de adubação. O reduzido contato com o solo diminui grandemente a velocidade de decomposição ou mineralização.

Além da possibilidade de ocorrência de processos microbianos fermentativos, que podem aquecer excessivamente o substrato, inviabilizando a germinação de sementes ou pegamento de mudas, a decomposição de resíduos vegetais no solo pode exercer um efeito colateral de significativa importância para a produção da cultura subsequente, relacionado com o fenômeno da alelopatia. A liberação de substâncias alelopáticas através da decomposição de resíduos vegetais pode ocorrer diretamente pela lavagem de substâncias já presentes no resíduo ou pela produção de substâncias pelos microrganismos responsáveis pelo processo de decomposição. Maior atenção, normalmente, é dada às plantas daninhas, cuja incorporação pode trazer problemas de alelopatia. A decomposição de resíduos de caruru apresentou efeito alelopático inibitório na germinação e crescimento inicial do algodoeiro, sendo o efeito mais acentuado em solos mais arenosos e sob condições mais ácidas (Marques, 1992). A alelopatia tende a ser minimizada com a permanência dos resíduos na superfície do solo, sem incorporação, ou, no caso de se efetuar a incorporação, o plantio deve ser feito, pelo menos, após um mês de iniciada a decomposição do resíduo.

Como regra geral, visando ao suprimento de nutrientes, os adubos orgânicos devem ser incorporados ao solo ou misturados à terra de enchimento das covas cerca de um mês antes do plantio das mudas ou semeadura.

Os resíduos animais devem ser, preferencialmente, incorporados ao solo, não apenas para aumentar a eficiência do fósforo mas, principalmente, para reduzir as perdas de nitrogênio por volatilização. Os fertilizantes orgânicos de origem animal, antes de serem usados, necessitam passar por um processo aeróbico de "cura". Neste processo,

que dura de 60 a 90 dias, há produção de grande quantidade de calor. Assim sendo, uma vez devidamente processados, os resíduos animais podem ser aplicados no dia de plantio ou o mais próximo deste, sem qualquer prejuízo às sementes e plântulas.

A aplicação de resíduos animais na superfície do solo, sem qualquer incorporação, em lavouras perenes já instaladas, visando principalmente o fornecimento de nitrogênio e de potássio, apresenta boa eficiência dada à mobilidade desses nutrientes no solo. Se for realizada a aplicação de gesso, a prévia mistura do mesmo na esterqueira, conforme já indicado no Capítulo 10, ou a sua aplicação junto com o fertilizante orgânico pode reduzir as perdas de nitrogênio por volatilização.

---

## CRITÉRIOS PARA O MANEJO DA ADUBAÇÃO

---

No Capítulo 9 tratou-se dos critérios para definição dos principais aspectos ligados ao manejo da adubação, quais sejam a definição do nutriente a aplicar e da quantidade a ser fornecida. Vistos em capítulos subseqüentes, o comportamento dos diversos nutrientes no solo e as características dos fertilizantes minerais fontes destes nutrientes, é preciso destacar outros aspectos, não menos importantes, do manejo da fertilidade do solo.

A escolha correta da época de aplicação do nutriente, do fertilizante a ser utilizado e da forma de aplicação é preponderante ao sucesso e economicidade da adubação, de forma a maximizar a resposta das culturas com o menor risco ao ambiente.

### 19.1. DEFINIÇÃO DA ÉPOCA DE APLICAÇÃO DO NUTRIENTE

A decisão a respeito da melhor época de se aplicar um dado nutriente depende do próprio nutriente, em termos de sua dinâmica no solo e da magnitude de sua exigência pela planta ao longo do ciclo de cultivo. As culturas anuais apresentam maior demanda de nutrientes apenas após o desenvolvimento de uma grande área foliar, ou seja, de um considerável *aparatus* fotossintético. No caso de culturas perenes, a maior demanda ocorre na fase de florescimento e formação dos frutos.

Em termos da dinâmica no solo, nitrogênio e fósforo determinam dois extremos de contrastes. Em função do seu elevado dinamismo, o nitrogênio, quando comparado com o fósforo, é muito mais difícil de ser mantido no solo ao alcance das raízes.

Portanto, para culturas anuais, apenas uma pequena fração do total de nitrogênio recomendado é aplicada no plantio, ficando a maior parte para aplicação posterior, em cobertura, quando o sistema radicular já estiver bem desenvolvido para absorção, ou seja, quando a planta já estiver numa fase de alta demanda. É a chamada Adubação em Cobertura, já tradicional para o caso do nitrogênio. De outra forma, a adubação nitrogenada é parcelada entre a adubação de plantio e adubação em cobertura.

---

Por exemplo, para o milho, a recomendação é de aplicar 0 a 30% do total de nitrogênio recomendado por ocasião da semeadura, e, o restante, 35 dias após a germinação (Raij et al., 1985), quando as plantas apresentarem 6 a 8 folhas bem desenvolvidas (CFSEMG, 1999) ou quando as plantas estiverem com 40 a 60 cm de altura (Siqueira et al., 1989). A adubação em cobertura também pode ser parcelada, principalmente quando são aplicadas altas doses e as condições são mais favoráveis a perdas do nitrogênio. Para o milho, sob condições de chuvas intensas – perdas por lixiviação de nitrato – pode-se realizar a primeira cobertura na época indicada, aplicando o restante antes da fase de pendoamento. No caso de lavouras irrigadas, em que se procede a prática da fertirrigação, podem ser realizadas várias adubações nitrogenadas em cobertura, pela facilidade permitida pelo sistema.

Estudos recentes, entretanto, mostram que para doses de nitrogênio de até 100 kg N/ha, não há necessidade do parcelamento da cobertura. E, para doses de até 50 kg N/ha, pode-se fazer a aplicação de todo o nitrogênio no plantio, economizando tempo e gastos com a realização da cobertura nitrogenada, especialmente no caso de solos mais argilosos. Uma maior aplicação de nitrogênio no plantio, de 30 a 50 kg N/ha ao invés de apenas cerca de 10 kg N/ha, é sugerida por Zublena (1991) para o milho.

Em culturas perenes, as perdas por lixiviação do nitrogênio são minimizadas pelo parcelamento da quantidade total a aplicar em várias aplicações ao longo do período de exigência considerado. Por exemplo, para uma lavoura de café em produção, é feito o parcelamento do nitrogênio em 3 ou 4 aplicações, no período de outubro a março.

Para o fósforo, nutriente de baixíssima mobilidade no solo, a princípio, não se pode considerar a adubação em cobertura para o mesmo.

Em culturas anuais, pelo menos, a adubação em cobertura é de todo inoportuna. Ao contrário do nitrogênio, o fósforo é nutriente do plantio, isto é, na implantação de uma lavoura tem-se que priorizar a adubação de plantio com este nutriente através da fosfatagem corretiva, se viável, e das adubações no sulco de plantio ou na cova.

Mesmo para culturas perenes, a grande ênfase na adubação fosfatada tem de ser dada para a adubação de plantio. Além da possibilidade de se fazer uma fosfatagem corretiva, ocorrendo a abertura de uma cova maior é o momento imperdível de se aplicar uma maior quantidade de fósforo em um maior volume do solo. Enfim, o ideal em uma lavoura de cultura perene é não contar com adubações fosfatadas realizadas na superfície do solo. A sua movimentação em profundidade é extremamente lenta e, na verdade, ficando na superfície do solo, o fósforo torna-se altamente suscetível a perdas por lavagem superficial – erosão.

A adubação fosfatada na superfície apresenta certa eficiência, praticamente em dois casos. O primeiro diz respeito a culturas perenes irrigadas por gotejamento. A aplicação de fósforo via fertirrigação nesse sistema promove uma elevada saturação em fósforo

---

numa pequena área, permitindo uma maior descida do mesmo, por fluxo de massa. De qualquer forma, a fertirrigação com fósforo apresenta problemas no tocante a precipitação do fósforo em água rica em cálcio, promovendo entupimentos no sistema de irrigação. Um outro caso em que a aplicação de fósforo apresenta certa eficiência é a adubação de manutenção de pastagens instaladas. Num sistema de maior cobertura vegetal do solo, em que a erosão é minimizada, o fósforo, mesmo que ficando mais à superfície, é bem absorvido por um emaranhado de raízes localizadas nos 2-3 cm superficiais. Mas, uma vez mais, ressalta-se que o ideal é não contar, em qualquer caso, com adubações fosfatadas superfície do solo.

O potássio apresenta uma mobilidade no solo muito mais próxima da do fósforo que do nitrogênio. Portanto, de certa forma, é também nutriente de plantio. Para culturas anuais, o mais comum é aplicar todo o potássio por ocasião da semeadura. E, para culturas perenes e pastagens, considerando a razoável mobilidade do potássio no solo – ainda bem maior que a do fósforo – e a sua grande exigência pelas plantas, é inevitável aplicações de potássio na superfície do solo em adubações de formação da lavoura e de produção.

Por ser bem menos móvel que o nitrogênio, o potássio é menos parcelado e deve ser aplicado nos primeiros parcelamentos. Por exemplo, na adubação de uma lavoura de café em produção, o nitrogênio pode ser parcelado em 4 vezes, aplicado de outubro a março. O total de potássio a ser aplicado, por sua vez, poderia ser parcelado em duas vezes, sendo aplicado junto com o nitrogênio nas duas primeiras coberturas. Neste exemplo, se fosse feita opção de se aplicar também o fósforo, este seria aplicado de uma única vez e, especificamente, na primeira cobertura.

Considerando que o potássio, em cerca de 95% dos casos é aplicado na forma de KCl, a aplicação de altas doses no sulco de plantio ou em cova pode trazer sérios problemas para a germinação, crescimento inicial e estabelecimento de mudas no campo. O cloreto de potássio apresenta elevado índice salino, o que pode resultar em menor germinação e efeitos negativos sobre as plântulas e mudas. Além disso, em solos mais ácidos, o cloreto de potássio, em alta concentração localizada, promove maior deslocamento do alumínio para a solução, aumentando a sua toxidez, que é crítica para as plântulas.

É muito difícil o estabelecimento da dose crítica de potássio, acima da qual ocorrem problemas de salinidade e toxidez de alumínio. Há dependência do tipo de solo, da magnitude da acidez trocável ou nociva, da sensibilidade da planta a salinidade e do teor de umidade do solo. Em geral, doses acima de 60 kg K<sub>2</sub>O/ha são mais preocupantes.

Ainda, um outro problema associado com aplicações localizadas de potássio em altas doses, diz respeito à maior probabilidade de perdas por lixiviação, pois, com alta concentração de potássio na solução ocorre maior movimentação vertical por fluxo de massa.

---

Assim sendo, quando se almeja a aplicação de altas doses de potássio – solos com baixa disponibilidade neste nutriente e com expectativa de altas produtividades – tem-se duas alternativas quanto a época e modo de aplicação de potássio. A primeira refere-se ao parcelamento da adubação potássica, entre o plantio e a cobertura (vide Quadro 13.2). Todavia, em função da menor mobilidade do potássio, quando comparado com o nitrogênio, pelo menos 50% da dose total de potássio deve ser aplicada no sulco de plantio, ficando o restante para ser aplicado, preferencialmente, na primeira cobertura. A segunda alternativa é a de aplicar o potássio a lanço e incorporado antes do plantio (vide Quadro 13.2), fazendo-se uma adubação potássica corretiva, conforme já discutido no Capítulo 13.

Os demais nutrientes, em face de suas dinâmicas no solo e da exigência dos mesmos pelas plantas, não são tão críticos quanto a época de aplicação. Assim, por exemplo, uma adubação com enxofre para o milho pode ser realizada por ocasião da semeadura ou da adubação nitrogenada em cobertura. É quase sempre mais indicado aplicar o cálcio e magnésio por ocasião da calagem e o enxofre e micronutrientes no plantio.

Em se tratando de micronutrientes, em virtude das pequenas quantidades necessárias ao atendimento da demanda das culturas, existem mais opções quanto à época e modo de aplicação. Além da adubação convencional via solo, os micronutrientes podem ser eficientemente supridos, notadamente em culturas perenes, por meio de aplicações foliares e fertirrigação. Muitas vezes, a adição de Mo e Co para leguminosas e Zn para gramíneas na operação de tratamento das sementes tem proporcionado resultados mais satisfatórios que a adubação normal no sulco de plantio. Finalmente, no caso de propagação por mudas, tem-se ainda a possibilidade de mergulhar os tubetes ou as mudas com raízes nuas em soluções contendo micronutrientes de interesse, por ocasião do transplantio.

## **19.2. DEFINIÇÃO DO FERTILIZANTE A SER APLICADO**

Para atender a necessidade de aplicação de qualquer nutriente, existe uma série de opções de fertilizantes, cada qual com suas vantagens e desvantagens. O mercado de fertilizantes é muito dinâmico, o que requer do técnico constante atualização para escolher a melhor opção existente. Inclusive, devido a grande importância do processo de escolha do fertilizante e da grande variedade de materiais fertilizantes existentes no mercado, é preciso conhecer as características dos principais fertilizantes, conforme apresentado com detalhes em capítulos anteriores.

Basicamente, no processo de escolha dos fertilizantes, os aspectos a serem considerados são os seguintes:

---

- presença de outro nutriente;
- solubilidade em água;
- facilidade de armazenagem, manuseio e de aplicação;
- acidificação do solo;
- uniformidade de distribuição;
- forma química dos nutrientes;
- presença de contaminantes nocivos à própria planta, animais e ao homem;
- disponibilidade no mercado;
- preço.

A título de exemplificação, é destacado, para cada aspecto ressaltado, prováveis situações envolvendo esse processo de escolha.

Havendo a necessidade de se aplicar enxofre para uma dada cultura, ao realizar a adubação nitrogenada em cobertura o fertilizante nitrogenado escolhido deve ser o sulfato de amônio. Mas, um manejo mais adequado da fertilidade do solo nesta situação poderia ser a de se optar pelo superfosfato simples no plantio, resolvendo o problema do enxofre, de forma a não usar o sulfato de amônio para adubação nitrogenada, devido a grande acidificação do solo promovida por este fertilizante. Com isto, o fertilizante nitrogenado escolhido poderia ser, por exemplo, o nitrocálcio.

A aplicação de fertilizantes via irrigação – fertirrigação – requer a escolha de fertilizantes altamente solúveis em água. Inclusive, para um mesmo fertilizante, pode existir no mercado um fertilizante com mais alto grau de pureza, justamente visando uma maior solubilidade e obtenção de soluções mais puras, o que é importante para se evitar entupimentos no sistema de irrigação.

O nitrocálcio é um excelente fertilizante do ponto de vista químico, todavia, devido à sua higroscopicidade, pode apresentar problemas de empedramento durante armazenamento, dificuldade de manuseio e de aplicação em dias mais úmidos.

Os formulados tipo mistura granulada, quando comparados com misturas de grânulos, resultam em uma maior uniformidade de aplicação de NPK. Quando se objetiva a aplicação de micronutrientes em formulados enriquecidos com os mesmos, a escolha de um formulado granulado torna-se mais importante ainda, pois, considerando que a quantidade de micronutrente é muito pequena, sua aplicação via mistura de grânulos é muito desuniforme.

A natureza química do fertilizante, isto é, a forma química do nutriente, apresenta uma série de implicações na eficiência da adubação. Por exemplo, a absorção de apenas amônio é altamente indesejável para a grande maioria das espécies cultivadas, as quais produzem mais sob um suprimento mais balanceado de amônio e nitrato (Guazelli, 1988). Assim sendo, em solos com nitrificação reduzida – solos com pH abaixo de 6,0 ou areias

---

quartzosas com baixo teor de matéria orgânica – a produção pode ser aumentada pelo uso de nitrato de amônio ou de nitrocálcio, ao invés de sulfato de amônio.

A adubação foliar com uréia, notadamente para culturas sensíveis tais como citros e abacaxi, requer o uso de uréia com menos de 0,25% de biureto como contaminante. Para aplicação no solo, para a maioria das espécies, uma concentração de biureto de até 2% não traz problemas. O uso de resíduos industriais e do lixo e esgoto tratados podem resultar em contaminação com metais pesados, tanto do solo, quanto da água e do produto colhido. Especial atenção tem de ser dada ao se escolher fertilizantes desta natureza para adubação de hortaliças, notadamente de alface, que é uma planta acumuladora de metais pesados.

Muitas vezes o uso de determinado fertilizante, escolhido por uma série de vantagens, é limitado pela disponibilidade no mercado, fator este crítico em certas regiões do Brasil e em certas épocas do ano.

Havendo igualdade de eficiência entre fertilizantes, o preço final – incluindo transporte e custo de aplicação – pode definir o fertilizante a aplicar. Particularizando o interesse em dado(s) nutriente(s), o fertilizante mais econômico é aquele que apresentar menor preço efetivo, ou seja, menor custo por unidade do(s) nutriente(s), conforme a fórmula a seguir:

$$\text{Preço efetivo} = \frac{\text{Preço por tonelada}}{\text{Teor(es) solúvel(eis) do(s) nutriente(s)}}$$

Em realidade, no cálculo do preço efetivo é preciso considerar também a presença de outros nutrientes, possíveis benefícios indiretos além daquele de suprir os nutrientes, e a eficiência agrônômica do fertilizante. Por exemplo, no processo de escolha de fertilizantes para realizar uma fosfatagem corretiva tem-se que considerar:

- a) Preço por unidade de  $P_2O_5$  solúvel em diferentes fertilizantes fosfatados;
  - b) Preço de enxofre e cálcio no superfosfato simples;
  - c) Preço de cálcio, magnésio e de micronutrientes no termofosfato magnesiano;
  - d) Presença de 50% em peso de gesso no superfosfato simples, promovendo então, indiretamente, uma gessagem;
  - e) Equivalente  $CaCO_3$  de +50 para o termofosfato magnesiano, promovendo também, indiretamente, uma pequena correção da acidez do solo;
  - f) A presença do ânion silicato nos termofosfatos, o qual reduz a adsorção de fosfato, além de ser considerado muito importante para as gramíneas;
  - g) A baixa eficiência agrônômica dos fosfatos naturais brasileiros, geralmente não apresentando competitividade econômica.
-



### 19.3. DEFINIÇÃO DA FORMA DE APLICAÇÃO DO FERTILIZANTE

O modo de aplicação do fertilizante depende de uma série de fatores, dentre os quais destacam-se:

- o nutriente a ser aplicado, sua disponibilidade e mobilidade no solo;
- a quantidade do nutriente a ser aplicada;
- o tipo de fertilizante a ser aplicado;
- o sistema de cultivo;
- a disponibilidade de equipamentos.

Antes do plantio, o fertilizante pode ser aplicado a lanço, uniformemente em toda a área, fazendo-se incorporação com gradagem. É a forma de aplicação para a adubação corretiva com fósforo, potássio e micronutrientes, para a adubação orgânica pré-plantio e, para a calagem e gessagem. Esta forma de aplicação usualmente envolve grande quantidades de fertilizante (ou corretivo) em programas de construção da fertilidade do solo.

O fertilizante também pode ser aplicado a lanço, mas sem incorporação, em pastagens instaladas, lavouras perenes e em plantio direto.

As principais vantagens de aplicação de fertilizantes a lanço em toda a área, com incorporação subsequente, são as seguintes:

- Pode-se aplicar grande quantidade de nutriente sem qualquer injúria às sementes ou plântulas;
- A distribuição de nutrientes uniformemente na camada arável promove o crescimento radicular em um maior volume de solo e, conseqüentemente, um uso mais eficiente de nutrientes e de água;
- Redução do consumo de tempo e de mão-de-obra durante o plantio.

No plantio, em adubações normalmente realizadas pela grande maioria dos agricultores e envolvendo menores quantidades de nutrientes, o fertilizante deve ser aplicado cerca de 5cm abaixo e 5 cm ao lado das sementes. É muito importante a presença de um certo volume de solo entre a semente e o fertilizante, de forma a se evitar danos à mesma e, logo em seguida, à plântula. No caso da aplicação de pequenas quantidades de fertilizantes no plantio, especialmente se apenas superfosfatos, pode-se misturar o fertilizante com as sementes. A mistura com sementes pode ser feita ainda para aplicação de micronutrientes. Principalmente para o molibdênio e cobalto, necessário à fixação simbiótica de nitrogênio em leguminosas, que exigidos em quantidades muito pequenas, são uniformemente aplicados via revestimento de sementes.

A aplicação de nutrientes em cobertura pode ser feita a lanço ou localizada ao lado da linha de plantio de culturas anuais. Para culturas perenes a cobertura é feita da projeção da copa para o interior até o caule, em aplicação por planta, ou tangenciando a projeção da copa em uma faixa contínua.

---

Idealmente, o fertilizante aplicado em cobertura deveria ser incorporado ou, pelo menos, levemente coberto por terra. Precipitações ocorridas logo após a cobertura ou a irrigação, ao levarem o fertilizante – principalmente nitrogenado – para dentro do solo, produzem o mesmo efeito.

Para aplicação do fertilizante em filete contínuo, tanto no sulco de plantio quanto em cobertura adjacente a linha de plantio, é preciso calcular a quantidade de fertilizante a ser aplicada por metro linear, através da seguinte fórmula:

$$X = \frac{Y \cdot 1000}{(10000 / e)} \quad \text{onde,}$$

X = Quantidade do fertilizante a ser aplicada (g/m)

Y = Dose do fertilizante a ser fornecida (kg/ha)

e = Espaçamento entre sulcos de plantio (m)

Em se tratando de culturas em espaçamentos mais amplos, a adubação pode ser realizada para cada planta individualmente, sendo necessário conhecer a quantidade de fertilizante a ser aplicada por cova. Neste caso, a fórmula para cálculo é a seguinte:

$$X = \frac{Y \cdot 1000}{(10000 / a)} \quad \text{onde,}$$

X = Quantidade do fertilizante a ser aplicada (g/cova)

Y = Dose do fertilizante a ser fornecida (kg/ha)

a = Área correspondente a cada planta (m<sup>2</sup>)

Certos fertilizantes muito solúveis em água podem ser aplicados diretamente na parte aérea, constituindo a adubação foliar. Entretanto, é uma forma de aplicação mais indicada apenas para microriutrientes. Segundo Mortvedk (1985), as vantagens da adubação foliar, para os micronutrientes, quando comparada com a aplicação direta no solo são as seguintes:

- as doses necessárias são menores que as aplicadas via solo;
- a distribuição é mais uniforme do que na aplicação via solo;
- a resposta ao nutriente aplicado é mais imediata do que observada para a aplicação no solo.

Quando o problema da deficiência de micronutriente catiônico se deve a uma condição de pH mais elevado, a deficiência pode ser corrigida pela acidificação do solo ou, então, apenas através da adubação foliar com o micronutriente. Neste caso, mais de uma pulverização pode ser necessária para algumas culturas.

---

A adubação foliar com macronutrientes é viável, em alguns casos, apenas com a conotação de se fazer uma adubação complementar à realizada via solo. Mesmo assim, a concentração da solução fertilizadora tem de ser menor que 1 a 2%, de modo a evitar injúrias às folhas. A aplicação de uréia + cloreto de potássio em conjunto com micronutrientes, na concentração próxima de 1%, é indicada para aumentar a própria absorção de micronutrientes.

Finalizando, uma forma de aplicação de fertilizantes, que aumenta cada vez mais no Brasil, é através da água de irrigação, constituindo a chamada Fertirrigação. Pela sua especificidade e importância, a fertirrigação é tratada com detalhe em publicações específicas.

---

## FERTILIDADE DO SOLO NO PLANTIO DIRETO

---

Difundido em nosso meio mais como medida de controle à erosão do que como um sistema de cultivo propriamente dito, o plantio direto (PD) foi implantado sem que houvesse informações básicas capazes de orientar os componentes envolvidos no sistema. Informações sobre o manejo da fertilidade do solo são ainda escassas para as nossas condições e carecem de subsídios para avaliação das modificações que ocorrem no sistema solo-planta. A adoção de tais práticas tem provocado mudanças nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos.

O conceito inicialmente adotado foi derivado da expressão “no-tillage”, que significa sem preparo, sendo um procedimento de plantio de culturas diretamente sobre uma cobertura vegetal morta quimicamente, ou sobre os resíduos da cultura anterior, sem o preparo mecânico do leito de semeadura. Posteriormente, Muzilli (1991) ampliou o conceito, definindo-o como um processo de semeadura em solo não revolvido, no qual a semente é colocada em sulcos ou covas com largura e profundidade suficientes para a adequada cobertura e contato das sementes com a terra.

Atualmente este conceito assume a visão integrada de um sistema, envolvendo a combinação de práticas culturais ou biológicas, tais como: o uso de produtos químicos ou práticas mecânicas no manejo de culturas destinadas à adubação verde; a formação de cobertura do solo; a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo; a adoção de métodos integrados de controle de plantas invasoras, através de cobertura do solo e herbicidas; e o não revolvimento do solo, exceto nos sulcos de semeadura.

Em condições brasileiras, os estudos pioneiros de Ramos (1976) mostraram a eficiência do PD no controle das perdas de solo por erosão. Posteriormente, Muzilli (1985), avaliando a fertilidade do solo nesse sistema, constatou diferenças significativas quanto ao acúmulo de nutrientes no PD, em relação ao preparo convencional.

Do ponto de vista da fertilidade do solo, têm sido verificados os efeitos dos resíduos culturais no acúmulo de nutrientes e sua influência nas culturas em sucessão (Muzilli, 1983 e 1985; Sidiras e Pavan 1985). Nesses trabalhos, atribuíram-se tais efeitos à

---

mineralização dos resíduos culturais. Há ainda a interação com os componentes climáticos (temperatura e precipitação), pois se por um lado a cobertura morta reduz a amplitude térmica e a perda de água por evaporação, por outro lado, o clima exerce efeito na mineralização dos resíduos e acúmulo de nutrientes nas camadas superficiais.

### 20.1. ESTRATÉGIAS DE FERTILIZAÇÃO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

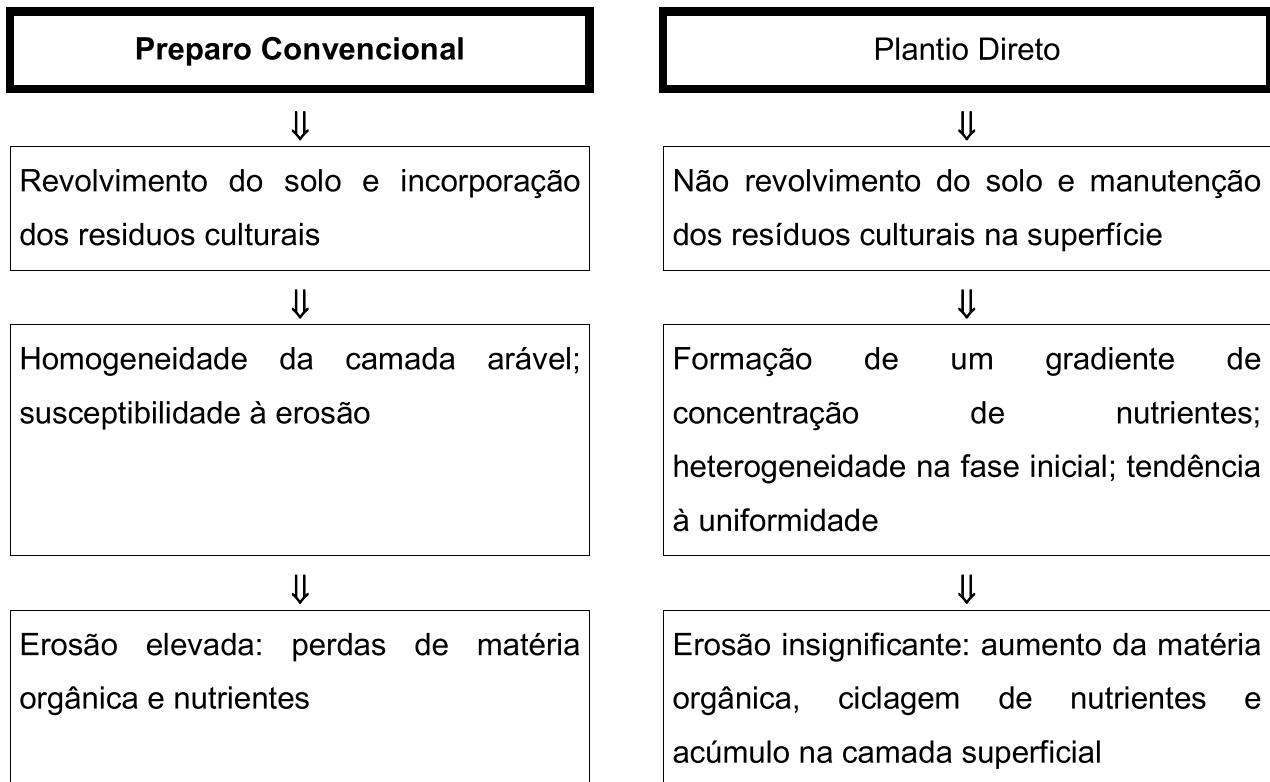
Recentemente, alguns resultados obtidos no sistema plantio direto com a calagem (Sá, 1993, 1996; Pöttker, 1996) e com a adubação de N, P e K (Sá, 1993, 1996), diferem dos observados com as recomendações para o preparo convencional, tornando-se relevante a necessidade de critérios de recomendação específicos.

Diversos trabalhos enfocaram o efeito da mineralização dos resíduos culturais no acúmulo de nutrientes na camada superficial do solo influenciando as culturas em rotação (Muzilli, 1981, 1983, 1985; Sidiras e Pavan, 1985; Sá, 1993, 1996).

Nas décadas de 70 e 80, o questionamento ao manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto foi intenso em diversos segmentos da pesquisa e da assistência técnica, principalmente sobre a correção da acidez e o modo de aplicação de fertilizantes. Entre os macronutrientes, o fósforo, devido a sua baixa mobilidade no solo e a suscetibilidade às reações de fixação, ocupou a atenção em inúmeros trabalhos relacionados ao modo de aplicação. A Figura 20.1 apresenta as principais diferenças entre o preparo convencional e o plantio direto (Sá, 1998):

A calagem no plantio direto tem gerado intenso questionamento no meio agrônomo. A não incorporação do corretivo ao solo diminui a sua superfície de contato com os colóides, tornando-se o ponto central da discussão quanto a eficiência de sua aplicação em superfície, conforme resultados satisfatórios que vêm sendo obtidos. O principal argumento está fundamentado na característica dos solos das diversas regiões brasileiras, apresentarem elevada acidez, baixo conteúdo de bases e expressiva concentração de alumínio tóxico em subsuperfície. A correção da acidez antes da adoção do plantio direto, tem sido um pré-requisito para o sucesso do sistema. Entretanto, muitos agricultores não realizaram esta operação adequadamente antes de sua adoção, resultando em muitos casos, no retorno ao preparo convencional. Mesmo assim, alguns agricultores pioneiros no plantio direto, mantiveram o sistema em condições inalteradas desde sua adoção, com aplicações de calcário em superfície a cada dois ou três anos, ou ainda em menores doses todos os anos (Sá, 1998).

---



**Figura 20.1. Diferenças básicas entre os sistemas de preparo convencional e de plantio direto.**

Em relação ao efeito do sistema de manejo do solo na dinâmica do nitrogênio, é sabido que a maior reserva de N nos solos está ligada a cadeias carbônicas constituindo a matéria orgânica, em formas não diretamente disponíveis para as plantas. O teor total desse elemento na camada superficial (0-20 cm) varia em geral de 0,05 a 0,5% e menos de 5% do N total está em formas inorgânicas como o íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e o íon nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). A ausência do revolvimento do solo e a manutenção de resíduos culturais na superfície, resulta num aumento significativo da quantidade de matéria orgânica no solo, porque as taxas de decomposição são menores e reguladas principalmente pela quantidade de carbono e nitrogênio existente em cada uma delas. O fluxo de liberação de N ao sistema será influenciado pela presença de resíduos com maior ou menor relação C:N. Esse processo é essencialmente biológico e sujeito à interferência de diversos fatores já tratados no Capítulo 11.

O comportamento do fósforo no sistema plantio direto difere em relação ao preparo convencional em três pontos básicos: a) o não revolvimento do solo reduz o contato entre os colóides e o íon fosfato, amenizando as reações de adsorção; b) a manutenção de resíduos culturais sem a sua incorporação ao solo, resulta na formação de linhas com maior concentração de fósforo devido à fertilização das culturas; c) a mineralização lenta e gradual dos resíduos, proporciona a liberação e redistribuição de formas orgânicas de P mais estáveis e menos susceptíveis às reações de adsorção. A Tabela 20.1 ilustra a

distribuição do P nas camadas amostradas em diversos solos sob plantio direto (Sá, 1993), evidenciando o acúmulo do nutriente superficialmente no perfil.

**Tabela 20.1. Distribuição de fósforo (extraível por Mehlich) em seis profundidades no perfil de cinco solos sob plantio direto da região dos Campos Gerais - PR.**

Profundidade (cm)	Solos avaliados					Média
	LE arenoso <sup>a</sup>	LV argilo- arenoso <sup>b</sup>	LV argiloso <sup>c</sup>	LE argiloso <sup>d</sup>	Cb arenoso <sup>e</sup>	
	.....mg/dm <sup>3</sup> .....					
0,0-2,5	28,8	79,2	129	119,7	82,5	87,8
2,5-5,0	17,9	35,5	89,6	68,5	58,8	54,1
5,0-10,0	10,7	10,6	36,6	59,8	67,5	37,0
10,0-20,0	2,9	3,0	11,5	12,2	13,1	6,4
20,0-30,0	0,9	0,9	1,3	1,5	2,5	1,4
30,0-40,0	0,9	0,7	0,7	1,3	2,4	1,2

<sup>a</sup> P.D.= 4 anos; <sup>b</sup> P.D.= 9 anos; <sup>c</sup> P.D.= 16 anos; <sup>d</sup> P.D.= 15 anos; <sup>e</sup> PD.= 15 anos.

Fonte: Sá (1993).

Como o potássio entra em contato com as raízes por difusão e fluxo de massa, processos que dependem fundamentalmente do teor de água do solo, espera-se que o contato íon-raiz seja facilitado no sistema de PD, visto que a presença de cobertura com palha induz melhor conservação da água do solo. Desta forma, deve haver um melhor aproveitamento do K do solo pelas plantas. Por outro lado, a estabilização do sistema leva, dependendo do tipo de solo, à melhor infiltração da água, o que pode provocar o aumento da lixiviação se o sistema não for bem manejado. Assim, em cultivos com semeadura direta, o manejo tem importância fundamental na economia da adubação potássica. Se bem manejado, o sistema poderá favorecer bom aproveitamento do adubo aplicado e menores perdas, o que é interessante do ponto de vista econômico e ambiental. Se, entretanto, houver manejo inadequado, poderá provocar conseqüências como perdas excessivas do nutriente ou esgotamento do solo (Rosolem, 1998).

Segundo este autor, uma vez que sempre há vegetação ou palha na superfície, uma parcela significativa do nutriente fica retido na matéria orgânica durante todo o tempo, sendo parte na espécie em crescimento, parte nos restos culturais. O K dos restos culturais e da espécie utilizada como cobertura retornará ao solo, para então ser novamente absorvido pela outra espécie. A velocidade deste retorno dependerá da lavagem da palha em superfície (chuvas) e da velocidade de decomposição do material.

Portanto, este K não é prontamente disponível para a espécie em crescimento, mas será liberado durante o desenvolvimento da planta, podendo não estar disponível na época de maior exigência.

## **20.2. RECOMENDAÇÕES DE CALAGEM E ADUBAÇÃO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO NO CERRADO**

Distintas condições climáticas entre a região Sul e o restante do país (áreas do cerrado) fazem com que o sistema de plantio direto, hoje amplamente difundido no Brasil, apresente características diferenciadas regionalmente, devido ao papel dos fatores temperatura e umidade como condicionantes da dinâmica da matéria orgânica, especialmente quanto à taxa de decomposição. Dessa forma, o acúmulo de palhada nas áreas sob plantio direto no cerrado ocorre de maneira muito menos intensa do que o observado no Sul, região pioneira na adoção deste sistema. Na realidade um dos grandes desafios dos técnicos e agricultores do cerrado é o estabelecimento de um programa de rotação de culturas envolvendo espécies que permitam maior quantidade e permanência da palhada ao longo do tempo.

Embora a adoção do plantio direto seja relativamente recente no estado de Minas Gerais e a pesquisa ainda não tenha acumulado dados absolutamente conclusivos sobre as alterações referentes à calagem e adubação nesse sistema, cabem alguns comentários referentes ao assunto, principalmente em relação à amostragem para avaliação dos índices de fertilidade do solo e princípios para eficiência das adubações, conforme sugerido pela CFSEMG (1999).

### **20.2.1. Amostragem do Solo**

A variabilidade dos índices de fertilidade do solo no sistema de plantio direto com adubação a lanço é similar à do sistema convencional (aração e gradagem). Entretanto, essa variabilidade aumenta quando a adubação do sistema plantio direto é feita na linha de semeadura, sendo maior na fase de implantação, em relação à fase estabelecida.

A fase de implantação pode ser definida como os primeiros cinco anos com uma cultura anual em plantio direto adubada ou seis cultivos seqüenciais adubados, sendo que, períodos com culturas de cobertura ou sequenciais, sem adubação, não devem ser considerados. Por outro lado, a fase estabelecida é aquela após a fase de implantação.

Em vista disso, recomendam-se os seguintes procedimentos para a coleta de amostra do solo:

#### **a) Antes de entrar no sistema plantio direto**

- Utilizar o mesmo procedimento do sistema convencional, ou seja, amostragem ao acaso, com trado ou pá de corte (camada de 0 a 20 cm), em 20 pontos na gleba, para formar uma amostra composta.

---



**b) Áreas sob plantio direto com adubação a lanço**

- Fase de Implantação: Utilizar o mesmo procedimento do sistema convencional durante a fase de implantação e na próxima amostragem que deve ocorrer ao término do 3º cultivo adubado, se for o caso.

- Fase Estabelecida: Na amostragem seguinte, que deve ocorrer ao término do 6º cultivo, amostrar a camada de 0 a 10 cm.

**c) Áreas sob plantio direto com adubação em linha**

- Fase de implantação: Amostrar com pá de corte, na camada de 0 a 20 cm, perpendicular ao sentido da linha, toda uma faixa correspondente à largura da entrelinha da cultura com o maior espaçamento introduzida no último ano agrícola. Retirar uma fina fatia de solo (aproximadamente 5 cm de espessura) em 15 locais por gleba e formar uma amostra composta.

- Fase estabelecida: Amostrar com pá de corte, na camada de 0 a 10 cm, perpendicular ao sentido da linha, toda uma faixa correspondente à largura da entrelinha da última cultura, conforme indicado na Figura 20.2. Coletar em 15 locais por gleba para formar uma amostra composta.

**20.2.2. Calagem**

As pesquisas têm demonstrado que as doses de calcário para atingir a Produtividade Máxima Econômica das culturas são menores no sistema plantio direto, em relação ao sistema convencional, principalmente pelo efeito da matéria orgânica acumulada na diminuição da toxidez de alumínio. Nesse aspecto, dois pontos são relevantes e merecem ser levados em conta.

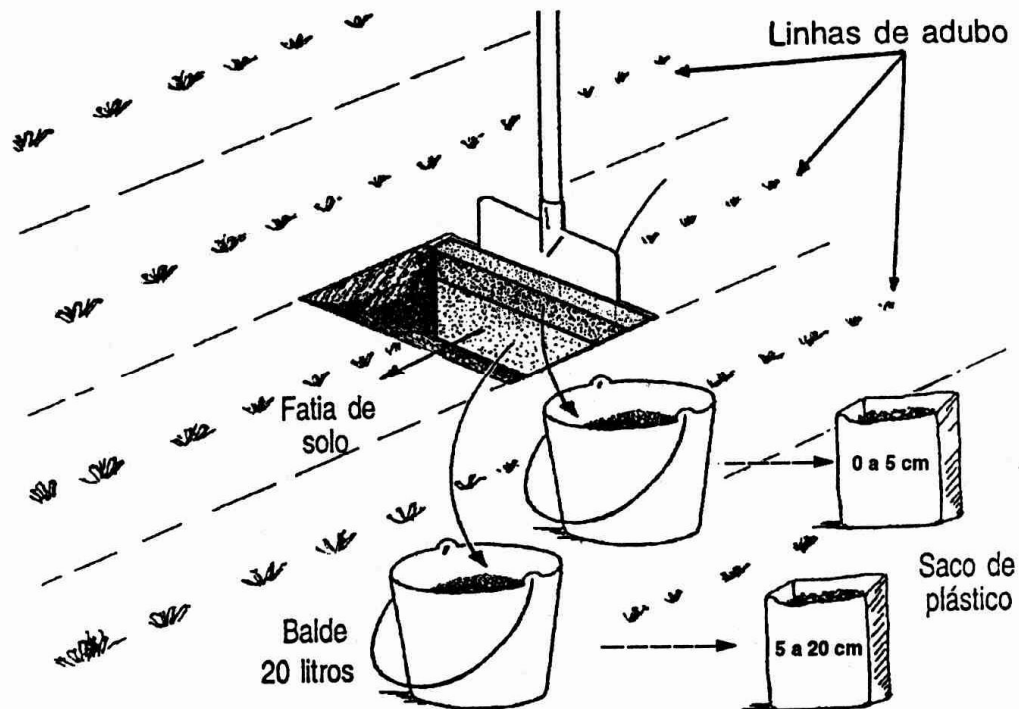
**a) Antes de entrar no sistema plantio direto**

- Na última aplicação de calcário, antes de entrar nesse sistema, o cálculo da calagem deve ser feito com base na amostragem na camada de 0 a 20 cm, sendo a dose calculada para essa camada e, de preferência, utilizando-se um calcário um pouco mais grosso (reatividade entre 50 e 60 %) com a finalidade de prolongar o efeito residual.

**b) Após a implantação do sistema plantio direto**

- As doses de calcário podem ser reduzidas para um terço, quando a amostragem for feita na camada de 0 a 20 cm, e à metade, quando a amostragem for feita na camada de 0 a 10 cm, utilizando-se um calcário de granulometria mais fina. Como princípio, a calagem no sistema plantio direto deve ser feita com pequenas doses anuais, ao invés de altas doses a cada três ou quatro anos, como no sistema convencional.

---



**Figura 20.2.** Representação do procedimento de amostragem de solo para análise da fertilidade do solo no sistema de plantio direto (CFSEMG, 1999). Detalhe da coleta, em profundidades distintas, de amostras simples (balde) para formar uma composta (sacola).

### 20.2.3. Nitrogênio

No sistema plantio direto, as recomendações e a eficiência das doses de nitrogênio para as diversas culturas dependem de uma série de fatores com destaque para os seguintes:

- a) A necessidade de culturas de cobertura e a maior intensificação de rotação de culturas no sistema plantio direto permitem sugerir uma diminuição de até 50 % da dose de nitrogênio recomendada após adubação verde com leguminosas de verão ou cereais cultivados nos resíduos de leguminosas (recomendação também válida para o sistema convencional).
- b) Em sistemas de rotação que envolvam gramíneas com alta relação C/N antecedendo a cultura principal, é recomendável aumentar a dose de N na semeadura (20 a 30 kg/ha) para diminuir a imobilização do fertilizante nitrogenado.

- c) As perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$  pela aplicação de uréia em superfície são muito maiores no sistema plantio direto do que no convencional. Essas perdas são minimizadas pela incorporação da uréia a 5 cm de profundidade ou pela irrigação controlada após a adubação. As perdas com fontes amoniacais e nítricas são muito menos acentuadas.

#### 20.2.4. Fósforo

Os resultados de pesquisa realizados em vários estados indicam que os fosfatos naturais reativos farelados (de origem sedimentar) são eficientes para as culturas anuais quando incorporados a solos (sistema convencional) com pH em água de até 5,5 e quando o teor de fósforo no solo for igual ou superior ao teor médio. Nestas condições, a sua eficiência agrônômica no primeiro cultivo, comparada à do superfosfato triplo (com base no teor de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total), é de 60 a 70 %.

No caso de solos com teores baixos em fósforo, devem ser utilizados fertilizantes fosfatados acidulados (superfosfatos simples, triplo, etc.) com aplicação em sulcos.

Em solos sob sistema de plantio direto já estabilizado (mais de 5 anos) e que já atingiram teores altos em fósforo não existem diferenças sensíveis entre as fontes de fósforo (fosfatos reativos farelados e adubos fosfatados acidulados) e os modos de aplicação (a lanço ou em sulcos).

#### 20.2.5. Potássio

Ao entrar no sistema plantio direto, é recomendável fazer uma adubação potássica corretiva, a lanço, em solos com textura média a argilosa, calculada para atingir 3 a 5 % da CTC a pH 7,0 saturada com potássio. As adubações de manutenção seguintes devem ser feitas no sulco até que o solo atinja teores médios a altos em potássio, quando então essas adubações de manutenção poderão ser feitas a lanço, juntamente com as adubações fosfatadas de manutenção em solos médios a altos em fósforo.

#### 20.2.6. Gesso Agrícola

Para áreas com subsolo ácido, deficientes em cálcio e com toxidez de alumínio, o uso do gesso agrícola é uma prática eficiente para o aprofundamento do sistema radicular. Os critérios para avaliação desses problemas e as alternativas para recomendações de doses de gesso são os mesmos para o sistema convencional.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ALEXANDER, M. **Introduction to Soil Microbiology**, Second edition. New York, WUey, 1977.

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Viçosa:SBCS, 2000. p.27-32 (Boletim Informativo, v.25, n.1).

ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 44:1041-44, 1980.

ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. **Agron. J.**, Madison, 72:685-688, 1980.

ARNON, D.I.; STOUT, P.R. The essentiality of certain elements in diminute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, 14:371-75, 1939.

BARROW, N.J. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Eds.) **The role of phosphorus in agriculture**. p.333-359. 1980.

BARTLETT, R.J.; SIMPSON, T.J. Interaction of ammonium and potassium in a potassium-fixing soil. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 31:219-22, 1967.

BEKELE. T.; CINO, B.J.; EHLERT, P.A.I.; MASS, AA., DIEST, A. An evaluation of plant-borne factors promoting the solubilization of alkaline rock phosphates. **Plant Soil**, 75:361-378, 1983.

BIEDERBECK, V.O. Soil organic sulfur and fertility. In: SCHNITZER, M.; KHAN, S.V. (Eds.) **Soil Organic Matter**. Amsterdam, Elsevier, 1978, p.273-310.

BLACKMER, A.M.; POTTKER, D.; CERRATO, M.E.; WEBB, J. Correlations between soil nitrate concentrations in late spring and corn yields in Iowa. **Journal of Production Agricultural**. 2:103-9, 1989.

BOARETTO, A.E.; CRUZ, A.P.; LUZ, P.H.C. **Adubo líquido: produção e uso no Brasil**. Campinas, Fundação Cargill, 1991. 323p.

BRAGA, F.A. **Efeito do gesso agrícola no crescimento inicial e na nutrição mineral do *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden sob diferentes níveis de irrigação**. Lavras:ESAL, 1991. 138p. (Dissertação de Mestrado).

---

BRANDÃO, R.P. **Relação do nitrogênio disponível no solo com o crescimento e absorção do nitrogênio pelo algodoeiro (*Gossypium hirsutum*, L).** Lavras:ESAL, 1990. 89p. (Dissertação de Mestrado).

BROMFIELD, A.R. Sulfur in Northern Nigerian soils. 1. The effects of cultivation and fertilizers on total S and sulphate patterns in soil profiles. **Agricultural Science**, 78:465-70, 1972.

BROYER, T.C.; CARLTON, A.B.; JOHNSON, C.M.; STOUT, P.R. Chlorine: A micronutrient element for higher plants. **Plant Physiology**, 29:526-32, 1964.

BRUCE, R.C.L.; WARRELL, L.A.; EDWARDS, D.G. & BELL, L.C. Effects of aluminium and calcium in the soil solution of acid soils and root elongation of *Glycine max* cv. Forrest. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, 39(3):319-38. 1988.

CARNIEL, I. **Atividade agrícola e recursos naturais na região sob influência do reservatório da hidrelétrica de Itutinga / Camargos (MG).** Lavras, ESAL, 1994. 90p. (Dissertação de Mestrado).

CARVALHO, M.M.. MARTINS, C.E.. VERNEQUE, R.S. SIQUEIRA, C. Resposta de uma espécie de braquiária à fertilização com nitrogênio e potássio em um solo ácido. **Rev. Bras. Ciência Solo**, 15:195-200, 1991.

CHAO, T.T.; HARWARD, M.E.; FANG, S.C. Iron or aluminum coatings in relation to sulphate adsorption characteristics of soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 28:623-5,1964.

COLEMAN, N.T.; KAMPRATH, R.J.; WEED, S.D. Liming. **Advances in Agronomy**, New York, 10:475-522,1958.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE GOIÁS. **Recomendação de corretivos e fertilizantes para Goiás.** Informativo Técnico, 1. 5ª aproximação. Goiânia, UFG/EMGOPA, 1988. 101p.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais.** 5ª aproximação. Viçosa, 1999. 359p.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** 3 ed. Passo Fundo:SBCS, 1994. 224p.

EHLERS, W.; GEBHARDT, H.; MEYER, B. Investigations into the position specific bonds of potassium to illite, kaolinite, montmorillonite and humus. **Z. Pflanzenernahr**, 119:173-186, 1968.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados.** 1980-1981. Brasília, 1982. 163p.

---

FAGERIA, N.K; BALIGAR, V.C., WRIGHT, R.J. Aluminum toxicity in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, 11:303-19, 1988.

FIXEN, P.E.; GROVE, J.H. Testing soil for phosphorus. In: WESTERMAN, R.L. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. 3<sup>rd</sup> ed. Madison, American Society of Agronomy, 1990. p.141-180.

FOX, R.L.; OLSON, R.A.; RHOADES, H.F. Evaluating the sulfur status of soils by plant and soil tests. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 28:243-6, 1964.

FOY, C.D. Effects of aluminum on plant growth. In: CARSON, E.W. (Ed.). **The plant root and its environment**. University Press of Virginia, 1974. p.601-42.

GALRÃO, E.Z. Resposta do trigo à aplicação de cobre em um solo orgânico de várzea. **Rev. Bras. Ciência Solo**, 12:275-79, 1988.

GOEDERT, W.J. Management of acid tropical soils in the savannas of South America. In: IBSRAM (International Board for Soil Research and Management). **Management of acid tropical soils for sustainable agriculture**: proceedings of an IBSRAM inaugural workshop. Bangkok, Thailand, 1987. p.109-27.

GOEDERT, W.J.; RITCHEY, K.D.; SANZONOWCZ, C. Desenvolvimento radicular do capim - andropogon e sua relação com o teor de cálcio no perfil do solo. **Rev. Bras. Ciência Solo**, Campinas, 9(1):89-91. 1985.

GUAZZELLI, E.M.F.M. **Efeito de nitrato e amônio no crescimento, assimilação e eficiência de utilização do nitrogênio por cultivares de feijoeiro na fase inicial de crescimento**. Lavras:ESAL, 1988. 90p. (Dissertação de Mestrado).

HINGSTON, F.J.; POSNER, A.M.; QU1RK, J.P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. II. Desorption of anions from hydrous oxide surfaces. **Journal Soil Science**, 25:16-21, 1974.

HODGSON, J.F.; LINDSAY, W.L; TRIERWEILER, J.F. Micronutrient cation complexing in soil solution. II. Complexing of zinc and copper in displacing solution from calcareous soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, 30:723-6, 1966.

HOEFT, R.G.; WALSH, LM.; KEENEY, D.R. Evaluation of various extractants for available sulfur. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 37:4014, 1973.

HOWARD, D.D.; ADAMS, F. Calcium requirement for penetration of subsoil by primary cotton roots. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, 29(5):558-62. 1965.

JACOBSON, L.; MOORE, D.P.; HANNAPEL, R.J. Role of calcium in absorption of monovalent cations. **Plant Physiology**, London, 35(3):352-8. 1960.

KAGE, H. Prática da adubação verde na Alta Mogiana, em São Paulo, e Minas Gerais. In: **Adubação verde no Brasil**. Campinas: Fundação Cargill, 1984. p.129-32.

---

KAMPRATH, E J. Residual effect of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils. **Agron. J.**, Madison, 59:25-27, 1967.

KAMPRATH, E.J. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, 34:254-4, 1970.

KOLEMBRANDER, G.J.; NEETESON, J.J.; WIJNEN, G. Investigation in the Netherlands of optimum nitrogen fertilization on the basis of the amount of Nmin in the soil profile. **Pedologie**, 31:365-77, 1981.

KOVAR, J.L.; BARBER, S.A. Reasons for differences among soils in placement of phosphorus for maximum predicted uptake. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, 53:1733-1736, 1989.

LANTMAN, A.F.; SFREDO, G.J.; BORKERT, C.M.; OLIVEIRA, M.C.N. Resposta da soja a molibdênio em diferentes níveis de pH do solo. **Rev. Bras. Ciência Solo**, 13:45-9, 1989.

LOPES, A.S. **A survey of the fertility status of soil under "cerrado" vegetation in Brasil.** Raleigh, NCSU, 1975. 138p. (MS Thesis).

LOPES, A.S. **Calagem e gesso agrícola.** In: Encontro técnico sobre gesso agrícola. Belo Horizonte, 1986. 58p.

LOPES, A.S. **Solos sob cerrado:** características, propriedades e manejo. Piracicaba: POTAFOS, 1983. 162p.

LOPES, A.S.; ABREU, C.A. Manejo da fertilidade do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte: EPAMIG, nº 147, p.3-21.

LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. **Solos sob cerrado:** Manejo da fertilidade para a produção agropecuária. São Paulo: ANDA. 1992. 49p. (Boletim Técnico nº 5).

LUND, Z.F. The effect of calcium and its relation to some other cations on soybean root growth. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 34:456-9, 1970.

MALAVOLTA, E. **O gesso agrícola no ambiente e na nutrição da planta perguntas e respostas.** 1991. Mimeografado. 29p.

MALAVOLTA, E. Fertilizantes, corretivos e produtividade - mitos e fatos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 23. **Anais...** Piracicaba, RBCS, 1992. p.89-153.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola:** adubos e adubação. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 596p.

MALAVOLTA, E.; NETTO, A.V. **Nutrição Mineral, calagem, gessagem e adubação dos citros.** POTAFOS, Piracicaba, 1989. 153p.

---

MARQUES, M.A. **Potencial alelopático de resíduos de caruru (*Amarantus wridis*, L.), incorporados em três tipos de solos, sobre a germinação e crescimento inicial do algodoeiro (*Gossypium hirsutum*, L.)**. Lavras: ESAL, 1992. 125p. (Dissertação de Mestrado).

MENGEL, K.; VON BRAUNSCHWEIG, LO. The effect of soil moisture upon the availability of potassium and its influence on the growth of young maize plants. **Soil Science**, 134:142-148.1972.

MORTVEDT, J.J. Micronutrients fertilizers and fertilization practices. In: VLEK, P.L.G (Ed.). **Micronutrients in tropical food crop production**. Dordrecht: Martinus Nijhoff/W. Junk Publishers, 1985. p.221-235.

MUZILLI, O. Manejo da fertilidade do solo. In: **Plantio direto no Estado do Paraná**. Curitiba, IAPAR, 1981. p.43-57.

MUZILLI, O. Fertilidade do solo em plantio direto. In: FACELLI, A.L.; TORRADO, P.V.; MACHADO, J. (Eds.). **Atualização em plantio direto**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p.147-160.

MUZILLI, O. Influência do sistema plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Rev. Bras. Ciência do Solo**, Campinas, v.7, n.1, p.95-102, 1983.

MUZILLI, O. O plantio direto como alternativa no manejo e conservação do solo. In: **CURSO BÁSICO PARA INSTRUTORES EM MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO**. Londrina: Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1991. 20p.

NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. Efeito do alumínio em amostras de dois latossolos sob cerrado sobre o crescimento e a absorção de nutrientes por mudas de *Eucalyptus ssp*. **Revista Árvore**6:17 -28, 1982.

NOVAIS, R.F.; BAHIA FILHO, A.F.C.; RIBEIRO, A.C.; VASCONCELLOS, C.A. Solubilização de fosfatos incubados com amostras de latossolo submetidas a diferentes números de revolvimentos. **Rev. Bras. Ciência Solo**, Campinas, 9:23-26,1985.

OATES, K.M.; CALDWELL, A.G. Use of product gypsum to alleviate soil acidity. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, 49(4):915-18. 1985.

OLIVEIRA, P.S.R. **Avaliação do potencial forrageiro e industrial de duas variedades de cana-de-açúcar (ciclo de ano) sob diferentes níveis de nitrogênio**. Lavras, 1992. 72p. (Dissertação de Mestrado, ESAL).

OLSEN, S.R.; KHASAWANEH, F.E. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In: KHASAWANEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Eds.). **The role of phosphorus in agriculture**. p. 361-410,1980.

---



PAIVA, P.J.R. **Parâmetros da fertilidade de um solo do Paraná sob diferentes sistemas de manejo**. Lavras:ESAL, 1990. 88p. (Dissertação de Mestrado).

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. Effects of phosphogypsum and lime on yield, root density and fruit and foliar composition of apple in Brazilian Oxisols. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM PHOSPHOGYPSUM. **Proceedings...** Miami, florida. 1986.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T.; PRATF, P.F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium and aluminum following lime or gypsum application to a Brazilian oxisol. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, 48(1):33-8. 1984.

PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, 24:29-96, 1972.

PONNANPERUMA, F.N. **Physicochemical properties of submerged soils in relation to fertility**. Los Banos, IRRI, 1977.32p. (Research Paper Series,5).

PÖTTKER, D. Calagem em solos sob plantio direto e em campos nativos do Planalto Médio Gaúcho. In: SÁ, J.M. (Ed.). CURSO SOBRE MANEJO DO SOLO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1995. **Anais...** Castro: Fundação ABC, 1996. p.108-118.

PREZOTTI, LO.; DEFELIPO, B.V. Formas de potássio em solos do estado de Minas Gerais. **Rev. Bras. Ciência Solo**, 11:109-14, 1987.

QUAGGIO, J.A. Variações na interpretação de resultados de análise de solo, em função do local de amostragem, na citricultura. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21. **Anais...** Petrolina, SBCS, 1994. p.405-407.

QUAGGIO, J.A.; SAKAI, M.; ISHIMURA, I.; SAES, LA.; BATAGLIA, O.C. Calagem para a rotação feijão-milho verde em solo orgânico do vale do Rio Ribeira de Iguape (SP). **Rev. Bras. Ciência Solo**, 9:255-61, 1985.

QUAGGIO, J.A.; SOBRINHO, J.T.; DECHEN, A.R. Relações entre as bases no solo e produtividade da laranjeira. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20. **Anais...** Piracicaba, 1982. p.146-7.

RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba:POTAFOS, 1981. 142p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba:CERES/POTAFOS, 1991. 343p.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e necessidades de calcário e fertilizantes para o Estado de São Paulo. **O Agrônomo**Campinas, 37(1):13 -21, 1985.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas:IAC, 1996. 285p.

---

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. Adubação de milho para o estado de São Paulo. **Informações Agronômicas**, São Paulo:POTAFOS, n<sup>o</sup> 65,1994. p.8.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. (Boletim Técnico, 81).

RAIJ, B. van; SILVA, N.M.; BATAGLIA, O.C.; QUAGGIO, J.A.; HIROCE, R.; CANTARELLA, H.; BELLINAZZI Jr., R.; DECHEN, A.R.; TRANI, P.E. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico, 1985. 107p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B.van; DIEST, A.van. Utilization of phosphate from different sources by six plant species. **Plant and Soil**, 51:577-89,1979.

RAIJ, B.van; QUAGGIO, J.A. Disponibilidade de potássio em solos para capim-braquiária cultivado em latosolos. **Bragantia**, 43:531-9, 1984.

RAMOS, M.A. Sistemas de preparo mínimo do solo: técnicas e perspectivas para o Paraná. Ponta Grossa:EMBRAPA, 1976. 23p. (Comunicação Técnica, 1)

REEVE, N.G.; SUMNER, M.E. Amelioration of subsoil acidity in Natal oxisols by leaching of surface applied amendments. **Agrochemophysica**, Pretoria, 4(18):1-6. 1972.

RICCI, M.S.F.; DEFELIPO, B.V.; COSTA, LM.; REZENDE, S.B. As frações granulométricas do solo como reserva de potássio para as plantas. **Rev. Bras. Ciência Solo**, 13:181-86, 1989.

RITCHEY, K.D.; SILVA, J.E.; SOUSA, D.M.G. Relações entre teor de cálcio no solo e desenvolvimento de raízes avaliado por um método biológico. **Rev. Bras. Ciência Solo**, Campinas, 7(3):269-75. 1983.

RITCHEY, KD. **O potássio nos Oxissolos e Ultissolos dos trópicos úmidos**. Piracicaba:POTAFOS, 1982. 69p. (Boletim Técnico, 7).

ROSOLEM, C.A. Adubação potássica em semeadura direta. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO. 1997. **Anais...** Dourados:EMBRAPA/CPAO, 1998. p.59-75. (Documentos, 22).

ROSELEM, C.A.; MACHADO, J.R.; RIBEIRO, D.B.O. Formas de potássio no solo e nutrição potássica da soja. **Rev. Bras. Ciência Solo**, 12:121-25, 1988.

RUIZ, H.A.; FERNANDES, B.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H. Efeito da umidade do solo sobre o volume e o conteúdo de fósforo no exudato xilemático de soja. **Rev. Bras. Ciência Solo**, 12:39-42, 1988.

SÁ, J.C.M. Manejo da fertilidade do solo no plantio direto. Castro: Fundação ABC, 1993. 96p.

---

SÁ, J.C.M. Nitrogênio: influência da rotação de culturas e resposta da cultura de milho em solos sob plantio direto. In: SÁ, J.M. (Ed.). CURSO SOBRE MANEJO DO SOLO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1995. Anais... Castro: Fundação ABC, 1996. p.213-228.

SÁ, J.C.M. Reciclagem de nutrientes dos resíduos culturais e estratégia de fertilização para produção de grãos no sistema plantio direto. In: SEMINÁRIO SOBRE O SISTEMA PLANTIO DIRETO NA UFV, 1. 1998. Resumos... Viçosa:UFV/DFT, 1998. p.19-61.

SANZONOWICZ, O.; MIELNICZUK, J. Distribuição do potássio no perfil de um solo, influenciado pela planta, fontes e métodos de aplicação de adubos. **Rev. Bras. Ciência Solo**, 9:45-50, 1985.

SCHOUWENBURG, J.C.; SCHUFFELEN, A.C. Potassium exchange behaviour of an illite. **Netherlands Journal Agricultural Science**, 11:13-22. 1963.

SÉGUY, L.; BOUZINAC, S. O plantio direto no cerrado úmido. **Informações Agronômicas**, Piracicaba:POTAFOS, 1995. n<sup>o</sup> 69, p.1-4.

SHOEMAKER, H.E.; McLEAN, E.O.; PRATT, P.F. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, 25:274-277, 1961.

SIDIRAS, N.; PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo no seu nível de fertilidade. **Rev. Bras. Ciência do Solo**, Campinas, v.9, n.3, p.249-254, 1985.

SILVA, A.A. **Efeito de relações  $\text{CaCO}_3$  /  $\text{CaSO}_4$  no movimento de nutrientes no solo e no desenvolvimento do algodoeiro (*Gossypium hirsutum*)**. Lavras: ESAL, 1990. 80p. (Dissertação de Mestrado).

SILVA, C.A.; VALE, F.R.; GUILHERME, L.R.G. Nitrificação em latossolos da região Sul de Minas Gerais: efeito da acidez do solo. **Ciência e Prática**, Lavras (no prelo), 1995.

SILVA, C.A.;VALE, F.R.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; SIQUEIRA, J.O. Crescimento inicial do feijoeiro: efeito da acidez do solo e da adição de fertilizantes nitrogenados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24, **Anais...**Goiânia, 993. p.33-34.

SILVA, J.R.T.; MEURER, E.J. Disponibilidade de potássio para as plantas em solos do Rio Grande do Sul em função da capacidade de troca de cátions. **Rev. Bras. Ciência Solo**, 12:137-142, 1988.

SILVA, N.M.; CARVALHO, L.H.; CIA, E. Seja o doutor do seu algodoeiro. **Arquivo do Agrônomo**, São Paulo:POTAFOS, n<sup>o</sup> 8,1995, 24p.

SILVA, V.M.L.; MAGALHÃES, J.R.; SILVA, F.L.I.M. Resposta da batata ao cálcio e correção da acidez em Latossolo Vermelho-Amarelo, em casa de vegetação. **Rev. Bras. Ciência Solo**, Campinas, 11(1):81-3. 1987.

---

SILVEIRA, P.M.; MOREIRA, J.A.A. Resposta do feijoeiro a doses de fósforo e lâminas de água de irrigação. **Rev. Bras. Ciência Solo**, 14:63-7, 1990.

SIMS, J.R.; BINGHAM, F.T. Retention of boron by layer silicates, sesquioxides and soil materials: II. Sesquioxides. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 32:364-69, 1968.

SIQUEIRA, O.J.F.; SHERER, E.E.; TASSINARI, G.; ANGHINONI, I.; PATELLA, J.F.; TEDESCO, M.J.; MILAN, P.A.; ERNANI, P.R.; WETHOLTER, S. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo: EMBRAPA, 1989. 128p.

SOUSA, D.M.G. Uso de gesso na adubação. In: SEMINÁRIO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE PERNAMBUCO, PARAÍBA E RIO GRANDE DO NORTE, 4, Natal. 1988.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E.; MIRANDA, L.N. Correção do solo e adubação da cultura da soja. In: **Cultura da soja nos cerrados**. Piracicaba: Potafos, 1993. p.137-158.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. **Uso de gesso agrícola nos solos dos cerrados**. Planaltina:EMBRAPA/CPAC, 1995, 20p. (Circular Técnica, 32)

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; LOBATO, E. **Interpretação de análise de terra e recomendação de adubos fosfatados para culturas anuais nos cerrados**. Planaltina: EMBRAPA/CPAC, 1987. 7p. (Comunicado Técnico, 51).

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; LOBATO, E. Métodos para determinar as necessidades de calagem em solos de cerrados. **Rev. Bras. Ciência Solo**, Campinas, 13:193-8, 1989.

SOUSA, D.M.G.; REIN, T.A.; LOBATO, E.; RITCHEY, K.D. Sugestões para diagnose e recomendação de gesso em solos de cerrado. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA.2. **Anais...** Uberaba, Instituto Brasileiro do Fosfato, 1992. p.139-158.

SOUSA, D.M.G.; RITCHEY, K.D. Uso do gesso no solo de cerrado. In: SEMINÁRIO SOBRE USO FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, **Anais...** 1986. p. 119-144.

STEVENSON, F.J.; ARDAKANI, M.S. Organic matter reactions involving micronutrients in soils. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L. (Eds.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p.79-114.

SUMNER, M.E.; CARTER, E. Amelioration of subsoil acidity. **Com. Soil Sci. Plant Anal.**, 19:1309-18. 1988.

SUMNER, M.E.; MILLER, W.P. RADCLIFFE, D.E.; McCRAY, M. Use of phosphogypsum as an amendment for highly weathered soils. In: WORKSHOP ON BY-PRODUCTS OF PHOSPHATE INDUSTRIES, 3, **Proceedings...** Florida Institute of Phosphate Research, 1986. p.111-136.

---

TEDESCO, M.J.; PANDOLFO, C.M.; ANGHINONI, 1. Efetividade da superfície específica de frações granulométricas de calcário na correção da acidez do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 18, **Anais...** Guarapari, ES, 1988. p.90.

TISDALE, S.L.; NELSON, WL.; BEATON, J.D.; HAVLIN, J.L. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Macmillan Publishing Company, 1993. 634p.

VAHL, L.C.; BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J.; GIANELLO, O. **A calagem e a cultura do arroz irrigado por alagamento no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1993. 16p. (Boletim Técnico de Solos nº 2)

VALE, F.R.; GUILHERME, L.R.G.; GUEDES, G.A.A. **Fertilidade do solo: dinâmica e disponibilidade de nutrientes**. Lavras: ESAL/FAEPE, 1993. 171p.

VALE, F.R.; RENÓ, N.B.; GURI, N.; SIQUEIRA, J.O.; CARVALHO, J.C.B. Sensibilidade de quinze espécies arbóreas à acidez do solo: efeito no crescimento de raízes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24, **Anais...** Goiânia, 1993. p.259-60.

VALE, F.R.; VOLK, R J; JACKSCN, W.A. Simultaneous influx of ammoninn and potassium into maize root systems: kinetics and interactions. **Planta**, 173:424-31, 1988.

VITOSH, M.L. **Nitrogen management strategies for potato producers**. Michigan State University, East Lansing, 1985. 4p. (Extension Bulletin WQ 09)

VLEK, P.L.G. & LINDSAY, W.L.T. Hermodynamic stability and solubiitiy of molybdenum minerals in soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 41 :42-46, 1977.

WAGNER, E. Desenvolvimento da região dos cerrados. In: GOEDERT, WJ. (Ed.). **Solos dos cerrados: tecnologia e estratégia de manejo**. São Paulo: Editora Nobel, 1986. p.19-31.

WERNER, J.C. **Adubação de pastagens**. Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, 1984. 49p. (Boletim Técnico, 18).

ZUBLENA, J. Nitrogen and phosphorus rates for starter fertilizers. In: STARTER FERTILIZEM FOR CROPS IN THE SOUTHEAST CONFERENCE. **Proceedeings...** Atlanta, GA: Potash and Phosphate Institute 1991. p.12-13. (PPI / FAR Technical Bulletin 1991-1).

---