

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO TECNOLÓGICA
EM AGRICULTURA FAMILIAR E SUSTENTABILIDADE A DISTÂNCIA

FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

5º semestre



Ministério
da Educação



Presidente da República Federativa do Brasil

Luiz Inácio Lula da Silva

Ministério da Educação

Ministro do Estado da Educação Fernando Haddad
Secretária da Educação Superior Maria Paula Dallari Bucci
Secretário da Educação a Distância Carlos Eduardo Bielschowsky

Universidade Federal de Santa Maria

Reitor Felipe Martins Müller
Vice-Reitor Dalvan José Reinert
Chefe de Gabinete do Reitor Maria Alcione Munhoz
Pró-Reitor de Administração André Luis Kieling Ries
Pró-Reitor de Assuntos Estudantis José Francisco Silva Dias
Pró-Reitor de Extensão João Rodolpho Amaral Flôres
Pró-Reitor de Graduação Orlando Fonseca
Pró-Reitor de Planejamento Charles Jacques Prade
Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa Helio Leães Hey
Pró-Reitor de Recursos Humanos Vania de Fátima Barros Estivaleta
Diretor do CPD Fernando Bordin da Rocha

Coordenação de Educação a Distância

Coordenador CEAD Fabio da Purificação de Bastos
Coordenador UAB Carlos Gustavo Martins Hoelzel
Coordenador de Pólos Roberto Cassol
Gestão Financeira Daniel Luís Arenhardt

Centro de Ciências Rurais

Diretor do Centro de Ciências Rurais Thomé Lovato
Coordenador do Curso de Graduação Tecnológica em Agricultura Familiar e Sustentabilidade a Distância Ricardo Simão Diniz Dalmolin

Elaboração do Conteúdo

Professor pesquisador/conteudista Danilo Rheinheimer dos Santos
Leandro Souza da Silva

**Equipe Multidisciplinar de Pesquisa e
Desenvolvimento em Tecnologias da Informação
e Comunicação Aplicadas à Educação**

Coordenadora da Equipe Multidisciplinar Elena Maria Mallmann
Materiais Didáticos Volnei Antônio Matté
Desenvolvimento Tecnológico André Zanki Cordenonsi
Capacitação Ilse Abegg

Produção de Materiais Didáticos

Designer Evandro Bertol
Designer Marcelo Kunde

Orientação Pedagógica Diana Cervo Cassol

Revisão de Português Marta Azzolin
Samarlene Pilon
Sílvia Helena Lovato do Nascimento

Ilustração Cauã Ferreira da Silva
Natália de Souza Brondani

Diagramação Emanuel Montagnier Pappis
Maira Machado Vogt

Suporte Moodle Ândrei Camponogara
Bruno Augusti Mozzaquatro

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO DA DISCIPLINA

6

UNIDADE A

A FERTILIDADE DO SOLO E A NUTRIÇÃO DE PLANTAS

7

Introdução.....	7
Capítulo 1 – Solo como um sistema aberto, coloidal e frágil.....	9
sistema aberto.....	9
sistema coloidal.....	10
sistema frágil.....	11
Capítulo 2 – Conceitos fundamentais em fertilidade do solo.....	13
nutriente essencial.....	13
elemento/substância tóxico(a).....	13
classificação dos nutrientes.....	13
íons na solução versus íons na fase sólida.....	15
aproximação até as raízes (fluxo de massas e difusão).....	16
absorção de nutrientes e elementos tóxicos.....	17

UNIDADE B

A ACIDEZ E A CALAGEM

19

Introdução.....	19
Capítulo 1 – Acidez do solo: origem, tipos e consequências.....	21
Origem da acidez dos solos.....	21
tipos de acidez do solo.....	25
consequências da acidez do solo.....	27
a toxidez por alumínio.....	30
Capítulo 2 – Acidez do solo: diagnóstico e correção.....	32
tomada de decisão para a aplicação de calcário.....	33
estabelecimento da dose de corretivo.....	37
aplicação de calcário.....	41

UNIDADE C

DINÂMICA DE NUTRIENTES

44

Introdução.....	44
Capítulo 1 – Biogeoquímica do fósforo.....	44
Aspectos teóricos da dinâmica do fósforo no sistema solo-planta.....	45
Aspectos práticos do diagnóstico e recomendação de fósforo às plantas.....	56
Métodos de análises de fósforo disponível no solo.....	56
Capítulo 2 – Biogeoquímica do potássio.....	66
Aspectos teóricos da dinâmica do potássio no sistema solo-planta.....	66
Aspectos práticos da recomendação da adubação potássica.....	72
Capítulo 3 – Biogeoquímica do nitrogênio.....	75
Aspectos teóricos da dinâmica do nitrogênio no sistema solo-planta.....	75
Aspectos práticos da recomendação da adubação nitrogenada.....	78
Capítulo 4 – Biogeoquímica do cálcio, magnésio e enxofre.....	82
Cálcio e magnésio.....	82
Enxofre.....	83
Diagnóstico da disponibilidade de enxofre.....	87
Capítulo 5 – Biogeoquímica dos demais nutrientes essenciais.....	89
5.1. Por que são denominados de micronutrientes?.....	90
5.2. Fatores que afetam a disponibilidade dos micronutrientes.....	92
5.3. Descrição da biogeoquímica, diagnóstico da disponibilidade e formas de correção das deficiências.....	96

UNIDADE D

SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO 109

Introdução.....	109
Capítulo 1 – Amostragem do solo.....	110
Capítulo 2 – Interpretação dos resultados da análise do solo.....	116
Capítulo 3 – Recomendação de nitrogênio, fósforo e potássio.....	121
Introdução.....	121
Capítulo 4 – Adubação orgânica.....	131
4.1 – Concentração de nutrientes em resíduos orgânicos.....	132
4.2 – Índices de eficiência dos nutrientes.....	135
4.3 – Cálculo das quantidades de nutrientes a aplicar.....	137
4.4 – Uso conjunto da adubação orgânica e mineral.....	138
4.5 – Manejo dos adubos orgânicos.....	140

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA 142

UNIDADE E

DINÂMICA DE NUTRIENTES EM SOLOS ALAGADOS E MANEJO DA CALAGEM E ADUBAÇÃO DO ARROZ IRRIGADO 143

Introdução.....	143
Capítulo 1 – Alterações no solo provocadas pelo alagamento.....	146
Alterações físicas.....	146
Alterações biológicas.....	147
Alterações químicas.....	149
Capítulo 2 – O alagamento e a ocorrência de compostos tóxicos e emissão de gases de efeito estufa.....	150
Toxidez por ferro.....	150
Ácidos orgânicos.....	151
Sulfeto de hidrogênio.....	153
Emissão de gases de efeito estufa.....	153
Capítulo 3 – Sistema de recomendação de adubação para o arroz irrigado.....	154
Calagem.....	156
Adubação.....	157
Desordens nutricionais.....	161

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 164

APRESENTAÇÃO DA DISCIPLINA

Esta disciplina tem como objetivo fundamental proporcionar o entendimento básico sobre a capacidade de o solo fornecer nutrientes essenciais ao crescimento e desenvolvimento das plantas, permitindo identificar os principais fatores que afetam tal capacidade, bem como ser capaz de diagnosticar as condições do solo e possibilitar uma tomada de decisão para sua correção ou manutenção na gestão de propriedades rurais. Para isso, propomos uma sequência de atividades e conteúdos de modo a entender o papel do solo nesse processo, a dinâmica dos elementos no ambiente e o sistema de recomendação de calagem e adubação para as culturas e os impactos da utilização de insumos no manejo da fertilidade do solo.

Assim, as aulas serão organizadas a partir de leituras, realização de atividades práticas e ambientes de interação com os colegas e professores, estimulando o estudo, a curiosidade, a criatividade, a pesquisa, a participação e, especialmente, o desejo de aprender cada vez mais.

Contamos com você através de uma participação ativa nesse processo, para que possamos atingir nossos objetivos ao final do semestre. Apesar de distante, você não estará sozinho, podendo interagir com os professores e tutores, além das atividades via ambiente virtual.

Esta disciplina será desenvolvida com uma carga horária de setenta e cinco (75) horas/semestre.

UNIDADE A

A FERTILIDADE DO SOLO E A NUTRIÇÃO DE PLANTAS

INTRODUÇÃO

O principal significado da palavra “fertilidade”, do Latim *fertilitate*, é qualidade de fértil. Fértil significa capaz de produzir com facilidade, de inventar, de criar, produtivo, inventivo e criador. Diz-se também de terra muito fecunda, que produz muito (Ferreira, 1986). Desse modo, a Fertilidade do Solo deve estudar a dinâmica dos elementos no solo, como uma planta se nutre, as práticas para melhorar ou manter essa condição e, também, dos destinos dos insumos aplicados ao solo e suas consequências econômicas e ambientais. Este conceito não deveria estar desconexo dos conceitos de Ciência do Solo, Agronomia e, muito menos, da Ciência da Vida. No entanto, para fins de melhor compreensão das partes, há necessidade de fragmentação do todo. Então, Fertilidade do Solo envolve vários **fatores relacionados** com a capacidade dos solos, do ar e da água em suprir as plantas com os nutrientes essenciais em quantidades adequadas para seu pleno crescimento e desenvolvimento, na ausência de elementos em níveis tóxicos. Adicionalmente, deve-se considerar que a nutrição mineral de plantas estuda a sua provisão com os nutrientes essenciais, considerando (a) os eventos que ocorrem com o nutriente no solo para torná-lo disponível, (b) a sua aproximação ao sítio de absorção, ou a sua entrada no apoplasto – espaços intercelulares da epiderme ou endoderme, (c) a sua passagem para o simplasto – interior das células, e (d) a sua incorporação no processo fisiológico específico.

A Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, como uma das disciplinas da subárea da Ciência do Solo, necessita, portanto, de conhecimentos profundos de: (a) Gênese e Propriedades do Solo (aspectos físicos e físico-hídricos do solo); (b) Biologia do Solo (aspectos biológicos, mais aprofundadamente as biotransformações nos ciclos dos elementos químicos); (c) Fisiologia Vegetal (aspectos bioquímicos e fisiológicos, em especial as rotas metabólicas em que estão envolvidos os nutrientes e elementos tóxicos); Ambiente (aspectos ecológicos, especialmente as transferências de elementos químicos aos mananciais de água, a poluição atmosférica com gases de efeito estufa e a reciclagem de elementos químicos); Socioeconomia (aspectos sociais, em especial a relação dos agricultores com os complexos agroindustriais de fertilizantes, e a maximização econômica do uso desses insumos).

Assim, nas disciplinas do Eixo Temático Solos e Água que vocês já cursaram até o momento no curso de Agricultura Familiar e Sustentabilidade foram apresentados e discutidos vários assuntos

que são pertinentes à disciplina de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Então recomendamos a todos que façam uma releitura em alguns pontos referentes à funcionalidade do sistema solo (gênese, organização, dinâmica química, biológica e microbiológica, alguns nomes de solos e seu significado agrônomo, armazenamento de água, entre outros). A partir dessa revisão, siga com o conteúdo e as atividades programadas na disciplina.

CAPÍTULO 1 – SOLO COMO UM SISTEMA ABERTO, COLOIDAL E FRÁGIL

A Fertilidade do Solo, no sentido restrito, visa à nutrição de plantas e, por isso, é importante considerar a planta como um organismo vivo e como sua anatomia e fisiologia podem influenciar na sua capacidade de utilizar eficientemente os recursos (naturais ou adicionados) disponíveis ao seu crescimento e desenvolvimento. Logo, o manejo da Fertilidade do Solo deve ser feito como uma das práticas agrícolas que, associadas às demais, pode proporcionar maior produtividade às culturas com menor impacto ambiental.

Embora o solo possa ser conceituado de diferentes maneiras de acordo com a finalidade com que é considerado, para fins de estudo em Fertilidade do Solo, entre várias visões de que é um solo, acreditamos que a melhor delas é considerá-lo como sendo sinônimo de: sistema aberto, coloidal e frágil:

SISTEMA ABERTO

O termo aberto leva à compreensão da continuidade dos fenômenos, da possibilidade de ganhos e perdas, tanto de matéria como de energia, da necessidade de atuação com cautela na adição de insumos e dos ciclos dos elementos químicos de modo contínuo na atmosfera-solo-hidrosfera (Figura 1).

No que tange à Fertilidade do Solo, deve-se maximizar as entradas de energia e matéria que visam incrementar sua capacidade de produzir e resistir aos impactos humanos. Assim, é imprescindível que haja entrada de carbono via fotossíntese, pois será fonte de energia, elétrons e nutrientes à biota heterotrófica do solo. Além disso, o armazenamento deste carbono no solo em frações humificadas induzirá modificações no ciclo de, praticamente, todos os elementos químicos e na dinâmica da água, na estruturação do solo, entre outros. Também, graças ao contato com a atmosfera, há possibilidades biológicas de incorporação ao solo na forma orgânica do nitrogênio do ar – inacessível à grande maioria dos seres vivos. Da mesma forma, tem-se colocado ao solo muitas substâncias com elevado poder de alteração biológica e física do solo, como, por exemplo, agrotóxicos e metais pesados, com reflexos negativos à fertilidade do solo.

Por outro lado, sistema aberto significa possibilidades enormes de transferências de energia e matéria à atmosfera e hidrosfera. Pelo menos parte de tudo o que for adicionado ao solo será transferido para outros sistemas. Destaque especial é a transferência do próprio solo, dos elementos químicos, agrotóxicos e contaminantes biológicos aos sistemas aquáticos. Adicionalmente, o uso inadequado do solo tem transferido grandes quantidades de gases de efeito estufa, como o CO₂, CH₄ e gases nitrogenados com alta capacidade de destruição da camada de ozônio.

Solo como um sistema aberto deve ser manejado para minimizar as saídas de algo que seja importante para a manutenção de sua fertilidade. A manutenção do solo constantemente coberto por plantas vivas é a maneira mais inteligente de diminuir as transferências para outros ambientes. O uso de sistemas de preparo do solo convencional com aração e gradagem ou do sistema plantio direto com monocultivos e intenso uso de agrotóxicos não é a melhor forma de construção ou manutenção de sua fertilidade.

Nós veremos nos ciclos biogeoquímicos dos nutrientes que o manejo adequado dos fatores ecológicos permite maximizar as entradas de coisas boas no solo, minimizar a entrada de coisas ruins, minimizar a saída de coisas boas e maximizar a saída de coisas ruins.

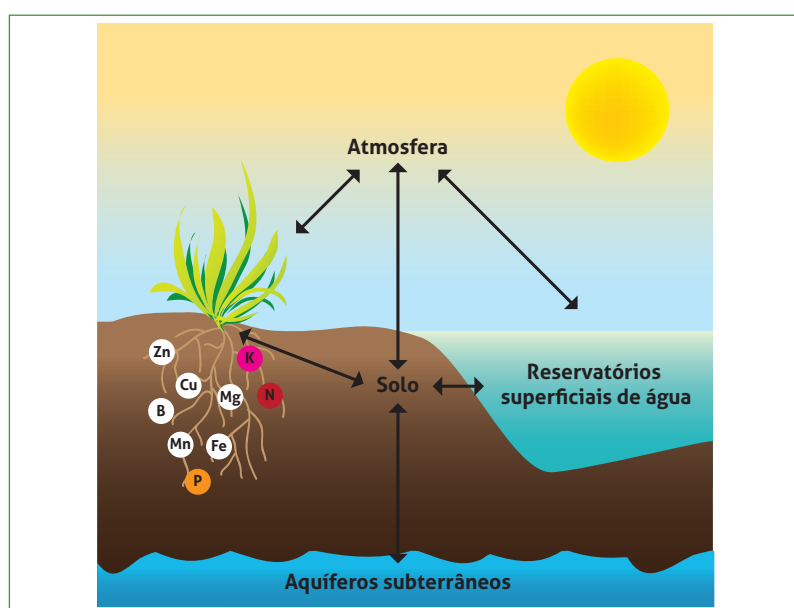


Figura 1: Representação do solo como um sistema aberto

SISTEMA COLOIDAL

O termo **COLOIDAL** induz o pensamento da reatividade físico-química dos íons ou moléculas com os colóides orgânicos e inorgânicos do solo. Gera as diferentes possibilidades de formas dos nutrientes em se sorver no solo, sua capacidade para lixiviação, e também se relaciona com sua disponibilidade e fitotoxicidade aos organismos.

Sob o ponto de vista da Fertilidade do Solo, é preciso lembrar que não há separação entre reações biológicas e químicas (bioquímicas) nem entre reações químicas e físicas (físico-químicas). O solo pode ser considerado um reator bio-físico-químico. O solo, como um sistema coloidal, induz ao fato de que tudo o que for adicionado ao solo sofrerá algum tipo de reação, quer ela intermediada ou não por um organismo vivo. Pode-se considerar que as reações no solo iniciaram no primeiro segundo após a formação da rocha e nunca acabarão.



SAIBA MAIS

Conceito de sistema coloidal

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Coloide>

Entre os milhares tipos de reações químicas ou bioquímicas presentes no solo, aquelas relativas ao contato da solução do solo com os componentes do “esqueleto físico” do solo (fase sólida) são de grande destaque para a Fertilidade do Solo. A presença de cargas elétricas nas partículas de tamanho coloidal do solo (argilominerais, óxidos e matéria orgânica) é um ponto chave para a biodisponibilidade dos nutrientes e elementos tóxicos às plantas, armazenamento de elementos e compostos no solo (inclusive agrotóxicos) e seus desdobramentos futuros, da mobilidade de íons e moléculas rumo ao lençol freático, entre outras (Figura 2). As partículas de tamanho coloidal da fase sólida do solo, por apresentarem alta área superficial específica, mantêm-se intimamente em contato com íons e moléculas presentes na solução do solo. O ser humano, ao alterar essas partículas, em especial a matéria orgânica do solo, altera os ciclos biogeoquímicos dos elementos, podendo ter efeitos positivos na produtividade do solo ou efeitos danosos sob o ponto de vista ambiental, ou mesmo os dois concomitantemente.

SISTEMA FRÁGIL

O solo, por ser aberto e coloidal, é, conseqüentemente, muito frágil. Ele sofre interferência direta da natureza e, depois de muitos anos, do homem. O termo frágil relaciona a sua organização e a vida do solo. O solo está em constante evolução quer ela progressiva, quer regressiva, sob o ponto de vista de ganhos e perdas de energias e matéria. Assim, um solo pode ser frágil fisicamente, biologicamente e até quimicamente.

A fragilidade física refere-se à limitante capacidade de suporte em termos de revolvimento, tráfego de máquinas, movimento de água superficial e subsuperficial, crescimento radicular, entre outros. A degradação física do solo pode ser notada muito facilmente caso se negligencie sua fragilidade (Figura 2). Em praticamente todos os solos agrícolas, podem-se perceber alterações físicas do solo, as quais que podem comprometer sua fertilidade. Atenção especial deve ser dada à dinâmica de água (infiltração, armazenamento, acesso ao sistema radicular), à relação macro/microporos, à presença de camadas compactadas que limitam o crescimento e aprofundamento do sistema radicular (Figura 2).

A fragilidade biológica, por exemplo, pode limitar a biociclagem de nutrientes, a síntese de compostos orgânicos com capacidade de solubilização e quelação de nutrientes, a fixação biológica de nitrogênio, o armazenamento de nutrientes na biomassa, entre outras. O revolvimento do solo, a aplicação de agrotóxicos, o monocultivo, entre outros, alteram profundamente a biodiversidade de organismos vivos no solo. A fragilidade biológica do solo também pode levar a desequilíbrios populacionais que poderão ocasionar o aparecimento de doenças e pragas e, isso, alterar sua fertilidade natural ou o aproveitamento dos nutrientes adicionados.

A fragilidade química do solo também não pode ser desprezada. Cada solo tem um potencial de fornecimento de nutrientes e de elementos tóxicos. Naturalmente, a produtividade do solo, expressão de sua fertilidade ou capacidade de produzir abundantemente, é dada pelo equilíbrio entre o ambiente onde se encontra esse solo, e o que ele pode oferecer às plantas. As taxas de produção de produtos vegetais podem não ser adequadas ao interesse humano, no entanto, está em equilíbrio dinâmico natural. Caso o homem queira transformar esse ambiente natural num sistema produtivo em que se esperem maiores taxas de biomassa produzida, talvez seja muito fácil esgotar suas reservas minerais. Não há como manter altas produtividades às custas das pequenas reservas de nutrientes presentes na maioria dos solos subtropicais e, especialmente, tropicais. A destruição da vegetação nativa para a implantação de sistemas produtivos leva, indiscutivelmente, à diminuição dos teores de matéria orgânica, ao esgotamento das reservas de nutrientes e ao aparecimento de elementos tóxicos, como é o caso do alumínio trocável.



Figura 2: Fotos demonstrando o solo como um meio biológico, os efeitos da compactação do solo sobre as raízes das plantas, os danos da erosão do solo e uma representação esquemática da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo.

CAPÍTULO 2 – CONCEITOS FUNDAMENTAIS EM FERTILIDADE DO SOLO

NUTRIENTE ESSENCIAL

Caso uma planta superior cresça num ambiente que contenha formas solúveis dos 104 elementos químicos da tabela periódica, é possível que ela contenha todos eles no interior dos tecidos, pelo menos em concentrações mínimas. No entanto, os elementos químicos considerados *essenciais* às plantas, às vezes simplesmente denominados nutrientes, são aqueles que *obrigatoriamente entram na composição e ou participam da sua fisiologia* e não aqueles que são detectados no interior da planta após uma análise química. Uma maneira indireta para evidenciar um nutriente essencial é quando a planta é submetida a crescimento na ausência de um determinado elemento químico, não completando o seu ciclo de vida. Dessa forma, apenas 17 elementos químicos são considerados essenciais, que poderiam passar de 20 se sódio, silício e cobalto, entre outros, passarem pelo teste de essencialidade nas inúmeras tentativas que se tem feito até hoje. São essenciais a todas as plantas o C, H, N, O, S, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe, Mn, Ni, Cl, B e Mo.

ELEMENTO/SUBSTÂNCIA TÓXICO(A)

A presença de substâncias ou elementos químicos que possam retardar, prejudicar ou alterar a fisiologia de um ser vivo, no caso especial das plantas, é considerada uma ação tóxica. Há casos em que eles atuam sobre a absorção, translocação e funcionalidade de um nutriente, quer pela ação física e química quer pela bioquímica. Dentre os elementos tóxicos, o alumínio tem um papel em destaque e será tratado na próxima unidade com mais detalhes. Outros elementos podem ser tóxicos às plantas e ao homem, especialmente os metais pesados.

CLASSIFICAÇÃO DOS NUTRIENTES

Os nutrientes essenciais são classificados como macro e micronutrientes, de acordo com a quantidade em que são necessários para realizar as suas funções fisiológicas (nada tem a ver com importância à planta!). Nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre são os macronutrientes, porque são encontrados na massa seca de plantas superiores na ordem de grandeza de $g\ kg^{-1}$; enquanto manganês, ferro, cobre, zinco, níquel, molibdênio, cloro e boro são os micronutrientes, pois a ordem de grandeza é de $mg\ kg^{-1}$. Essa classificação é empirista e apenas quantitativa e não são incluídos o carbono, oxigênio e hidrogênio, uma vez que são obtidos pelas plantas a partir do ar e da água durante a fotossíntese.

A maioria dos nutrientes atua em um mesmo processo fisiológico das plantas. O nitrogênio e o molibdênio, por exemplo, são componentes da enzima nitrogenase, que catalisa a fixação do nitrogênio atmosférico por microrganismos associados ou não a plantas superiores, e da enzima nitrato redutase, envolvida na redução do nitrato para posterior incorporação nos esqueletos carbônicos (Clarkson e Hanson, 1980). Por isso, atualmente é preferida uma classificação que leva em conta a atuação fisiológica, ou a classificação funcional, que considera a forma como os elementos são incorporados às moléculas orgânicas ou o seu papel junto ao complexo enzimático (Tabela 1).

NUTRIENTE	FORMA DE AQUISIÇÃO	FUNÇÃO BIOQUÍMICA OU FISIOLÓGICA
1º Grupo: C, H, O, N, S	Como gás: N ₂ , CO ₂ , O ₂ e SO ₂ . Íons da solução do solo: NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , SO ₄ ²⁻ .	Principais componentes do material orgânico. Elementos constituintes obrigatórios de proteínas e enzimas. São incorporados por reações de oxirredução.
2º Grupo: P, B	Íons da solução do solo, como fosfatos, boratos, ou ácido bórico.	Esterificação com grupos alcoólicos naturais das plantas. Os ésteres fosfatos estão envolvidos nas reações de transferência de energia.
3º Grupo: K, Mg, Ca, Mn, Cl	Íons da solução do solo.	Funções não específicas no estabelecimento da pressão osmótica. Ativação enzimática. Interação enzima-substrato.
4º Grupo: Fe, Cu, Zn, Mo, Ni	Íons ou quelatos da solução do solo.	Presentes predominantemente na forma de quelatos incorporados a grupos prostéticos. Envolvidos no transporte de elétrons por mudança de valência.

Tabela 1: Classificação fisiológica dos nutrientes minerais de plantas superiores.

Adaptado de Mengel & Kirkby (1986).

Apesar da grande evolução dos procedimentos que estudam as funções bioquímicas, para alguns nutrientes, ainda não se conhece com clareza o seu papel fisiológico, como o caso do boro e do cloro (Tabela 2), ou não são reconhecidos como nutrientes essenciais, como o caso do silício e sódio, mas que sempre estão presentes na matéria seca das plantas superiores e acredita-se que desempenham algum papel no desenvolvimento das plantas, ou do cobalto, cuja essencialidade é para os microrganismos fixadores de nitrogênio.

INCORPORADOS NA MATÉRIA SECA		FUNÇÃO		
REDUZIDOS	OXIDADOS	CONFORMAÇÃO ENZIMÁTICA	TRANSPORTE DE ELÉTRONS	INCERTOS
N	P	K, Na	Fe	B
S	S	Mg	Cu	Cl
		Ca	Mo	
		Mn	Mn	
		Zn		
		Ni		

Tabela 2: Resumo da classificação funcional dos nutrientes minerais de plantas superiores.

Adaptado de Clarkson & Hanson (1980).

ÍONS NA SOLUÇÃO VERSUS ÍONS NA FASE SÓLIDA

Os elementos químicos podem ser encontrados no ar, na água e no solo. No ar, encontram-se os nutrientes carbono e oxigênio, os quais as plantas absorvem durante o processo de fotossíntese e respiração. A própria quebra da molécula da água, primeira fase da fotossíntese, fornece o hidrogênio às plantas. Então, deixaremos esses três nutrientes de fora da nossa próxima discussão.

A água da chuva ou de mananciais contém elementos químicos dissolvidos. Esses elementos químicos são oriundos da dissolução dos minerais do solo e, em menor escala, pelo equilíbrio com o ar atmosférico (concentração de CO_2 ou deposição atmosférica de SO_4^{-2} , por exemplo). Dessa maneira, caso as plantas se desenvolvam na água (cultivo hidropônico, por exemplo) elas obterão os nutrientes da água. No caso do cultivo de arroz inundado, comum no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, a água de irrigação (barragens e rios) pode aportar consideráveis quantidades de nutrientes, em especial o potássio.

O solo é, sem dúvida alguma, o reservatório de nutrientes às plantas e a todos os seres vivos. O estoque de nutrientes é a fase sólida do solo (mineral e orgânica). Os elementos químicos presentes nas rochas, durante o intemperismo (imperceptível sob o ponto de vista da escala humana), são parcialmente liberados à solução do solo. Parte desses elementos químicos se reorganiza para formar outros minerais; parte é incorporada à matéria orgânica do solo, inclusive à biota do solo; e parte é perdida a outros sistemas (aquático e atmosfera).

As plantas não conseguem obter os nutrientes diretamente da fase sólida do solo. Eles devem estar na solução do solo na forma de íons (NO_3^- , H_2PO_4^- , Ca^{2+} , K^+ , por exemplo) para que as raízes os absorvam. Eis que aparece um grande problema à nutrição das plantas: *há nutriente na fase sólida, mas não é deslocado à solução do solo*. Cada elemento químico (nutriente, tóxico ou indiferente) reage com certa especificidade com a fase sólida do solo. Lembre-se de que, grosso modo, o solo é considerado um sistema coloidal e que os argilominerais, os óxidos e a matéria orgânica são os responsáveis pelas reações com os elementos químicos e as substâncias presentes na solução do solo. Então é necessário conhecer o mínimo dessas reações para que se possa manejar o solo visando controlar a disponibilidade de cada nutriente ou elemento tóxico.

Para tornar esse sistema ainda mais complexo, mesmo que o elemento químico esteja na solução do solo (íons), ele pode não estar perto o suficiente da raiz para que ela possa absorvê-lo. Em função disso, as plantas, diferentemente dos animais, evoluíram, maximizando a exposição ao meio. Então, o sistema radicular é extremamente ramificado, fino e tem até pêlos radiculares para ampliar a área de contato com a solução do solo. Há também algo importante que é a coevolução das plantas em associações com

fungos, denominados micorrizas, as quais ampliam a exploração da solução do solo. A parte aérea das plantas também é maximizada para poder captar o máximo de carbono e luz, maximizando a fotossíntese. Então, cada parte da planta está especializada para exercer funções específicas: *parte aérea para captar luz e gás carbono; sistema radicular para absorver água e nutrientes.*

APROXIMAÇÃO ATÉ AS RAÍZES (FLUXO DE MASSAS E DIFUSÃO)

O volume de solo ocupado pelo sistema radicular é muito pequeno, geralmente menor do que 2%. Assim, a maior parte dos elementos químicos (na forma de íons) dissolvidos na solução do solo não é passível de absorção instantânea e direta pelo simples crescimento da raiz (interceptação radicular). Eles precisam migrar para a região próxima à raiz (rizosfera) e desta para o seu interior. Há duas maneiras dos elementos atingirem a membrana celular: *fluxo de massa e difusão.*

Fluxo de massa se refere à quantidade de íons que chega até a rizosfera devido à absorção de água pelas plantas. A absorção de água é função da demanda atmosférica e do controle interno das plantas. Então, a planta, ao transpirar, bombeia a água que se encontra em contato com a raiz e, por conseguinte, a água que se encontra longe da raiz migra para a sua superfície. Junto com essa água, os íons contidos nela também chegam até a rizosfera. Quando a concentração do íon na solução do solo (água + íons + substâncias dissolvidas + microrganismos dissolvidos) é elevada, pode ser que o fluxo de massa seja suficiente para suprir as necessidades das plantas.

Por outro lado, quando a concentração do íon na solução do solo for muito baixa, ao multiplicarmos essa concentração pela quantidade de água transpirada, constatar-se-á que a quantidade de nutriente que chega até a rizosfera é muito aquém da necessidade das plantas. No entanto, a quantidade desse íon presente dentro da planta é muito maior do que a quantidade estimada pelo fluxo de massa. Algo está contribuindo para a movimentação do íon da solução longe da raiz até a rizosfera. A esse fenômeno se denomina *difusão.*

A difusão é o movimento de íons de regiões mais concentradas para regiões menos concentradas. Se você colocar uma pitada de sal no fundo de um copo e em seguida adicionar água e imediatamente beber a água da superfície do copo ela não estará "salgada". Espere alguns minutos e, de preferência agite o conteúdo no copo, que a concentração de sal será homogênea na água. A concentração de íons Na^+ e Cl^- próximo ao local onde foi adicionado o sal (NaCl) era muito alta em relação à concentração normal da água. Isso fez com que esses íons se difundissem para zonas menos concentradas. Agora imagine uma raiz embebida na solução do solo. Ela está absorvendo um determinado íon. Caso a velocidade de *absorção* (passagem do íon do exterior da

célula para o seu interior) seja maior do que a quantidade desse íon que chega por *fluxo de massa*, o que ocorre? A concentração do íon na solução do solo próxima à raiz é menor do que a concentração desse íon na solução do solo longe da raiz. Criou-se uma diferença de concentração. A partir daí, os íons que estão longe das raízes deslocam-se em relação à rizosfera. A quantidade de íons que chega até a rizosfera por difusão, portanto, depende da diferença de concentração do íon na solução da rizosfera e da solução normal do solo (longe da raiz), do teor de umidade do solo, do fator tortuosidade, do poder tampão, do coeficiente de difusão padrão do íon em questão e da superfície radicular. Na tabela 3 há um exemplo com a percentagem de cada mecanismo no suprimento para alguns nutrientes em plantas de milho.

NUTRIENTE	FLUXO DE MASSA	DIFUSÃO
	%	
Fósforo	6,1	93,9
Potássio	11,0	89,0
Cálcio	100,0	0,0
Magnésio*	100,0	0,0

Tabela 3: Suprimento de nutrientes até o sistema radicular de plantas de milho por fluxo de massa e difusão. *Adaptado de Vargas et al. (1983).*

*Miotto (2009) encontrou contribuição da difusão em até 45% para solo com baixos teores de Mg.

ABSORÇÃO DE NUTRIENTES E ELEMENTOS TÓXICOS

Os elementos químicos, para serem absorvidos, devem entrar em contato com a membrana celular das raízes, embora seja possível a absorção foliar. A arquitetura das raízes, suas ramificações, diâmetro médio, presença de pêlos absorventes e formação de micorrizas, determinam a superfície radicular ou a área de contato com a solução do solo. Assim, quanto maior a área radicular, maior a chance do nutriente alcançar uma posição favorável à absorção. A absorção do nutriente pelo sistema radicular é a passagem para o interior da célula.

A entrada, ou influxo, do nutriente no simplasto, interior das células, pressupõe a passagem por barreiras, que são as membranas celulares. Para que isso ocorra, existem mecanismos próprios que, simplificada, são conhecidos como carregadores, geralmente proteínas capazes de promover ou facilitar a entrada dos nutrientes na célula. Elas seguem a cinética enzimática, por isso, o influxo de nutrientes pode ser descrito por isoterma, que nesse caso se adota a de Michaelis-Menten.

Os principais parâmetros envolvidos no influxo são: a *I_{max}*, que é a capacidade de absorção máxima de uma unidade de superfície ou segmento de raiz, por uma unidade de tempo, que representaria a quantidade de carregadores que seriam capazes de realizar a

função; o K_m , que é a concentração externa da solução que permite que seja alcançada a metade da I_{max} , este parâmetro representa a afinidade do carregador pelo nutriente, por isso quanto menor o K_m maior a taxa com que o nutriente é absorvido em baixas concentrações; e o C_{min} , que é a menor concentração do nutriente na solução da qual ele ainda poderia ser absorvido, sendo que abaixo desse valor não haveria mais absorção.

Evidentemente que esses parâmetros são diferentes entre espécies, variedades ou cultivares, de tal modo que a planta ideal deveria possuir um alto I_{max} , e muito baixo K_m e ainda menor C_{min} . Esses três parâmetros em conjunto indicam a adaptabilidade das plantas aos solos com baixos teores de nutrientes ou a habilidade de responderem a adubações. Geralmente, plantas nativas apresentam baixos valores de K_m e C_{min} , e plantas melhoradas geneticamente possuem valores altos dos três parâmetros.

Os eventos que se sucedem durante a aquisição de nutrientes pelas plantas são influenciados pelo solo, pelo sistema radicular, pelos microrganismos e pela capacidade de absorção das plantas que é uma característica genética. Os fatores de solo envolvidos nesse processo dizem respeito à disponibilidade de nutrientes e às condições físicas que permitem o crescimento radicular. O primeiro está relacionado com a forma que os nutrientes se encontram no solo, com as quantidades destes e as taxas com que são liberados para a solução, fenômeno identificado como poder tampão. O segundo diz respeito à estrutura e porosidade do solo, pois todos os processos físicos, químicos e biológicos ocorrem dentro de seus poros e são influenciados pelos parâmetros distribuição e tamanho, superfície interior e capacidade em adsorver e precipitar substâncias. Esses fenômenos são dependentes da composição química dessas substâncias, da mineralogia e das cargas elétricas dos colóides do solo e de outras condições físico-químicas, como pH, capacidade de troca de cátions e coeficiente de difusão. Nesse espaço, circulam o ar e a água, ou solução do solo. O primeiro fornece o oxigênio indispensável para a respiração, que produzirá a energia utilizada na aquisição dos nutrientes pela planta, e a segunda é o veículo que transporta nutrientes para a superfície da raiz. Também o espaço poroso é o local de residência das raízes e o sítio vital para os microrganismos, e todo o tipo de atividade microbiana e bioquímica ocorre nesse habitat, cujo resultado pode interferir tanto no tamponamento quanto no ambiente físico do solo.

UNIDADE B

A ACIDEZ E A CALAGEM

INTRODUÇÃO

A maioria dos solos ocorrentes no Sul do Brasil, como no restante do país, tem caráter ácido. Esta propriedade é proporcionada pela gênese dos solos, pois a ação de fatores e processos de formação sobre as rochas ocorrentes na região tende a formar solos ácidos com o avanço do intemperismo. No entanto, apesar de serem caracterizados como possuindo caráter extremamente ácido, os solos apresentam uma acidez bastante diferente entre si, com reflexos nas práticas agrícolas necessárias à sua correção. Neste ponto, é importante salientar as diferenças conceituais entre solo ácido e acidez do solo.

O conceito de solo ácido é o mesmo aplicado às substâncias ácidas. Assim, sempre que o solo apresentar um pH do extrato solo:água (relação 1:1) inferior a 7,0 será considerado de caráter ácido (Tabela 4). Entretanto, acidez é um valor quantitativo, definida pela quantidade de base necessária para neutralizá-la até que o pH seja neutro. Didaticamente, utiliza-se, como exemplo da distinção entre os conceitos de ácido e acidez, a comparação entre soluções do ácido clorídrico e do ácido acético 0,1 mol L⁻¹. O pH da primeira solução fica em torno de 1,0, e o pH da segunda, próximo de 3,0. Portanto, a solução de ácido clorídrico é mais ácida que a do ácido acético. Porém, quando se neutraliza a acidez das duas soluções com uma base, as quantidades utilizadas são muito similares; por isso, pode-se afirmar que a sua acidez é similar. Esta desconexão entre o valor do pH e a acidez é produzida por causa da capacidade de ionização diferenciada dos dois ácidos, estimada pelo valor do pKa (constante de dissociação do ácido). O composto com maior capacidade de dissociação dos seus H⁺ produzirá uma solução mais ácida (denominado de ácido forte quando é capaz de dissociar todos os seus H⁺, enquanto que os ácidos fracos dissociam somente parte dos seus H⁺). Porém, a acidez depende de quantos H⁺ esse composto é capaz de liberar, o que determina a quantidade de base necessária à neutralização dos H⁺ liberados.

VALOR DO pH	CONCENTRAÇÃO DE H ⁺	CONCENTRAÇÃO DE OH ⁻
pH = - log (H ⁺)	mol L ⁻¹	
4,0 (ácido)	0,0001	0,0000000001
5,0 (ácido)	0,00001	0,000000001
6,0 (ácido)	0,000001	0,00000001
7,0 (neutro)	0,0000001	0,0000001
8,0 (alcalino)	0,00000001	0,000001
9,0 (alcalino)	0,000000001	0,00001

Tabela 4: Relação entre valor de pH e concentração de prótons e hidroxilas.

Estes conceitos podem ser utilizados para estudar o caráter ácido e a acidez dos solos, associando a atividade do H^+ na solução do solo (caráter ácido) com o tipo e a quantidade das substâncias orgânicas ou inorgânicas da fase sólida do solo, responsáveis pela liberação de H^+ (acidez do solo). Porém, usar o conceito de ácido diretamente para solos pode não ser suficientemente adequado, tendo em vista o significado do valor do pH sobre o crescimento e desenvolvimento de plantas. Por isso, a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do RS e de SC (CQFS-RS/SC, 2004) classifica os solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina de acordo com faixas de valores de pH em água (Tabela 5). Esta classificação é mais adequada porque, normalmente, associa-se ao pH baixo ou muito baixo a probabilidade de ocorrência de efeitos desfavoráveis para o cultivo de plantas, enquanto valores acima de 6,0, embora ainda de caráter ácido (pH menor que 7), já poderiam ser considerados adequados para a grande maioria das culturas e, portanto, caracterizados como alto.

INTERPRETAÇÃO DO VALOR DE pH (INVERSO DO CARÁTER ÁCIDO)	pH EM ÁGUA (1:1)
Muito baixo	$\leq 5,0$
Baixo	5,1 – 5,4
Médio	5,5 – 6,0
Alto	$> 6,0$

Tabela 5: Interpretação dos valores de pH em água (caráter ácido) para os solos adotada no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina. Adaptado de CQFS-RS/SC (2004)

CAPÍTULO 1 – ACIDEZ DO SOLO: ORIGEM, TIPOS E CONSEQUÊNCIAS

ORIGEM DA ACIDEZ DOS SOLOS

A acidez do solo origina-se concomitantemente à formação do solo. A fonte primária de acidez do solo é a reação do gás carbônico com a água na atmosfera:



Então, como vocês já estudaram na disciplina de Gênese e Propriedades do Solo, a combinação das ações de agentes físicos, químicos e biológicos, por meio dos fatores (material de origem, clima, relevo, organismos vivos – incluindo o homem e tempo) e de processos de formação, é possível, a partir de um material de origem (rocha), formar um solo. Isso ocorre durante esse longuíssimo tempo em que o solo está sendo formado, que há lento acúmulo de prótons (H^+) na solução do solo.

Com a entrada de água da chuva ácida ($\text{pH} < 7,0$), dá-se a fragmentação da rocha e a destruição dos minerais que compõem essa rocha (logicamente que integrado aos agentes físicos e biológicos). Entre as muitas alterações desencadeadas, há liberações de íons dos elementos químicos que estavam bem organizados dentro dos minerais. Dá até para se dizer que o H^+ implode os minerais e, o próton implodirá mais fácil e rápido aqueles minerais menos estruturados, cujas ligações químicas entre os íons dentro do mineral são mais fracas. Nesse sentido, há destruição seletiva de minerais e, consequentemente, a água do solo que está se formando conterá concentrações mais elevadas dos íons componentes dos minerais menos estáveis. Minerais, por exemplo, como a halita (NaCl – sal de cozinha), os carbonatos (CaCO_3) e o gesso (CaSO_4) são os primeiros a serem destruídos e dificilmente são encontrados em solos.

Os íons liberados dos minerais podem ser transferidos até os mananciais superficiais de água e/ou podem percolar no perfil (solo ou rochas) e atingir o lençol freático, os rios e finalmente os mares. É por isso que a água do mar é salgada! O sódio e o cloro presentes nos minerais das rochas, durante a formação do solo, foram sendo paulatinamente transferidos aos mananciais de água e hoje se encontram praticamente todo nos mares.

Uma parte desses íons liberados das rochas reage entre si formando outros minerais. Ou seja, a “sopa de íons” dissolvidos na água leva à recombinação entre eles e à formação de minerais. Esses minerais são mais termodinamicamente estáveis, e alguns deles podem apresentar grande área superficial específica, e, pela primeira vez na história da formação do solo, aparecem as cargas negativas (Ver Gênese e Proprie-

dades dos Solos). Então imagine agora que os íons que estavam “soltos” na água passam a ser atraídos pelas cargas dos minerais secundários ou neoformados (minerais formados a partir da transformação de outros). A presença dessas cargas nos minerais secundários atrairá com forças diferentes os diferentes íons. É possível, dessa maneira, que alguns íons sejam atraídos com maior energia que outros, e isso altera suas transferências aos mananciais aquáticos.

No momento em que há íons dissolvidos na água (sobre e entre as fissuras das rochas e no solo que está se formando), há possibilidade de suportar vida. Então parte dos íons liberados pela implosão dos minerais devido à entrada de água ácida, pode, agora, ser absorvida pelos organismos vivos. O desenvolvimento de vida de organismos autotróficos permite a incorporação (pela primeira vez) do carbono via fotossíntese (o carbono estava no ar na forma de gás). A presença de substâncias orgânicas leva ao acúmulo extremamente lento, mas contínuo, de material orgânico. A biotransformação do material orgânico pela biota do solo (agora sim daria para se chamar de solo) leva à formação da matéria orgânica do solo, composta de materiais orgânicos mais humificados. A matéria orgânica apresenta altíssima área superficial específica e é também portadora de cargas elétricas negativas (Ver Gênese e Propriedades dos Solos).

Em conclusão, a entrada de água ácida (reação da água com o gás carbônico) desencadeia a transformação dos minerais primários do solo. A presença de íons dissolvidos nessa água leva à neoformação de minerais secundários e possibilita a formação de matéria orgânica. Esses dois componentes possuem cargas elétricas negativas. A atração diferencial causa transferência diferencial dos íons aos mananciais de água, permanecendo no solo aqueles que se adsorvem com maior energia nessas cargas. Cátions como o Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} têm suas concentrações diminuídas nos solos à medida que eles são mais intemperizados (envelhecem). Como fica o caráter ácido da água do solo (solução do solo) com o avançar do intemperismo? Ficou evidente que haverá acúmulo gradual de prótons na solução do solo.

À medida que a quantidade de próton aumenta, aumenta a capacidade dessa solução de destruir minerais mais bem organizados (mais resistentes ao intemperismo). *Em Fertilidade do Solo é importante frisar que, quando a concentração de prótons da água for suficiente para que o pH da solução seja menor do que 5,5, já é possível implodir minerais portadores do elemento químico alumínio.* Simplificadamente, em solos com valores de pH maiores do que 5,5, não há presença de íons de alumínio (Al^{3+}) na solução do solo (Figura 3). Então, o Al^{3+} na solução é uma consequência do abaixamento do pH do solo, e não é a sua presença em si que aumenta o caráter ácido.

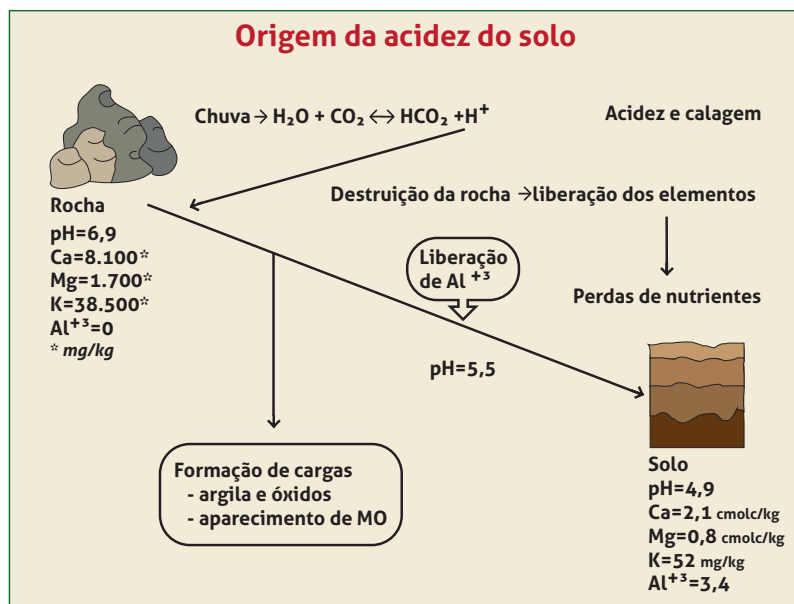


Figura 3: Esquema simplificado da acidificação do solo em longa escala de tempo

O Al³⁺ liberado à solução do solo imediatamente se hidrata (atrai moléculas de água). A atração é tão forte que ele quebra a ligação entre o oxigênio e um hidrogênio. Ele passa a se ligar ao OH⁻ repelindo o H⁺ para a solução do solo. Agora ele não é mais trivalente e sim divalente [Al(OH)₂⁺]. Ainda assim ele não está satisfeito e quebra mais uma molécula de água [Al(OH)₂⁺] e por fim uma terceira [Al(OH)₃]. Qual é o resultado disso: a presença de H⁺ (iniciada pela chuva ácida), na solução do solo, possibilita a implosão dos minerais contendo alumínio e, conseqüentemente, o aparecimento do Al³⁺ na solução. A presença desse íon na solução do solo gera, a partir da quebra da água, mais H⁺. A presença de mais H⁺ aumenta a produção de Al³⁺, o abaixamento do pH do solo e a presença do íon tóxico Al³⁺.



Obviamente que, mesmo em solo com valores de pH maiores do que 5,5, há muito alumínio no solo, mas esse ainda está dentro dos minerais e não 'livre como íon' na solução do solo. É por isso que esse íon não é essencial à vida. A vida, em especial, a das plantas, já está se desenvolvendo no solo antes da sua presença em forma disponível. O Al³⁺ na verdade é tão tóxico às plantas e à biota que merecerá um capítulo específico na presente disciplina.

Solos bem intemperizados (velhos) terão, portanto, baixos valores de pH (caráter ácido), presença de minerais secundários com menos silício (argilominerais 1:1 e óxidos, em detrimento aos 2:1), teores estabilizados de matéria orgânica, baixos valores de cátions

que se adsorvem fracamente às cargas elétricas negativas e acúmulo de Al^{3+} nas cargas negativas. Na sequência da disciplina, veremos que a acidez do solo é elevada (chamaremos de acidez potencial a quantidade de prótons e Al^{3+} que os minerais secundários e a matéria orgânica podem liberar para a solução do solo).

O homem pode aumentar a velocidade de abaixamento do pH do solo (caráter ácido ou acidez ativa) e também da acidez do solo (acidez potencial). No primeiro caso, abaixamento do pH do solo, ocorrerá sempre que as atividades antrópicas resultarem no aparecimento do íon H^+ na solução do solo. O processo principal responsável pelo abaixamento do pH do solo é a dinâmica do nitrogênio no solo. Como veremos no capítulo "Biogeoquímica do Nitrogênio", o qual vocês já tiveram a oportunidade de estudar em parte na disciplina de Biologia do Solo, o N_2 atmosférico é biológica ou industrialmente capturado e adicionado ao solo. No solo, ele sofre inúmeras transformações bioquímicas. Entre as diferentes formas que o nitrogênio pode ser encontrado no solo, somente os íons NH_4^+ e o NO_3^- podem ser absorvidos pelas plantas a partir da solução do solo. Caso a quantidade total desses dois íons fosse absorvida pelas plantas, portanto, se não houvesse perda por percolação no perfil do solo, não haveria sobra de prótons na solução do solo.

Muito simplificada, a explicação é a seguinte: independentemente se o nitrogênio for fixado biologicamente a partir do N_2 atmosférico, adicionado ao solo como resíduo orgânico (dejetos, plantas de cobertura, lodos, etc.) ou se adicionado na forma de adubos químicos como a ureia, pode-se considerar que haverá o N na forma de NH_3 (se for adicionado sulfato de amônio gerará diretamente NH_4^+ e se for adicionado fertilizante nítrico gerará diretamente NO_3^-). O NH_3 reage instantaneamente com um H^+ da solução do solo formando NH_4^+ . Esse íon pode ser adsorvido às cargas negativas do solo, mas principalmente é usado por bactérias que o transformam em NO_3^- e liberam os 4H^+ , sendo que um deles já era oriundo da solução do solo, então, tem-se um balanço de lançamento de 3 prótons à solução do solo. No momento em que a planta absorve um NO_3^- , o sistema radicular libera um OH^- . Esse OH^- reagirá com um H^+ da solução do solo e, portanto, o balanço passa a ser de apenas 2H^+ a mais na solução do solo. Dentro das células das plantas, o NO_3^- é incorporado a um esqueleto carbonado (sintetizado pela fotossíntese) na forma de C-NH_2 (aminoácidos, proteínas, etc.). Então, os 2H^+ que tinham sobrado na solução do solo foram gastos dentro da planta. Conclusão: se todo o NO_3^- for absorvido pela planta, o balanço de próton é zero. Entretanto, isso nem sempre acontece.

O NO_3^- não é adsorvido as partículas coloidais do solo (argilominerais, óxidos e matéria orgânica) e, portanto, ele fica sujeito

ao fluxo descendente de água no perfil do solo. Caso as plantas ou os microrganismos não o absorvam, ele pode ser “perdido”. Qual o resultado, sob o ponto de vista do caráter ácido? Sobrarão 3H^+ na solução do solo e, conseqüentemente, acelera o abaixamento do pH. Quanto maiores forem as doses de adubos nitrogenados adicionados ao solo e, principalmente, quando estes forem adicionados em épocas não ideais ao crescimento das plantas, maiores serão as possibilidades de percolação de nitrato e maior é a interferência antrópica no aumento da acidez ativa do solo.

Finalmente, o homem pode aumentar ou diminuir a acidez potencial. Se o uso e manejo do solo resultar em perda da fração argila por erosão e/ou decomposição da matéria orgânica do solo, ocorrerá diminuição da acidez potencial. Caro estudante preste atenção, pois manejo inadequado do solo diminuiu a acidez potencial do solo (veja conceito de acidez potencial abaixo). Pelo contrário, manejo de solo que impeça ou limite ao mínimo as perdas de solo por erosão e aumente o teor de matéria orgânica do solo, resultará no aumento da acidez potencial. Não se preocupem, uma vez que solos com alta acidez potencial não necessariamente terão baixa produtividade, como veremos a seguir. O homem, logicamente, pode diminuir a acidez potencial e a acidez ativa adicionando corretivos de acidez do solo, como é o caso da aplicação de calcário.

TIPOS DE ACIDEZ DO SOLO

Acidez ativa ou caráter ácido é apenas a quantidade de prótons (H^+) presentes na solução do solo. Lembrem-se de que, mesmo em um solo com pH muito ácido ($\text{pH} \leq 5,0$ – Tabela 5), a quantidade de prótons é pequena ($\leq 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ – Tabela 4) e por isso é que se usa a escala logarítmica para a sua expressão (pH). Se nós retirássemos toda a solução de um solo com valores de pH 5,0 em um hectare e colocássemos numa piscina, com apenas alguns gramas de calcário já seria possível elevar o valor pH a 7,0. Então, não há toxidez direta pela presença de H^+ às plantas e seria muito fácil de corrigir essa acidez. O problema é que ela está conectada à acidez potencial (acidez da fase sólida do solo) e a outras conseqüências do valor de pH baixo.

Acidez potencial é a quantidade de H^+ e de Al^{3+} (porque esse gera 3H^+ na solução do solo – visto anteriormente) que a fase sólida do solo pode liberar para a solução do solo. Essa acidez está quimicamente “parada”, como a analogia de uma rocha no topo de um morro que também está parada, mas apresenta energia potencial. Se alguém der um “empurrãozinho” na rocha, ela desce o morro transformando sua energia potencial em energia cinética. Similarmente, caso seja adicionada alguma base (NaOH, calcário, etc.) na solução do solo, ela neutralizará os prótons e, para restabelecer o equilíbrio, a fase sólida do solo liberará H^+ e Al^{3+} à solução do solo. Quanto mais alto for elevado

o valor de pH da solução do solo, mais H^+Al será liberado e, portanto, a acidez potencial tem que ser expressa em termo de a qual o valor de pH da solução do solo estamos nos referindo. Então, a acidez potencial está se transformando em acidez ativa e, imediatamente, está sendo neutralizada (Figura 4).

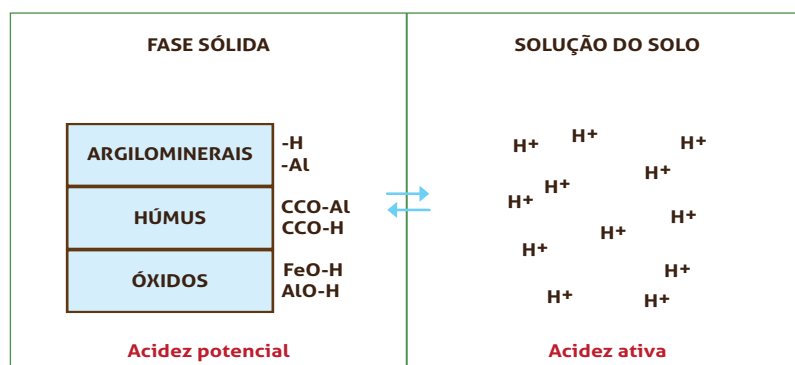


Figura 4: Representação esquemática do equilíbrio da acidez potencial e acidez ativa

Os ácidos que compõe a acidez potencial dos solos são predominantemente ácidos fracos presentes na fase sólida, sendo os principais: grupos $-COOH$ e $-OH$ da matéria orgânica; grupos funcionais de óxidos e oxi-hidróxidos e argilominerais; e Al^{3+} trocável adsorvido às cargas negativas dos argilominerais, dos óxidos e da matéria orgânica. Em estudos de solos, estabeleceu-se que a referência da acidez potencial será a quantidade de H^+Al existente no solo correspondente à quantidade de base consumida para a elevação do pH a 7,0. Então, a quantidade de base necessária para elevar o pH até 7,0 de um dado solo, qualquer que seja o seu pH inicial, é igual ao valor da acidez potencial daquele solo ao pH 7,0. O mesmo princípio pode ser utilizado para estabelecer a acidez potencial em outros valores de pH. Por isso, a necessidade de calcário de um solo é proporcional ao valor da acidez potencial a um pH escolhido. Por consequência, qualquer método que estime a acidez potencial do solo servirá para estimar a sua necessidade de calcário, bastando estabelecer o pH de referência. Centrado neste raciocínio, no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, a predição da necessidade de calcário é feita visando elevar o valor de pH do solo a 5,5 ou 6,0 ou 6,5 (CQFS-RS/SC, 2004), utilizando o mesmo método de estimativa da acidez potencial (índice SMP), como será discutido mais adiante nesse texto.

A acidez potencial pode ser subdividida em acidez *trocável* e *não trocável*, cuja forma de identificação é estabelecida pelo extrator utilizado. Sais de ácidos fortes, como cloretos ou nitratos de potássio, extraem a acidez trocável, que é, basicamente, o alumínio monomérico trivalente (Al^{3+}). Por outro lado, a utilização de extratores tamponados, quer sejam sais de ácidos fortes misturados a bases tamponantes, como cloreto de bário mais trietanolamina, quer sejam sais de áci-

dos fracos, como acetatos de sódio ou cálcio, extrai a acidez potencial oriunda da superfície dos colóides (H^0) e que é gerada até o pH de tamponamento, expressa em quantidade de H+Al (independentemente se for H ou Al). Caso o tamponamento da solução extratora seja ajustado a 7,0, estimará a acidez potencial do solo a pH 7,0.

Resumindo o que foi discutido até agora, a acidez pode ser vista como manifestação de uma complexa mistura de substâncias de reação ácida existente no solo (grupos funcionais da matéria orgânica e dos minerais, e alumínio trocável, fundamentalmente), com diferentes valores de pKa, geralmente com comportamento semelhante aos ácidos fracos. Por isso, solos com diferentes composições, especialmente, nos teores e tipos de argila, na matéria orgânica e no alumínio, apresentam uma quantidade de acidez compatível com esta composição, como pode ser visualizado na tabela 6. Quando o pH de diferentes solos é similar, como no exemplo está entre 4,0 e 5,0, pode-se dizer que são de pH muito baixo e, portanto, extremamente ácidos. Este caráter do solo foi denominado de *acidez ativa* e é determinado pelo pH em água (extrato solo:água relação 1:1). Mas à medida que se adiciona base, ou corretivo da acidez, o H^+ da solução do solo é neutralizado, e os grupos funcionais se ionizam, consumindo mais base, caracterizando o chamado *poder tampão da acidez*, ou a resistência que o solo oferece à modificação do pH inicial. Como estas fontes de acidez não são quantitativamente perceptíveis pela medida do pH em água, convencionou-se chamá-las de *acidez potencial*.

SOLO	pH ÁGUA	MO	ARGILA	AL	H+AL
	1:1	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	cmol _c L ⁻¹	cmol _c L ⁻¹
Argissolo Vermelho distrófico arênico	4,6	3	110	0,5	2,7
Neossolo Quartzarênio órtico típico	4,6	15	70	0,3	2,9
Chernossolo Argilúvico órtico vértico	4,8	60	280	0,0	4,1
Argissolo Vermelho distrófico típico	4,6	15	230	1,2	4,7
Latossolo Vermelho distrófico típico	4,6	21	220	1,3	5,1
Latossolo Vermelho distroférico típico	4,2	47	650	2,5	7,9
Latossolo Vermelho aluminoférico típico	4,2	47	650	2,5	10,8
Latossolo Bruno aluminico câmbico	4,2	64	630	4,9	17,0
Cambissolo Húmico aluminico típico	4,2	76	670	5,5	22,0
Cambissolo Hístico aluminico típico	4,2	168	500	8,6	38,5

Tabela 6: Relação de solos ocorrentes no Rio Grande do Sul, com área expressiva de agricultura e com variados graus de acidez. *Adaptado de Kaminski (1974).*

CONSEQUÊNCIAS DA ACIDEZ DO SOLO

A fertilidade do solo está centrada na eficiência com que as plantas adquirem e utilizam os nutrientes essenciais e depende do sincronismo entre a capacidade do solo em fornecê-los em quanti-

dades e taxas suficientes e a habilidade que as plantas possuem em absorvê-los. Os solos ácidos, então, são considerados de baixa fertilidade, porque as quantidades de alguns nutrientes, especialmente cálcio, magnésio, fósforo e nitrogênio, são insuficientes, e a presença do alumínio interfere no processo de absorção das plantas, já que ele inibe o crescimento radicular diretamente e altera o funcionamento dos carregadores (Figura 5).

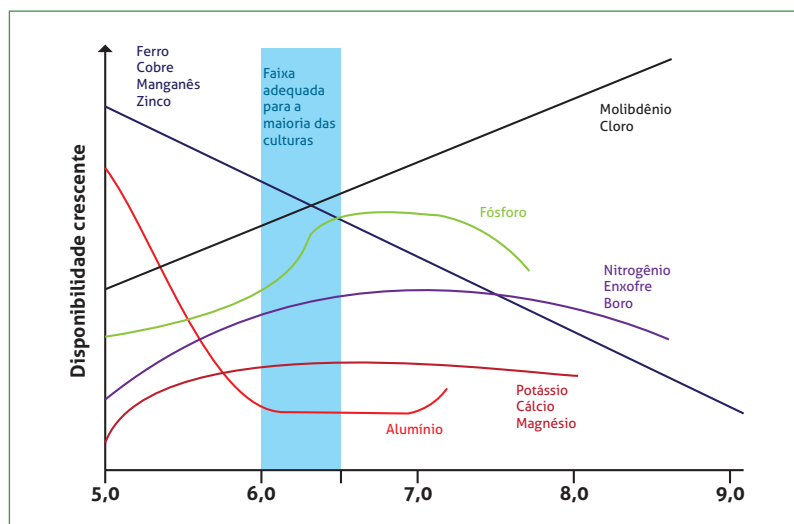


Figura 5: Representação esquemática da disponibilidade de alguns elementos em função do pH do solo

Além de amenizar os efeitos da toxidez por alumínio, a aplicação de corretivo da acidez, com conseqüente elevação do pH, proporciona uma série de efeitos diretos e indiretos que favorecem a disponibilidade de alguns nutrientes às plantas. Por si só, o uso de calcário dolomítico como corretivo da acidez proporciona adição de cálcio e magnésio, elementos essenciais às plantas. O aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) proporciona maior capacidade de retenção destes, especialmente quando adicionados pelas adubações, favorecendo suas disponibilidades às plantas. O pH em torno de 6,0 também é favorável pela menor adsorção de elementos, como o fósforo e o molibdênio, em compostos com alta afinidade pelos grupos funcionais do solo. Outro elemento que pode ser tóxico, quando encontrado em altas concentrações no solo, é o manganês, cujos efeitos deletérios são eliminados com a calagem, à semelhança do alumínio. Solos com acidez corrigida também têm maior atividade biológica, o que favorece a ação de microrganismos fixadores de N atmosférico e a ciclagem de nutrientes. Então, faz-se necessária a adoção de métodos de predição da acidez em solos e de critérios de recomendação para execução da prática da calagem, incluindo a indicação de doses de corretivos suficientes

para elevar o pH até valores mais adequados aos cultivos agrícolas, quer sejam eles destinados à produção de grãos, fibras, pastagens, olerícolas, frutíferas quer sejam essências florestais.

Sempre que há referência à baixa fertilidade de solos ácidos, o alumínio tem sido apontado como o maior limitador de sua produtividade, porém a presença das formas do alumínio na solução do solo não interfere considerável e diretamente na disponibilidade dos nutrientes, mas na capacidade de absorção das plantas. A composição da solução do solo que banha as raízes é muito importante para o aparecimento da toxidez. Na medida em que o pH aumenta, a água do alumínio hexahidratado ($\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$), que predomina na solução em $\text{pH} \leq 5$, sofre desprotonação e desaparece a partir de $\text{pH} \cong 5,5$ (Figura 6a). Além disso, a presença de outros cátions, especialmente cálcio, magnésio e potássio, ou a presença de ânions orgânicos e inorgânicos, tem importante participação na atividade do alumínio e na distribuição de suas espécies (Figura 6b), o que afeta a sua fitotoxicidade. Geralmente, quanto maior for a força iônica da solução e, principalmente, na presença de substâncias orgânicas com capacidade quelante, menor será a atividade do alumínio e menor o seu potencial tóxico à vida.

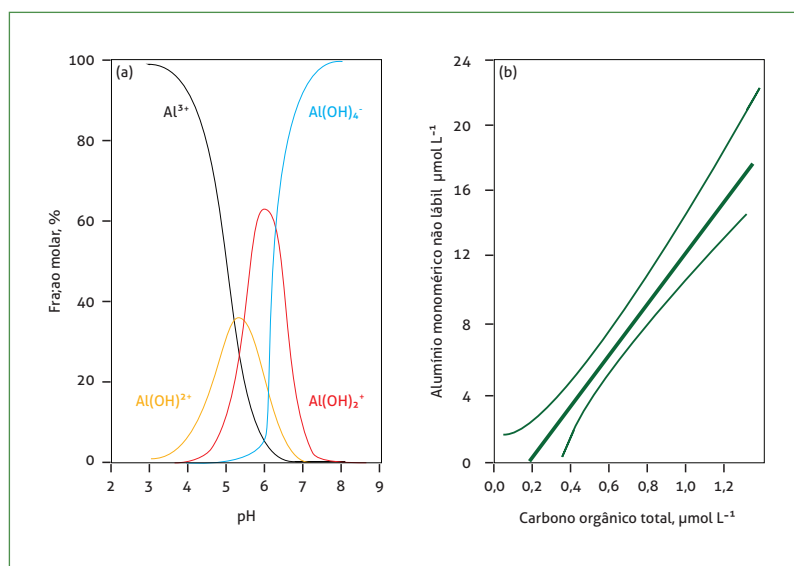


Figura 6: Distribuição das espécies de alumínio mononuclear em solução aquosa em função do pH (a) e a relação entre o teor de carbono orgânico total em águas superficiais e o alumínio mononuclear não lábil (b)

A distribuição e a localização do sistema radicular no perfil podem interferir na expressão dos efeitos danosos do solo ácido. Na parte superior do horizonte superficial, onde as quantidades de resíduos e matéria orgânica são mais altas, os ânions orgânicos e intermediários da decomposição dos resíduos podem bloquear as

espécies tóxicas do alumínio da solução do solo e, especialmente, o mantém fortemente adsorvido na fase sólida, porém, à medida que as raízes se aprofundam, o efeito do alumínio é mais pronunciado.

A TOXIDEX POR ALUMÍNIO

O sintoma inicial e mais dramático da toxidez de alumínio é a inibição do crescimento radicular, que inicia na primeira hora após a exposição ao alumínio, como consequência, a absorção de nutrientes e água é prejudicada. As plantas submetidas ao estresse por alumínio têm o crescimento radicular diminuído, ramificação deficiente, raízes curtas e grossas (Tabela 7), o que diminui o volume de solo explorado, além de inibir a absorção e translocação de fósforo e cálcio. A inibição do crescimento radicular inicia-se no ápice, 2-3 mm da extremidade, pois aí se encontra o meristema. Os parâmetros de absorção também são afetados, o *I_{max}* e o *K_m* aumentam, mostrando que há interferência na eficiência dos carregadores, exigindo concentrações mais altas dos nutrientes, pois até o *C_{min}* exigido é maior. Além disso, os hormônios produzidos na região meristemática das raízes, quando elas são intoxicadas com alumínio, deixam de emitir os seus “sinais radiculares”.

PERÍODO, DIAS			L	Ro	S	I _{max}	K _m	C _{min}
0-15	15-30	30-45						
			m	mm	cm ²	μg m ⁻¹ h ⁻¹	μmol L ⁻¹	
-	-	-	152	0,33	3151	1,2	7,8	3,0
+	-	-	81	0,35	1782	1,4	16,9	4,2
-	+	-	121	0,34	2584	1,6	4,8	1,9
-	-	+	77	0,42	2584	3,4	5,8	4,2
-	+	+	51	0,37	1187	2,8	23,4	22,6
+	-	+	445	0,41	1152	4,7	12,7	9,0
+	+	-	28	0,41	716	3,8	32,5	22,6
+	+	+	14	0,46	396	7,7	34,4	31,8

Tabela 7: Comprimento (L), raio médio (Ro) e superfície (S) radicular de plantas de fumo colhidas aos 45 dias após a aplicação dos tratamentos em função da presença (+) e da ausência (-) de alumínio nas datas aludidas em solução nutritiva. *Adaptado de Rheinheimer et al. (1994) e Petry et al. (1994)*

Alguns experimentos têm demonstrado que o efeito da toxidez de alumínio é mais pronunciado quando atinge as plantas imediatamente após a germinação. Se plantas crescidas em ambientes livres de alumínio foram posteriormente submetidas a níveis elevados desse elemento, o efeito deletério é menos intenso. Isso explicaria a aplicação de calcário na superfície do solo, que permitiria a germinação

das sementes e o crescimento inicial das raízes num ambiente sem alumínio e, quando as raízes atingissem a região contaminada, já estariam em condições de acionar os seus mecanismos de tolerância.

Entre as principais estratégias desenvolvidas pelas plantas para evitar o contato com o alumínio está a possibilidade de alteração do pH da rizosfera, ou do cilindro de solo que envolve a raiz, que é consequência da sua nutrição mineral. Quando a absorção de ânions supera a de cátions, a planta libera mais OH^- do que H^+ , fenômeno natural necessário para manter o equilíbrio eletroquímico do meio, aumentando o pH. Este parece ser um mecanismo menos realístico, muito embora plantas que se desenvolvem em solos cuja fonte de nitrogênio seja o nitrato, apresentam o pH da rizosfera maior que o daquelas onde predomina amônia; mas esta alteração não é igual em toda a extensão da raiz e depende do tamponamento dos solos, ou, é mais importante em solos arenosos do que nos argilosos. Já a exsudação de ácidos orgânicos pode auxiliar significativamente a detoxificação do alumínio, desde que não existam limitações severas na disponibilidade de nutrientes. Muitos autores têm demonstrado que algumas espécies de plantas têm capacidade de exsudar ácidos orgânicos e produtos intermediários da decomposição dos resíduos vegetais que complexam o alumínio e aliviam a sua fitotoxicidade. A aplicação de adubos orgânicos é importante, pois estes não só fornecem nutrientes, mas também liberam substâncias capazes de atuar como ligantes que podem contribuir para a detoxificação do alumínio. Ainda como mecanismos de exclusão, tem-se a imobilização do alumínio na parede celular e a permeabilidade seletiva da membrana plasmática. Internamente, o alumínio pode ser isolado no vacúolo ou complexado no citoplasma, de modo que sua atividade tóxica seja anulada. Também, as plantas podem tolerar níveis elevados de alumínio pela evolução de enzimas tolerantes.

SAIBA MAIS

As reações da acidez e do alumínio são as mesmas no sistema plantio direto?

O sistema plantio direto, ou outros tipos de manejo de solo que mantêm grande quantidade de resíduos na superfície, adotados em solos anteriormente cultivados no sistema convencional, pode alterar a velocidade de reacidificação do solo e, por conseguinte, a dinâmica do alumínio. Os teores de matéria orgânica são, geralmente, aumentados, especialmente na camada superficial. Neste caso ela passaria de fonte a dreno de alumínio da solução do solo, pelo menos temporariamente. À medida que os teores de matéria orgânica aumentam, também cresce a quantidade de alumínio armazenada com maior estabilidade e menor labilidade. Também, a presença de substâncias orgânicas, em alta concentração na solução do solo, complexa o alumínio, levando à dissolução das pequenas quantidades dos compostos de alta solubilidade formados anteriormente. No entanto, mesmo que os valores de matéria orgânica retornem aos níveis originais, a dinâmica do alumínio não será a mesma, uma vez que foram adicionados corretivos de acidez e

seu efeito é extremamente longo, necessitando de muitos anos para que as quantidades de alumínio trocável retornem aos níveis iniciais. Nestes casos é possível que a acidez ativa esteja alta, sem que ocorram danos às plantas pelo alumínio, indicando que o pH não mais deve nortear a tomada de decisão para a adição de calcário. Os teores de cálcio e magnésio mantêm-se em níveis mais elevados do que solos virgens, também, diminuindo a saturação e atividade do alumínio. Como foi visto anteriormente, há uma série de fatores vinculados ao solo e às plantas que condicionam a eficiência na absorção e utilização dos nutrientes essenciais. O conjunto desses fatores determina o ambiente para o crescimento das raízes, que em última instância, é o determinante do sucesso ou insucesso da produção dos cultivos. A natureza das reações envolvendo o alumínio é exatamente a mesma, mas o ambiente em que elas ocorrem é diferente, por isso, num mesmo solo, com propriedades similares, a intensidade dessas reações pode não ser igual, quando o sistema de manejo do solo não é o mesmo.

A avaliação das condições de fertilidade de um solo é complexa, pois há um grande número de propriedades envolvidas, e a identificação das limitações da produtividade não envolve apenas observações de ordem química. A importância dada às estimativas obtidas pela análise química do solo é função de que, no manejo convencional, o revolvimento do solo anularia as possíveis limitações de ordem física e biológica, sendo que esta última era inclusive negligenciada, já que informações sobre ela eram muito escassas, ou se limitavam à rizobiologia.

No sistema plantio direto, o real ambiente de crescimento radicular dificilmente será diagnosticado por uma análise química de solo, pois a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo são maiores, mesmo considerando o solo como um todo. Os canais abertos por insetos do solo e deixados pela decomposição de raízes preexistentes contêm teores de alumínio mais baixos e teores de cálcio e magnésio trocáveis, de fósforo e potássio disponíveis, de matéria orgânica e pH, mais elevados do que o solo limítrofe, tornando-se caminhos preferenciais ao crescimento radicular, o que pode proporcionar bons rendimentos de culturas, enquanto a análise química do solo poderia indicar possíveis problemas com a sua acidez.

CAPÍTULO 2 – ACIDEZ DO SOLO: DIAGNÓSTICO E CORREÇÃO

A recomendação de calcário para correção de solos ácidos visa proporcionar um ambiente de crescimento radicular adequado, diminuindo a atividade de elementos potencialmente tóxicos às plantas cultivadas, como o alumínio e o manganês, favorecendo a disponibilidade de elementos essenciais à nutrição de plantas, além do fornecimento de cálcio e magnésio, conforme abordado anteriormente. Por isso, o modo de gerenciamento da prática da calagem pressupõe a utilização de critérios, baseados, em sua maioria, nos parâmetros químicos determinados a partir de uma análise do solo. Isso permite que o técnico possa tomar a decisão se há real necessidade de aplicação de calcário (especificamente em termos de resposta econômica à aplicação) e qual a necessidade de base a ser aplicada para uma efetiva correção da acidez do solo (em termos de quantidade de calcário necessária para atingir uma condição de solo desejada).

TOMADA DE DECISÃO PARA A APLICAÇÃO DE CALCÁRIO

Considerando que a atividade do Al^{+3} e a disponibilidade dos nutrientes são reguladas pelo pH do solo, um dos primeiros critérios adotados para auxiliar na tomada de decisão sobre a necessidade de aplicar ou não calcário em uma área agrícola é o próprio valor de pH (geralmente em água, na relação 1:1, como no caso do RS e de SC). Nesse contexto, quando os valores de pH estivessem abaixo de um valor pré-determinado para uma determinada cultura ou grupo de culturas, o solo deveria ser corrigido até esse valor de pH, pois haveria grande probabilidade de resposta econômica à prática da calagem. Isso ocorre porque, nesse valor de pH, seriam garantidas as condições satisfatórias à produtividade das culturas, evitando-se os efeitos prejudiciais da presença do Al^{+3} e da menor disponibilidade de alguns nutrientes.

No caso do Sul do Brasil (RS e SC), os primeiros valores de pH referência, utilizados como uma espécie de "número limite da acidez" foram estabelecidos com base nas informações sobre as respostas das culturas em solos da Europa e Estados Unidos, cujos valores indicados como mínimo para culturas, como trigo, feijão, cevada e alfafa, eram próximos ou superiores a pH 6,0. As exceções seriam as culturas tolerantes a uma condição de solo mais ácido, tais como arroz, aveia e batata, cujo valor mínimo de pH indicado na literatura era próximo de 5,0. Baseado nessas considerações, desde o início dos programas de estímulo à análise e correção do solo no RS e em SC, criados no final da década de 60 do século XX, a recomendação de calagem adotava como parâmetro de tomada de decisão o pH do solo no valor de 6,5 para as principais culturas.

Experimentos conduzidos na década de 70 mostraram que as culturas produziam satisfatoriamente mesmo em pH inferior ao preconizado (6,5). Dados mostravam que, sob sistema de cultivo convencional (com lavrações e gradagens para o preparo do solo), culturas de expressão econômica, como milho, soja e trigo, alcançavam os máximos rendimentos a valores de pH entre 5,2 e 5,7, ou com doses de calcário de 1/3 a 2/3 daquelas previstas para alcançar pH 6,0. Do mesmo modo, alguns trabalhos da época destacam que a neutralização de 80% do alumínio trocável seria suficiente para as plantas atingirem máximos rendimentos, corroborando com dados que não obtiveram resposta à calagem para trigo e soja quando a saturação com alumínio era inferior a 20%, mesmo em pH 4,5. Uma das explicações para esse comportamento foi apresentada ainda na década de 50 por Mohr (1960), que atribuía os valores de pH 6,0 ou mesmo superiores, estabelecidos para solos de clima temperado, como inadequados para os solos de regiões tropicais e subtropicais, sendo que todos os solos com pH acima de 5,5 já seriam considerados "bons meios de cultura" porque não incluíam o Al em forma solúvel ou ativa.

Por outro lado, os experimentos da década de 70 também mostraram que o máximo efeito residual da calagem era alcançado quando as doses de calcário eram estimadas em função da acidez potencial do solo e que, quanto maior a dose de calcário incorporado, maior o tempo de duração dos benefícios. Isso evidencia que a aplicação do calcário, em doses e formas recomendadas, gera um efeito de longo prazo e que a reacidificação não é intensa, tornando menos frequente a necessidade de reaplicação e, quando for o caso, com doses inferiores às iniciais. O prolongado efeito residual do calcário justifica o porquê da manutenção do pH 6,0 como referencial a ser atingido à maioria das culturas até meados dos anos 80 no RS e em SC, apesar das observações de máximas respostas econômicas em curto prazo com a aplicação de calcário em valores de pH menores que o indicado, geralmente próximos a pH 5,5.

A partir da edição das recomendações de calagem e adubação para os Estados do RS e de SC em 1987, o critério do valor de pH 6,0, como único para a decisão da necessidade de calagem para as culturas no RS e em SC, foi alterado. Passaram a existir diferentes faixas de valores de pH de referência, conforme a exigência e/ou tolerância das culturas à acidez. Dessa forma, as culturas foram agrupadas naquelas em que o pH de referência era 6,5 (alfafa, aspargo e piretro); 6,0 (grande maioria das culturas de grãos, pastagens e olerícolas); e 5,5 (algumas frutíferas, essências florestais e batata); além daquelas que a calagem não era recomendada (erva-mate, araucária, mandioca e mirtilo).

As mudanças de critério para indicar a necessidade de calcário representaram um avanço na melhor combinação entre o uso do calcário e a necessidade das plantas. Contudo, à semelhança da década de 70, a continuidade na obtenção de resultados de pesquisa nos anos 80 e início dos anos 90 mantinha a percepção dos pesquisadores de que as respostas à aplicação de calcário não eram tão evidentes mesmo em solos com valores de pH menores que 6,0 ou ainda menores que 5,5, notadamente em áreas que já haviam recebido uma aplicação anterior de calcário. Especificamente nesse caso, apesar dos valores de pH terem diminuído para patamares que indicariam a necessidade de reaplicação de calcário, outros parâmetros, tais como saturação por alumínio e saturação por bases, ainda permaneciam relativamente altos. Isto muitas vezes era utilizado como crítica ao critério do pH utilizado pelo RS e por SC para indicação na necessidade de calcário, ainda mais que outros Estados do Brasil utilizavam a própria saturação por bases como critério para indicar a necessidade de correção do solo, como o de São Paulo.

A saturação por bases (V%) é um parâmetro indireto para indicar a condição de acidez do solo, pois representa a proporção da quantidade de cátions trocáveis de caráter não ácido no solo (Ca e Mg, principalmente) em relação à capacidade total do solo de reter

esse tipo de cátions (CTC). Portanto, quanto menor for a V%, tanto maior é a quantidade de cargas do solo ocupadas por íons H não dissociados e Al trocável e, portanto, maior a condição de acidez do solo. Quando a V% atingir um percentual baixo, previamente determinado como limitante às culturas, o predomínio de H+Al no solo vai determinar a presença de Al como acidez nociva às plantas, de modo análogo ao abordado anteriormente para o pH.

O fato de haver uma relação direta entre os valores de pH e de saturação por bases permite que a utilização de um ou outro critério seja feita, basicamente, através de uma calibração dos valores a serem considerados adequados para as culturas. É possível uma conversão de pH para saturação por bases, em que, embora bastante variável, na média das amostras de solos do RS e de SC, há a seguinte equivalência: pH 5,5 = 65%; 6,0 = 80% e 6,5 = 85%. Com base nessa equivalência, é possível a utilização da saturação por bases como critério auxiliar tanto de tomada de decisão para aplicar ou não o corretivo da acidez, como na definição da dose a ser aplicada. Assim, na edição do sistema de recomendações do RS e de SC, a partir da metade dos anos 90 (CFS-RS/SC, 1994), surge a observação de que existem outros parâmetros para tomar decisão em reaplicar ou não calcário, mesmo que o pH seja mais baixo do que o indicado para a cultura. Isso se dá porque, mesmo que ocorra o abaixamento do pH, não há tempo suficiente de exposição para que haja liberação de Al (limitações cinéticas) e lixiviação de cálcio e magnésio. Assim, dificilmente um solo retorna aos seus valores originais de saturação por Al e por bases após ter recebido calcário pela primeira vez.

A partir de todas essas considerações, uma série de alterações foi introduzida na última versão do Manual de Recomendação de Adubação e de Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2004) oferecendo alternativas de tomada de decisão para aplicação ou não de calcário para grupos de culturas em função da sensibilidade das espécies à acidez, ao sistema de cultivo, ao condicionamento da área e aos parâmetros pH e saturação por bases, como apresentado na Tabela 8. Esses parâmetros são ainda complementados pela saturação por Al e teor de P no sistema plantio direto e pelos teores de Ca e Mg para o arroz irrigado no sistema pré-germinado. Os critérios atuais evidenciam a evolução no sistema de recomendação de calcário, que se observa em todas as regiões do Brasil, mostrando que a análise da acidez do solo e a tomada de decisão sobre o uso do calcário envolvem vários indicadores.

SISTEMA DE MANEJO	CONDIÇÃO DA ÁREA	CRITÉRIO DE DECISÃO	QUANTIDADE A APLICAR	MÉTODO DE APLICAÇÃO
Convencional	Qualquer condição	pH < 6,0	1 SMP para pH 6,0	Incorporado
Plantio direto	Implantação a partir de lavoura ou campo natural com SMP ≤ 5,0	pH < 6,0	1 SMP para pH 6,0	Incorporado
	Implantação a partir de campo natural com SMP entre 5,0 e 5,5	pH < 5,5 ou V < 65%	1 SMP para pH 5,5	Incorporado ou superficial
	Implantação a partir de campo natural com SMP > 5,5	pH < 5,5 ou V < 65%	1 SMP para pH 5,5	Superficial
	Sistema consolidado	pH < 5,5 ou V < 65%	1/2 SMP para pH 5,5	Superficial

Tabela 8: Indicação de necessidade e quantidade de corretivo da acidez para culturas de grãos (exceto arroz irrigado) (Adaptado de CQFS-RS/SC, 2004).

(¹) Não aplicar calcário quando a saturação por bases (V) for > 80%.

(²) Quando somente um dos critérios for atendido, não aplicar calcário se a saturação por Al for menor que 10% e se teor de P for "Muito alto".

(³) A opção de incorporar o calcário em campo natural deve ser feita com base nos demais fatores de produção locais. Se optar pela incorporação do calcário, aplicar a dose 1 SMP para pH água 6,0.

(⁴) No máximo 5 t ha⁻¹ de calcário (PRNT 100%).

Uma característica importante a ser considerada nessa evolução dos critérios de tomada de decisão da calagem é que o valor utilizado como critério para aplicação do calcário, por facilidade de utilização prática por parte dos técnicos, também tem sido utilizado como valor a ser atingido de pH do solo com a prática da calagem. Contudo, cada critério de tomada de decisão tem um significado diferente em termos de princípios para utilização. O critério de necessidade de aplicação de calcário poderia ser atribuído apenas à probabilidade de resposta econômica à aplicação, sendo que os valores que indicam a necessidade de aplicação de calcário poderiam ser baseados quase que exclusivamente no valor de Al (ou da saturação por Al), a partir do qual pode ocorrer algum fator deletério da acidez. Neste caso, resgata-se a observação de que somente solos com acidez nociva (Al trocável) e pH inferior a 5,5 requerem correção da acidez para aumento da produtividade, salvo casos isolados de culturas especiais. Neste caso, os valores para indicar necessidade de aplicação de calcário para a grande maioria das culturas poderiam ser iguais ou mesmo um pouco abaixo de 5,5, considerando que há certa tolerância de algumas culturas a certos níveis de Al no solo. Entretanto, o valor utilizado pelos sistemas de recomendação normalmente se baseia no valor a atingir deste mesmo critério, tendo em vista que há um investimento na prática da calagem e seus efeitos benéficos podem ser mantidos no solo por um maior período de tempo se o solo for corrigido até patamares relativamente

superiores aos considerados limitantes à cultura. É exatamente esse patamar que garante o efeito residual da calagem, ou seja, eleva-se o pH a um valor superior a 5,5 permitindo que possa haver um abaixamento do pH com o tempo, devido aos processos de reacidificação, até atingir novamente valores de pH inferiores a 5,5, quando a acidez pode começar a ser nociva às plantas, avalia-se a possibilidade de nova aplicação de calcário.

Essa diferença, nos princípios do sistema de manejo da calagem, nem sempre está presente na mente dos usuários do sistema de recomendação, o que remete a equívocos de interpretação ou manifestações de descrédito nos parâmetros e critérios utilizados. Assim, o sistema de recomendação tem que ser considerado como uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão, sendo que o conhecimento dos princípios que regem o estabelecimento dos critérios do próprio sistema de recomendação é fundamental para que os técnicos possam fazer as adaptações necessárias em cada situação.

ESTABELECIAMENTO DA DOSE DE CORRETIVO

A necessidade de calcário de um solo é igual a sua acidez e, por isso, qualquer método que estime a acidez está determinando a necessidade de calcário. Em 1964, por ocasião da operacionalização do acordo UFRGS / Wisconsin University – Madison, foi introduzido no Rio Grande do Sul o método SMP e, quando da criação da Rede Oficial de Laboratórios de Análises de Solos (ROLAS) em 1968, passou a ser adotado pela rede como o método para indicação da necessidade de calcário para solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Esse método foi desenvolvido por Shoemaker, MacLean e Pratt, daí a origem do nome SMP, nas décadas de 50-60. Os autores testaram várias combinações de soluções tamponantes e selecionaram a mistura que melhor indicou a necessidade de calcário, ou a acidez potencial, dos solos ácidos. O princípio é simples, uma base (a solução SMP) reagindo com um ácido (o solo) produziria uma suspensão com pH tão mais próximo do pH do solo quanto mais acidez potencial o solo tivesse (Figura 7) ; porém seria necessário ajustar, por calibração, a relação entre o pH da suspensão, o chamado índice SMP, e a acidez potencial real do solo.

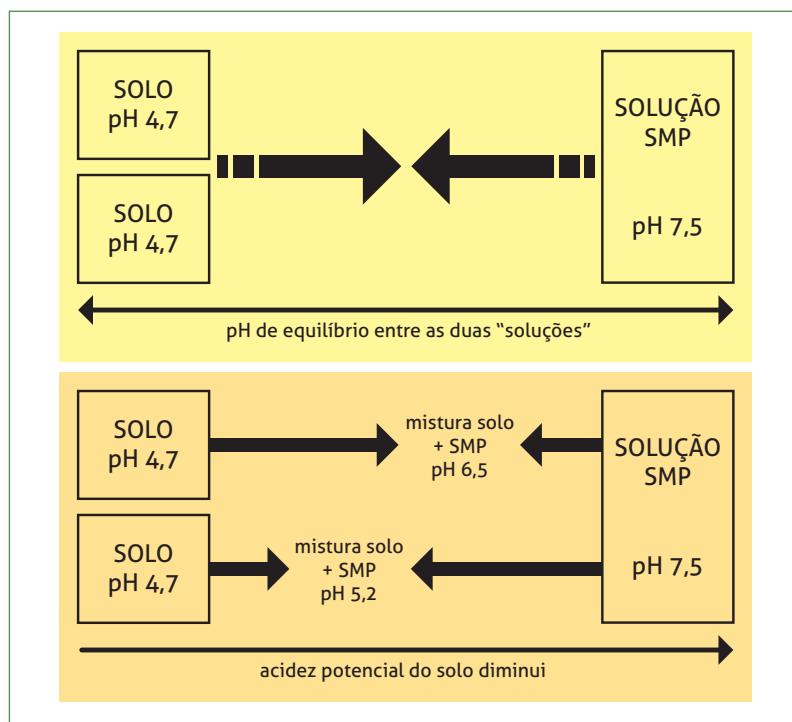


Figura 7: Representação esquemática do equilíbrio entre o poder tampão do solo e da solução de SMP.

Posteriormente, o método SMP foi calibrado para obtenção das curvas de estimativa da necessidade de calcário dos solos. O grande potencial desse método, além de ser de muito fácil manipulação no laboratório, é que permite estimar a acidez potencial necessária ao cálculo da CTC e a necessidade de calcário para elevar o pH do solo a qualquer valor pré-estabelecido. Assim, a CQFS-RS/SC (2004) apresenta a equação de conversão do valor do SMP para solos do RS e de SC em acidez potencial ($H+Al$, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) a partir da curva obtida por Kaminski *et al.* (2002):

$$H + Al = \frac{e^{10,665 - 1,1483SMP}}{10}$$

A partir dessa equação, foi elaborada a tabela de indicação de calagem para a elevação do pH até 5,5; 6,0 ou 6,5, considerando o objetivo de neutralizar parte da acidez potencial numa massa de solo correspondente a $2.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, o que correspondia à incorporação do calcário numa camada de 0-20 cm (Tabela 9). Dessa forma, no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, o método SMP é usado tanto para estimar a necessidade de calagem para elevação do pH de solos de 5,5 até 6,5, bem como para a estimativa da acidez potencial utilizada no cálculo da saturação por bases. Uma das limitações para o uso do SMP é que depende de uma adequada calibração para os solos que compreendem a região de abrangência

do sistema de recomendação que o emprega. Essa calibração é feita pelo ajuste matemático entre a acidez real dos solos e o valor do índice SMP (valor do pH de equilíbrio da mistura do solo e da solução tampão SMP). Para sua adoção no RS e em SC foi necessária uma calibração prévia e criteriosa, conduzida por vários pesquisadores.

ÍNDICE SMP	pH DESEJADO		
	5,5	6,0	6,5
	t ha ⁻¹		
≤ 4,4	15	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	8,5	11,4	15,7
4,9	7,7	20,7	14,2
5,0	6,6	9,9	13,3
5,1	6,0	9,1	12,3
5,2	5,3	8,3	11,3
5,3	4,8	7,5	10,4
5,4	4,2	6,8	9,5
5,5	3,7	6,1	8,6
5,6	3,2	5,4	7,8
5,7	2,8	4,8	7,0
5,8	2,3	4,2	6,3
5,9	2,0	3,7	5,6
6,0	1,6	3,2	4,9
6,1	1,3	2,7	4,3
6,2	1,0	2,2	3,7
6,2	0,8	1,8	3,1
6,3	0,6	1,4	2,6
6,5	0,4	1,1	2,1
6,6	0,2	0,8	1,6
6,7	0	0,5	1,2
6,8	0	0,3	0,8
6,9	0	0,2	0,5
7,0	0	0	0,2
7,1	0	0	0

Tabela 9: Quantidades de calcário necessárias para elevar o pH em água do solo a 5,5; 6,6 e 6,5, estimadas pelo índice SMP.

Entretanto, quando existe um pequeno número de solos com uma determinada característica, a equação obtida pode não ser adequada para estimar a acidez potencial desse mesmo grupo de solos. Esse é o caso dos solos pouco tamponados do RS e de SC, para os quais o índice SMP subestima a necessidade de calcário

para correção do pH. Assim, a CQFS-RS/SC (2004) sugere que, para solos pouco tamponados (argila <25%, índice SMP >6,3), a indicação da quantidade de corretivo pode ser baseada nos teores de alumínio trocável e de matéria orgânica do solo, utilizando-se as seguintes equações, conforme o valor de pH a atingir:

$$\text{pH}5,5 \Rightarrow \text{NC} = -0,653 + 0,480\text{MO} + 1,937\text{Al}$$

$$\text{pH}6,0 \Rightarrow \text{NC} = -0,516 + 0,805\text{MO} + 2,435\text{Al}$$

$$\text{pH}6,5 \Rightarrow \text{NC} = -0,122 + 1,193\text{MO} + 2,713\text{Al}$$

Em que:

- NC: corresponde à necessidade de calagem em t ha⁻¹ de calcário (PRNT 100%), e
- MO e Al: representam, respectivamente, o teor de matéria orgânica, em porcentagem, e o alumínio trocável do solo, em cmol_c dm⁻³.

Conforme abordado anteriormente, existe a possibilidade de se utilizar a saturação de bases (V%) como critério de indicação da quantidade de calcário, utilizando-se da seguinte fórmula:

$$\text{NC} = \frac{(V1 - V2)}{100} \text{CTC}_{\text{pH}7,0}$$

Em que:

- NC: corresponde à necessidade de calagem em t ha⁻¹ de calcário (PRNT 100%),
- V1: corresponde à saturação de bases desejada (65, 80 ou 85%),
- V2: representa a saturação de bases do solo, expressa no laudo de análise e
- CTC: é o valor da capacidade de troca de cátions estimada a pH 7,0.

No caso do RS e de SC, como toda a recomendação de calcário foi baseada no pH a atingir, a saturação de bases desejada está associada ao valor de pH de referência para as culturas, para os quais são observadas, em geral, as seguintes relações:

- pH 5,5 corresponde à saturação de bases de 65%,
- pH 6,0 corresponde à saturação de bases de 80% e
- pH 6,5 corresponde à saturação de bases de 85%.

As quantidades a serem aplicadas devem ser ajustadas conforme o modo de aplicação do calcário, considerando a profundidade de correção, de maneira idêntica ao ajuste feito com o método SMP (ou seja, $\frac{1}{2}$ SMP para pH 5,5 implica $\frac{1}{2}$ da necessidade de calcário para saturação de bases desejada de 65%).

Deste modo, as doses de corretivo da acidez indicadas pelos diferentes procedimentos podem ser até um pouco diferentes. Entretanto, a aplicação da quantidade de calcário estabelecida por quaisquer dos procedimentos terá pouca relação sobre os rendimentos dos primeiros cultivos se a quantidade for suficiente para neutralizar o alumínio tóxico e melhorar a disponibilidade dos nutrientes para as plantas. O que será diferente quando se aplicam diferentes doses de calcário é o efeito residual da calagem, determinando que quantidades maiores de calcário também devam implicar necessidade de reaplicação mais tardia no futuro.

APLICAÇÃO DE CALCÁRIO

Uma vez constatada a necessidade de corrigir a acidez do solo e definida a dose do calcário, sua distribuição deve ser a mais homogênea possível na área delimitada à correção. A uniformidade na distribuição é importante porque o calcário tem baixa solubilidade e sua dissociação somente ocorre se houver prótons em contato com a molécula do carbonato dissolvido na solução do solo, o que significa dizer que os efeitos do calcário restringem-se, em curto prazo, ao volume de solo onde foi aplicado. Obviamente que o tipo de distribuidor, a forma de preparo do solo, o tempo transcorrido após a aplicação, as doses de corretivo aplicadas e, até, os tipos de plantas devem ser considerados no lento e restrito efeito do calcário no volume de solo circunvizinho a sua aplicação. A localização do calcário determina o grau de contato de suas partículas com o solo e, por consequência, a expectativa de seu efeito no solo. Indiscutivelmente aplicar e homogeneizar o calcário em uma massa de solo na qual se localiza a maior parte das raízes das plantas é o mais indicado. Para tal, a escolha dos distribuidores que podem ter como princípios a queda livre, força centrífuga e movimento pendular é importante e, na maioria das vezes, determinada pelo equipamento disponível na propriedade ou pelo fornecedor. Contudo, a escolha do equipamento não pode ser negligenciada porque a uniformidade na distribuição é decisiva à maior eficiência no retorno ao investimento, daí o porquê da utilização de caminhão-caçamba deve ser vista com restrições.

No sistema com preparo do solo através do revolvimento com arado e grade, o calcário é naturalmente misturado com o solo numa camada onde se concentram as raízes das culturas. A CQFS-RS/SC (2004) recomenda a incorporação do corretivo na camada de 0-20 cm, não

porque desconsidere a importância da correção da acidez a maiores profundidades, mas por considerar a grande dificuldade em incorporá-lo além de 20 cm. Isso significa que, para aplicações além de 20 cm, a quantidade de calcário deve ser aumentada proporcionalmente, como é o caso de algumas espécies frutíferas e essências florestais.

Antecedendo a implantação de sistemas sem revolvimento do solo, como sistema plantio direto, seja a partir do cultivo convencional ou de pastagens naturais, quando o índice SMP for menor ou igual a 5,0 (CQFS-RS/SC, 2004), deve-se incorporar o corretivo da acidez o mais profundo possível e em quantidades suficientes para se ter um grande efeito residual (elevação do pH a 6,0 ou a saturação por bases a 80%). Infelizmente, em muitas áreas do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, a passagem do cultivo convencional para o sistema plantio direto foi feita sem seguir essa recomendação. Fazendo-se a incorporação do calcário na dose recomendada para elevar o pH do solo a 6,0 ou a saturação por bases a 80%, no início do sistema plantio direto, é possível manter altas produtividades por longo período. Isso deve ocorrer porque as alterações de atributos químicos promovidos pela calagem são de longo prazo e o processo de reacidificação dificilmente evolui para a condição original.

A tomada de decisão para reaplicação de calcário no sistema plantio direto nos Estados do RS e de SC é feita somente baseada nos atributos do solo da camada 0-10 cm (CQFS-RS/SC, 2004). Essa tomada de decisão considera que o solo da camada subsuperficial não apresenta restrições ao crescimento radicular devido à presença de alumínio trocável ou deficiência de cálcio e/ou magnésio. Assim, a dose recomendada é de apenas metade da quantidade estimada pelo índice SMP para elevar o pH do solo a 5,5, aplicada na superfície. Essa dose seria suficiente apenas para neutralizar a acidez que se forma com o processo natural de reacidificação do solo. A reaplicação de calcário em superfície no sistema plantio direto tem sido uma prática comum nos solos do Sul do Brasil. No entanto, tem-se observado problemas de ordem química e física no solo das camadas inferiores a 10 cm. Convém lembrar que nos solos cultivados sob o sistema plantio direto também há uma coincidência entre presença de alta saturação por alumínio trocável e presença de camada compactada, além da baixa disponibilidade de fósforo na subsuperfície considerada como abaixo de 10 cm.

A questão que se levanta é que não se pode continuar acreditando na possibilidade de, a partir de aplicações superficiais, neutralizar totalmente o alumínio trocável do solo de camadas profundas num solo com presença de camadas compactadas e, conseqüentemente, baixa macroporosidade, e com produtividades das culturas comerciais e das plantas de cobertura abaixo da média local. Em solos atualmente cultivados sob o sistema plantio direto

que apresentam elevada acidez (alta saturação por alumínio e baixa saturação por bases) no solo de camadas mais profundas, dever-se-ia aplicar a quantidade de corretivo da acidez recomendada para a correção da acidez da camada arável (0-20 cm), com incorporação e reinício do sistema plantio direto. No entanto, ainda não há um índice claro e objetivo para essa tomada de decisão por parte de técnicos e agricultores. A ausência de um índice de tomada de decisão quanto à forma de reaplicação de calcário é compreensível porque as próprias pesquisas não são conclusivas. O revolvimento do solo para a reaplicação e incorporação do calcário em um plantio direto problemático não pode ser encarado como uma situação de retorno aos problemas causados pelo sistema convencional (especialmente com a erosão do solo), considerando que será realizado apenas uma vez em um grande intervalo de tempo. Assim, existirão situações nas quais será possível conduzir o sistema plantio direto com reaplicações de calcário em superfície, enquanto que em outras situações seria recomendada a incorporação do corretivo da acidez e o reinício do sistema para que, quando da reacidificação do solo, seja possível a reaplicação superficial.

UNIDADE C

DINÂMICA DE NUTRIENTES

INTRODUÇÃO

O homem interfere no curso normal dos sistemas, alterando-o de modo progressivo ou regressivo e, por isso, é considerado um dos fatores de formação do solo. Ele atua especialmente através de pedoturbações, as quais conduzem à remoção superficial do solo, a alterações nas propriedades físicas e na biociclagem dos nutrientes, entre outras. Evidentemente que há reflexos sobre a dinâmica dos nutrientes na natureza e sua disponibilidade nos solos, concomitante à utilização de práticas que o degradam e empobrecem. Isso é extremamente preocupante se considerarmos que, nos últimos 300 anos, as florestas naturais encolheram 1,2 bilhões de hectares, os campos naturais em 580 milhões, incorporados ao sistema agropecuário, sendo que mais da metade ocorreu após a década de 50. Além disso, é estimado que mais de 1,9 bilhões de hectares de solos cultivados estejam de moderado a severamente degradados e que, nos próximos 20 anos, mais 140 milhões de hectares terão alteradas as suas características físicas, químicas e biológicas, tornando-se solos não ideais para a prática da agricultura.

Entretanto, também através de práticas agrícolas, o homem pode alterar as características do solo de modo a torná-lo adequado para os cultivos agropecuários ou ainda mantê-lo em condições apropriadas. Nesse caso, o conhecimento dos fenômenos que ocorrem em relação à dinâmica dos nutrientes no sistema solo-planta-atmosfera é fundamental para que sua disponibilidade seja maximizada, sem incorrer em problemas de ordem econômica e ambiental. Para tal, o uso de práticas que conservam o solo e aumentam a retenção e disponibilidade de água, o aproveitamento dos recursos disponíveis na propriedade, especialmente aqueles relacionados com os resíduos orgânicos, bem como uso das plantas de cobertura e recicladoras de nutrientes, são ferramentas importantes para reverter o cenário de degradação para manutenção ou melhoria do potencial produtivo do solo.

Dessa forma, nessa unidade, vamos estudar a dinâmica dos nutrientes essenciais e as estratégias para avaliar sua disponibilidade no solo e recomendar a adubação às plantas quando necessário.

CAPÍTULO 1 – BIOGEOQUÍMICA DO FÓSFORO

Entre os nutrientes essenciais exigidos em maior quantidade, o fósforo (P) tem especial destaque por ser exigido pelas plantas em quantidade até menor que o nitrogênio e o potássio e ainda pelo fato de os solos possuírem uma quantidade relativamente grande desse elemento em sua constituição. Entretanto, devido às reações que governam sua

disponibilidade no solo, é considerado um dos elementos mais limitantes para sustentar a produtividade das culturas e é considerado elemento-chave para a contaminação de recursos hídricos. Dessa forma, é frequentemente utilizado nas adubações para as culturas.

Uma parte do ciclo do P, com ênfase na parte orgânica e de dinâmica governada pela microbiota do solo, foi vista na disciplina de Biologia do Solo (Unidade H – Ciclo biogeoquímico do fósforo). Portanto, uma revisão no material antes da leitura desse capítulo é importante para auxiliar no entendimento dessa nova parte do conteúdo, onde daremos destaque nas formas e reações no solo e nos procedimentos para avaliar sua disponibilidade, bem como a prática de recomendação da adubação fosfatada.

ASPECTOS TEÓRICOS DA DINÂMICA DO FÓSFORO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

A atuação do homem na natureza, especialmente na atividade agrícola e de urbanização, tem proporcionado uma diminuição drástica do fósforo contido na biomassa vegetal. As perdas de fósforo do solo dissolvido na água duplicaram e nos sedimentos quadruplicaram, considerando as atividades humanas nos ecossistemas naturais, cujas quantidades de fósforo que são descartadas nos oceanos podem atingir 33×10^9 kg de P ano⁻¹. Essas perdas aumentam à medida que as áreas de florestas nativas diminuem e as áreas agrícolas e urbanas aumentam. Em solos cultivados de maneira convencional e com taxas de erosão médias, as perdas de fósforo podem ultrapassar os 3 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Essas grandes perdas aceleram a transferência de fósforo do sistema terrestre para o aquático e a sustentação da produção de alimentos dependerá da quantidade que permanece no solo, uma vez que o retorno deste nutriente pelo ar é muito baixo.

A exportação de fósforo pelos produtos agrícolas de origem vegetal (cereais, oleaginosas, frutas, vegetais, fibras, café e chá) e animal (carne, leite e ovos) é grande, pois a concentração desse nutriente varia de 0,1 a 0,5% da matéria seca, representando mais de 60% do fósforo absorvido pelas plantas. Grande parte do fósforo contido nos produtos agropecuários migra para as áreas urbanas e, em especial, para as metrópoles. O que não é aproveitado na dieta alimentar é descartado, principalmente para os mananciais de água, e isso os conduz a eutroficação e, ao mesmo tempo empobrece o sistema terrestre.

Embora a biomassa recicle parte do fósforo absorvido pelas plantas, a exportação pelas colheitas assume fundamental importância nos agroecossistemas. Desse modo, a interferência humana no ciclo natural do fósforo é degradativa, por isso, precisa-se de um novo guia ético e inovador, de caráter científico, tecnológico, sócio-cultural e econômico, a fim de minimizar as saídas de fósforo do sistema terrestre e maximizar a ciclagem "in situ" e em escala global.

Fósforo na planta

O fósforo é um elemento essencial, pois interfere nos processos de transferência genética, fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia, e divisão e crescimento das células. Contribui para o crescimento das raízes, qualidade de frutas, verduras, grãos e formação das sementes. Então o fósforo é constituinte estrutural, genético e energético. O fósforo, que é absorvido do solo na forma de íons do ácido ortofosfórico (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} e PO_4^{3-}), não sofre redução durante o metabolismo nos seres vivos. Nas plantas é encontrado em diversas substâncias, como na fitina, nos fosfolipídeos, nos ácidos nucleicos, em açúcares, nas coenzimas, ou ainda compartimentado nos vacúolos celulares na forma inorgânica, mas as concentrações totais variam de 0,05 a 0,5% da matéria seca. Sua presença é indispensável para a planta transformar os hidratos de carbono em açúcares. É um dos agentes direto da formação da clorofila e ainda aumenta o desenvolvimento radicular, propiciando à planta maior capacidade de absorver os demais nutrientes essenciais do solo.

Os principais sintomas de deficiência observados em plantas estão relacionados com o menor desenvolvimento de toda planta e a apresentação de uma coloração arroxeadada, característica das folhas velhas. Isso porque as plantas deficientes em fósforo acumulam açúcar nos tecidos e, a partir deste, sintetizam pigmentos escuros, como as antocianinas, ocasionando uma coloração mais escura das folhas. Como os sintomas ocorrem nos tecidos mais velhos, isso também indica a propriedade de mobilidade do P internamente na planta. Com a deficiência de P também se pode observar número reduzido de frutos e sementes e atraso no florescimento. Plantas com deficiência em fósforo também podem apresentar reduções na área e no número de folhas.

Sem P



Figura 8: Deficiência de fósforo em soja. Fazenda São Luis – PI. Fonte: Keppler/Embrapa

100 kg P_2O_5 /ha

400 kg P_2O_5 /ha

Fósforo no solo

O elemento fósforo do solo é proveniente do seu material de origem, no qual é encontrado, principalmente, como minerais apatíticos, ou fosfatos de cálcio. Na natureza, a atuação dos fatores e dos processos de formação do solo sobre o material de origem altera os minerais primários produzindo novos compostos, cuja complexidade depende do grau e da intensidade da intemperização (Revisar intemperismo – Disciplina de Gênese e Propriedades dos Solos). Pela ação desses processos geoquímicos, os minerais apatíticos também serão alterados, resultando na liberação do fósforo para a solução do solo, predispondo-o a reagir e recompor-se nas diferentes formas, inclusive utilizado pela biomassa. Concomitantemente a isso, a ação do intemperismo promove a lixiviação das bases, da sílica e dos carbonatos, e o aumento da atividade de íons, como do alumínio e do ferro, proporcionando a consequente transformação dos minerais primários em argilas 2:1 que, com a continuação dos processos são alterados para argilas mais simples, 1:1, e/ou óxidos e mais um sem número de minerais de complexidade variável. Entre essas estão minerais fosfatados estáveis termodinamicamente, que podem estar precipitados, associados ou adsorvidos a superfícies de minerais secundários, e outra parte que pode ser absorvida e incorporada na biomassa, a qual origina e mantém a matéria orgânica do solo, aumentando a proporção de fósforo em formas orgânicas (Po). Assim, à medida que os solos avançam no seu desenvolvimento, a proporção com que o fósforo se distribui em suas diferentes formas (inorgânica e orgânica) também se altera.

Em ecossistemas onde ocorrem solos jovens ou pouco intemperizados, o fósforo encontra-se predominantemente em minerais primários, principalmente como fluorapatita. Nos solos moderadamente intemperizados, a maior parte do fósforo encontra-se na forma orgânica e adsorvido fracamente aos minerais secundários. Mas, em solos altamente intemperizados, predominam as formas inorgânicas ligadas com alta energia à fração mineral e formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente. Esse modelo tem sido confirmado por vários autores. Isso sugere que os teores de fósforo do solo dependem inicialmente do material de origem, mas a sua disponibilidade para os organismos vivos (forma lábil) é controlada pelos processos geoquímicos, que, com aumento do grau de intemperismo e as consequentes ligações de alta energia com os minerais, forma pouco lábil ou não-lábil, aumenta a participação das frações orgânicas do fósforo como fonte deste nutriente para a biomassa. Assim, a quantidade da fração lábil é dependente do grau de intemperização, das características químicas e físicas e da atividade biológica do solo, bem como da vegetação predominante que utiliza o nutriente.

No curso da pedogênese, e em ecossistemas com baixa disponibilidade de fósforo, as comunidades de microrganismos e de plantas devem ser capazes de absorver o fósforo a partir de baixas concentrações na solução do solo. Isso porque desenvolveram diversos mecanismos próprios, como a solubilização de minerais contendo fosfatos, pela produção e liberação de ácidos orgânicos ou inorgânicos, de complexantes para elementos ligados ao fósforo ou liberando ânions que competem pelos sítios de adsorção; também promovem mudanças bioquímicas e/ou físico-químicas da rizosfera, como alterações no pH e atividade de íons; aumento na afinidade pelo fósforo nos sistemas de absorção, ou adaptação a concentrações muito baixas na solução do solo; associações com organismos, como micorrizas; sincronizam a taxa de crescimento à disponibilidade do nutriente; maximizam a biociclagem das formas orgânicas. Também, a biociclagem intra-sistemas pode ser muitas vezes superior à quantidade de fósforo liberada pelo intemperismo.

Formas e dinâmica do fósforo no solo

As formas de fósforo dos solos podem ser, teoricamente e sob ponto de vista da Fertilidade do Solo, divididas em duas categorias: lábil e não-lábil. Para se ter uma idéia das suas quantidades, as formas de P podem ser estimadas usando extratores químicos próprios da análise de solo, que atuam com intensidade crescente sobre os diferentes fosfatos ocorrentes no solo. Assim, a forma lábil, com maior facilidade de extração química, constitui-se na fração de fósforo disponível à biomassa, e a forma não-lábil, mais resistente à extração, seria indisponível. Como a separação entre elas é difusa, às vezes também se pode considerar uma forma intermediária, denominada moderadamente lábil. Para cobrir todas as formas de fósforo no solo, muitos autores incluem ainda o que chamam de fósforo residual, representado pela diferença entre o fósforo total do solo e as formas acima indicadas que não foram extraídas quimicamente por nenhum extrator. Assim, os extratores químicos utilizados para quantificar o fósforo disponível dos solos atuam basicamente sobre a forma lábil. Porém ao se analisar o ciclo do fósforo no solo, Figura 9, pode-se inferir que as frações orgânicas também contribuem para a sua disponibilidade, mas não são detectadas pelos métodos convencionais utilizados nessa estimativa. Essas frações podem compor 5 a 80% do fósforo total na camada 0-20 cm, atingindo até mais de 90% em solos de altitude. Em solos do Rio Grande do Sul, das regiões Sul e Planalto, que por isso apresentam diferentes graus de intemperização, o teor médio de fósforo orgânico (Po) observado foi de 57 e 53% e as formas inorgânicas (Pi) representaram de 13 a 30% do fósforo total, respectivamente.

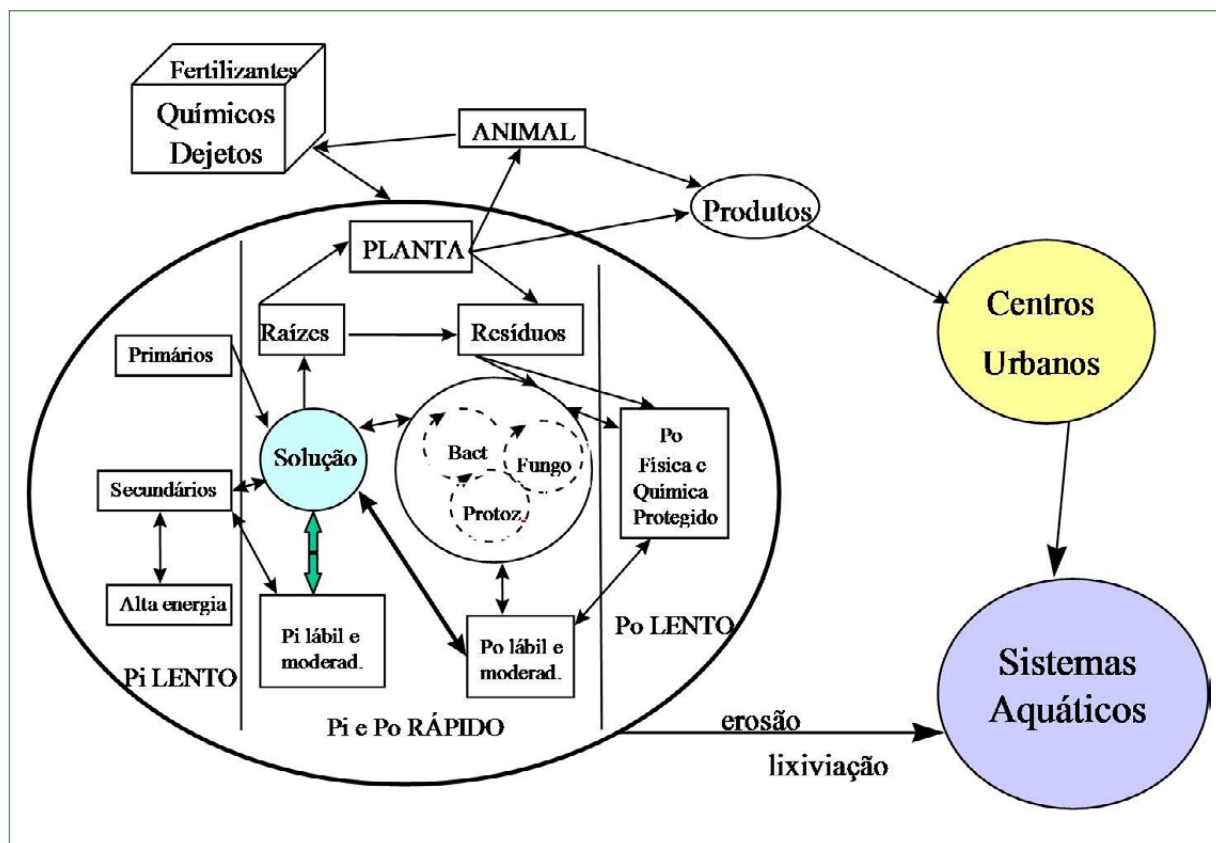


Figura 9: Ciclo do fósforo no solo e na natureza. Fonte: Danilo Rheinheimer dos Santos.

A origem do fósforo orgânico do solo está na incorporação da biomassa, constituída pela mistura de componentes vegetais, de protoplasma microbiano, restos de animais e dos produtos de sua decomposição. A composição da grande parte das substâncias orgânicas com fósforo não está ainda quimicamente identificada, sendo que da parte conhecida 10-80% está na forma de P-inositol, 1-10% P-DNA/RNA, 0,1-5% P-lipídeo e menos de 5% como P-éster simples. O fósforo orgânico mantém proporções bastante variáveis com outros nutrientes, sendo que em média tem-se observado relações de 5 a 20:1 para N:P e 100 a 300:1 para C:P. Grande parte do Po no solo está associado a compostos orgânicos de alto peso molecular, geralmente superiores a 100.000 dalton, formando ligações covalentes fostato-éster-amino com as substâncias húmicas e não como constituinte estrutural, podendo também estar ligado ao húmus por pontes com Fe e Al. Embora o fósforo possa ocorrer como Pi nesses complexos, é funcionalmente equivalente ao Po, pois a sua transformação está condicionada à da MO.

O pesquisador Hedley e seus colaboradores (Hedley et al, 1982) desenvolveram um método de fracionamento sequencial de fósforo do solo, capaz de distinguir as formas lábeis das não-lábeis, ou mais estáveis, e as formas orgânicas, em ordem crescente de estabilidade, ou decrescente sob ponto de vista da disponibilidade à biomassa. Des-

se modo, o Pi extraído por resina de troca aniônica, ou por bicarbonato, representam a forma lábil, ou mais disponível biologicamente, enquanto que o Pi extraído por hidróxido, que estaria associado aos óxidos de Fe e Al com diferentes graus de cristalização, é moderadamente lábil. O Pi que aparece pela aplicação de ultrassom está protegido fisicamente no interior de microagregados e é considerado não disponível, assim como o Pi extraído por ácido forte, cuja composição é predominantemente de fosfatos de cálcio estáveis, portando forma não-lábil. O Po extraído por bicarbonato, mas detectado somente após a digestão do extrato, é facilmente mineralizável e contribui para a disponibilidade às plantas e aos microorganismos, logo é lábil. Já o Po extraído pelo hidróxido é considerado moderadamente lábil, que juntamente com o Po ultrassônico estão física e quimicamente protegidos e por isso acumulam-se ao longo do desenvolvimento do solo. Desse modo, as formas lábeis ou disponíveis incluem a soma do Pi e Po extraídos pela resina e pelo bicarbonato, enquanto que as formas não-lábeis, ou refratárias, incluiriam o Pi e o Po extraídos pelo hidróxido, ultrassom e o Pi ácido forte, mais o fósforo residual, representado pela diferença entre o fósforo total do solo e a soma do fósforo retirado pelos demais extratores. As classificações quanto à disponibilidade de fósforo, apresentadas por vários autores, não diferem muito entre si quanto à disponibilidade para a biomassa, mas a nomenclatura para as formas extraídas pelos diferentes extratores nem sempre é igual.

Desse modo, outra maneira de classificar as frações de fósforo no solo seria a de considerar como fósforo de origem biológica a soma do Po extraído por bicarbonato, por hidróxido e ultrassom, e como fósforo geoquímico as formas inorgânicas extraídas pelos diferentes extratores mais o Po na fração residual, possivelmente ligado aos colóides orgânicos e minerais por pontes de ferro e alumínio e altamente estabilizado. Esta classificação parece ser mais condizente com as transformações que ocorrem com o fósforo durante o desenvolvimento do solo, pois em estudos com Entisols e Oxisols observou-se que o Po representou, respectivamente, 5 e 35% do fósforo biológico. Do mesmo modo, a porcentagem de Po extraído por bicarbonato, em relação às formas lábeis, passou de 20 para 60% para aquelas classes referidas, tornando clara a dominância das reações geoquímicas como reguladoras do ciclo do fósforo e o aumento da importância das formas orgânicas na disponibilidade desse nutriente a biomassa com o avanço do intemperismo. Essa interpretação pode ser, também, útil no estabelecimento de índices de importância dos dois compartimentos de fósforo em função da interferência humana nos sistemas, como o manejo do solo, a adição de fertilizantes químicos e a rotação de culturas, por exemplo.

A caracterização das formas de fósforo no solo ganhou um forte impulso com o advento da ressonância nuclear magnética (^{31}P NMR),

na qual o deslocamento químico do núcleo de ^{31}P é diferente para cada composto orgânico. Solos mais jovens e de grandes altitudes apresentam maiores teores de fosfatos diésteres, e à medida que avança o intemperismo, predominam os fosfatos monoésteres, especialmente o P-inositol. Estão intimamente adsorvidos na superfície de minerais, principalmente nos óxidos de Fe e Al, sugerindo que a grande maioria do Po orgânico está na forma não lábil e pode ser considerado parcialmente mineral. A análise da relação di/monoéster sugere certo relacionamento entre distribuição do Po e a evolução dos solos. Em solos nativos, há ocorrência de formas mais lábeis (diésteres), mas, em solos cultivados, o teor de Po diminui drasticamente pela mineralização daquelas formas mais lábeis. A adição de fertilizantes fosfatados (Pi) aumenta as formas de fosfatos monoésteres, indicando a tendência de acumulação do fósforo adicionado em formas mais estáveis.

Adsorção do fosfato no solo

A principal forma de fósforo disponível às plantas é o fosfato inorgânico adsorvido às partículas inorgânicas de tamanho coloidal (argilominerais 1:1 e óxidos). Para compreender corretamente como ocorre a adsorção é preciso saber:

- O fosfato é um íon extremamente estável e não sofre quebra: o átomo de fósforo está aprisionado no interior de 4 átomos de oxigênio. Um átomo de oxigênio faz ligação dupla com o átomo de fósforo; os outros três átomos de oxigênio fazem apenas uma ligação química com o átomo de fósforo. Então, o átomo de fósforo fez cinco ligações químicas e está muitíssimo satisfeito. Desse modo, não é o fósforo que vai reagir, mas sim um ou dois oxigênios do fosfato. A disponibilidade de H^+ (prótons) na solução do solo (medido como pH do solo) é quem determina qual das quatro formas estarão presentes. O ácido fosfórico (H_3PO_4) não está presente no solo, pois precisaria de valores de pH menores do que 1. Por outro lado, o íon PO_4^{3-} somente ocorrerá em solos com elevadíssimos valores de pH (acima de pH 10). Portanto, nos solos tropicais e subtropicais somente ocorrerão os íons H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} . Em solos com pH 3 a 7 a forma predominante é a H_2PO_4^- .

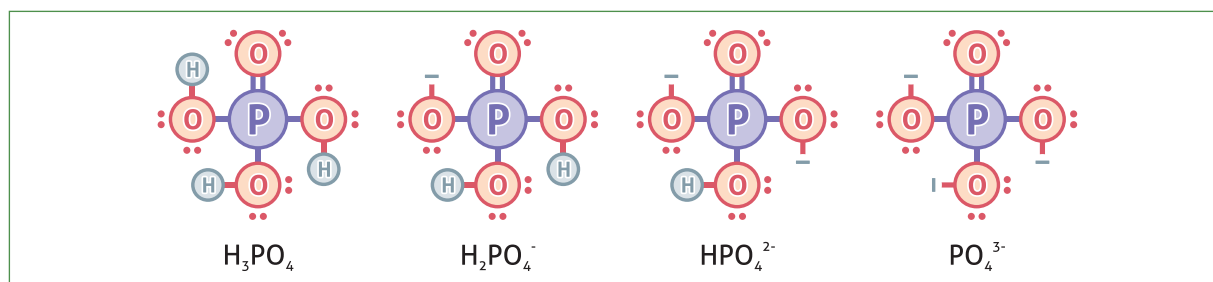


Figura 10: Representação dos íons fosfato

- b. O oxigênio do fosfato (1 e/ou 2) está a procura de um átomo mais reativo do que o hidrogênio (bolas brancas no desenho acima) para ficar mais estável termodinamicamente.
- c. A superfície externa dos argilominerais 1:1 (especialmente a caulinita – ver estrutura na apostila da Gênese e Propriedades do Solo) e dos óxidos (especialmente dos óxidos de ferro) expõe grupos funcionais. A caulinita expõe os grupos funcionais silanol (Si-OH) e aluminol (Al-OH) e o óxido de ferro expõe, obviamente, o grupo Fe-OH. Se for óxido de Al, o grupo funcional será Al-OH; se for óxido de Mn, Mn-OH. Não esqueçam que esses grupos funcionais são apenas a parte exposta do mineral e, consequentemente, não é algo que vive sozinho. Imaginem aquele dispositivo usado nas casas para impedir que as venezianas não batam com o vento. A casa como um todo é o mineral e esse dispositivo é o grupo funcional. É apenas nesse dispositivo que a reação de adsorção do fosfato vai ocorrer. Em cada mineral (caulinita e óxido de ferro, por exemplo), há milhões desses grupos funcionais.
- d. O metal dos grupos funcionais (Si, Al e Fe) de um lado está ligado à estrutura do mineral (caulinita e óxido de ferro). Do outro lado, para simplificar a compreensão, ele está ligado ao oxigênio. O oxigênio está ligado ao metal de um lado e ao hidrogênio (próton) do outro (Si-OH, Al-OH e Fe-OH). O oxigênio pode perder ou ganhar um próton. O grupo Si-OH nas condições normais de pH do solo sempre perderá seu próton portando uma carga negativa (Si-O⁻). Os grupos funcionais Al-OH e Fe-OH podem perder seus prótons ou podem adsorver mais prótons. Se a solução do solo for rica em prótons (H⁺ – pH baixo) eles se tornam protonados (Al-OH₂⁺ e Fe-OH₂⁺). Se a solução do solo for pobre em prótons (alto pH) eles podem perder seus prótons (Al-O⁻ e Fe-O⁻). Isso acontece somente quando o pH do solo for relativamente alto (pH > 5,5).
- e. A energia da ligação oxigênio com o metal (Si, Al e Fe) da estrutura do mineral é alterada com o ganho ou perda de próton. Quimicamente, o átomo de oxigênio precisa de apenas duas ligações para ficar estável (Fe-O-H). Quando o oxigênio perde um próton (Fe-O⁻), a energia da ligação aumenta; quando o oxigênio ganha um próton (Fe-O-H₂⁺), a energia diminui. Imagine que você é o oxigênio e tem dois namorados (Ferro e Próton). Vida boa! Um belo dia, você perde um deles (próton), você aumenta a atração pelo ferro (pois terá que manter a mesma paixão vivida com os dois anteriormente). Quimicamente, equivale a aumentar a energia de ligação entre o oxigênio e o ferro. No entanto, você que já tinha 2 namorados pode namorar um tercei-

ro (outro próton). E daí como fica a situação? Primeiro que é muito mais difícil manter essa situação por longo período. Segundo, que a energia de ligação do oxigênio pelo ferro deverá diminuir para poder conviver com os dois prótons. Entenderam?

- f. A adsorção do fosfato agora pode ser entendida com a ligação de um átomo de oxigênio do fosfato com um átomo de metal do grupo funcional. Mesmo que os dois queiram reagir, há um grande problema: o metal já está ligado a um oxigênio. Qual dos dois oxigênios o metal preferirá? Aquele que já está ao seu lado ou o do fosfato? A escolha foi feita pelo próprio oxigênio ligado ao metal. Se ele largar seu próton para se dedicar totalmente ao metal (ligando-se mais fortemente), o metal ficará satisfeito e não reagirá com o fosfato. Caso o oxigênio, ligado ao metal, aventurar-se, ligando-se a dois prótons (diminui energia de ligação), o metal convidará imediatamente o fosfato para fazer uma ligação muito forte, abandonando o oxigênio com seus dois prótons para a solução do solo (nada mais é do que H_2O). Há possibilidade de o fosfato se ligar ao grupo funcional quando ele estiver neutro ($Fe-OH$ e $Al-OH$). Nesse caso, haverá liberação de OH^- para a solução do solo. Por isso que a adsorção de fosfato é chamada de **troca de ligantes**. Troca-se um ligante que é o OH^- ou H_2O por outro ligante que é o fosfato. Lembre-se de que uma ligação química não é eterna.
- g. A adsorção do fosfato ocorrerá em primeiro lugar com os grupos funcionais mais reativos (protonados e localizados em pontos estratégicos na superfície dos minerais). Então, a primeira vez que for aplicado fertilizante fosfatado num solo, a quantidade que ficará disponível (aquele que consegue ser desorvido) será baixa porque é preciso saturar esses grupos funcionais. À medida que os grupos funcionais mais reativos vão sendo saturados pela adição de fosfato, a quantidade de fosfato adsorvido diminui e, principalmente, a energia de ligação dos próximos fosfatos adsorvidos diminui. Então, reaplicações de fosfatos são mais eficientes do que as adições prévias.

Vários fatores afetam a adsorção do fosfato. O mais importante, logicamente, é a quantidade de argilominerais 1:1 e óxidos de ferro dos solos. Quanto mais argiloso e mais velho for o solo, maiores serão os teores de caulinita e óxidos e maior será a capacidade do solo em adsorver fosfato. O segundo fator importantíssimo que regulariza a adsorção do fosfato é o pH do solo. Nenhuma novidade, pois solos com baixos valores de pH (alta concentração de prótons na solução) apresentam grupos funcionais protonados ($Al-OH_2^+$ e $Fe-OH_2^+$), favorecendo a adsorção do fosfato pelo mecanismo da troca de ligantes. Em conclusão, à medida que os solos

envelhecem, eles ficam mais ácidos e predominam argilominerais 1:1 e óxidos e, conseqüentemente, apresentarão altíssima capacidade de adsorção de fosfato. Nesses solos, mesmo que o teor de fósforo total seja maior do que 1.000 mg kg^{-1} , a quantidade de fósforo disponível é extremamente baixa (geralmente $< 2 \text{ mg kg}^{-1}$), pois a energia de adsorção é muito forte.

Outro fator a ser considerado na adsorção de fosfato é o tempo. A reação de adsorção vai se ajustando com o passar do tempo. Em outras palavras a reversibilidade da reação diminui com o tempo. Em termos práticos, nunca se deve aplicar fosfatos ao solo antes da semeadura ou transplante. Também, a presença de ânions orgânicos (simplificadamente dizendo, a matéria orgânica do solo) pode diminuir a capacidade de adsorção do fosfato do solo. A principal reação de manutenção da matéria orgânica do solo é exatamente a mesma que ocorre com o fosfato. A parte negativa da matéria orgânica reage com os grupos funcionais dos argilominerais e óxidos do solo. Então, ao aumentar a matéria orgânica do solo, diminui-se a adsorção de fosfato. No entanto, não há milagres e é impossível dessorver todo o fosfato já adsorvido com a adição de matéria orgânica.

O fosfato adsorvido poderá voltar para a solução do solo, mas depende da energia de ligação que um o oxigênio do fosfato fez com o metal da superfície dos argilominerais e óxidos do solo. Caso um segundo átomo de oxigênio do fosfato faça outra ligação com outro metal do mineral, então a reversibilidade da reação é muito improvável. Nesse caso, o fosfato não será disponível para as plantas, a não ser que o mineral seja destruído.

A quantidade de fosfato disponível às plantas não é aquela que já está livre na solução do solo. A solução do solo tem quantidades desprezíveis de fosfato (geralmente $< \text{que } 0,01 \text{ mg L}^{-1}$). A reserva potencial (disponível ou lábil) de fósforo do solo é, portanto, aquela adsorvida com baixa energia de ligação (que consegue ser dessorvida) e da parte orgânica passível de ser mineralizado pelos micro-organismos.

SAIBA MAIS

MANEJO DO SOLO E AS ALTERAÇÕES NAS FRAÇÕES DE FÓSFORO

A ciclagem do fósforo no solo e a sua disponibilidade são controladas por reações físico-químicas, mas em muitas situações estas transformações são bioquímicas, como as que ocorrem durante a decomposição da matéria orgânica, ou pela liberação do fósforo estocado nos microorganismos, resultando num equilíbrio dinâmico entre as suas diferentes formas.

A construção ou declínio das frações de fósforo no solo é dependente do balanço entre as adições e retiradas. Assim, nas terras de exploração agrícola, além da erosão, há o declínio biológico, por causa de exportação pelas colheitas, que pode ser expressivo quando as doses reaplicadas são baixas, especialmente em se considerando que as reações com os constituintes minerais, principalmente

com os óxidos de ferro e alumínio, que ocorrem em quase todos os tipos de solo, podem reter mais de 2/3 do total de fósforo adicionado.

Solos cultivados e com baixa adição de fosfatos mantém o fósforo disponível em níveis estáveis, mas, na maioria das vezes, insuficientes para o crescimento normal de culturas comerciais; porém pode ser suficiente para outras espécies pouco utilizadas e, por isso, podem ser incluídas num sistema de rotação. É conhecido que alguns gêneros de plantas, como *Cajanus*, *Inga*, *Erithina*, *Gliricidia* e *Leucaena*, podem aproveitar mais eficientemente o fósforo de fontes de baixa solubilidade. Diversos mecanismos são propostos, mas um dos conhecidos dá destaque para a produção de ácidos orgânicos, como o ácido piscídico, que é produzido pelo guandu, cujos grupos R-OH e R-COOH da porção do ácido tartárico são os componentes ativos na quelação do Fe^{+3} , o que promove a liberação dos fosfatos a ele ligados.

Assim, a combinação de plantas naturalmente eficientes na absorção desse nutriente, mais a aplicação de doses de fertilizantes superiores àquelas exportadas pelos grãos, pode aumentar o fósforo disponível e o Po na biomassa, especialmente em sistemas de alta produtividade.

Em solos cultivados, onde há adições periódicas de fosfatos, o sistema de manejo determina alterações na distribuição das formas e das concentrações do fósforo no seu perfil, e mais especificamente, no horizonte superficial. Basicamente, a maioria das diferenças é relatada entre os sistemas de manejo onde há revolvimento sistemático do solo, plantio convencional, e naquele onde não se pratica o revolvimento, plantio direto. No sistema de plantio direto observa-se maior concentração de fósforo nas camadas superficiais, principalmente entre 0 a 7 cm, o que é explicado pela localização da adubação, pela menor erosão, pela ausência do revolvimento e a ciclagem do nutriente pelas plantas, enquanto que, no sistema convencional, a distribuição segue a profundidade de revolvimento das operações de preparo do solo.

SAIBA MAIS

CONTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO ORGÂNICO DO SOLO PARA A NUTRIÇÃO DAS PLANTAS

Considerando-se que a forma orgânica comumente representa uma fração apreciável do fósforo total encontrado no solo, acredita-se na consequente possibilidade de as plantas o aproveitarem como fonte nutritiva. Isso tem motivado o interesse de pesquisadores desde longa data. Entretanto, os resultados de experimentações realizadas para verificar a contribuição do fósforo orgânico à nutrição das plantas têm mostrado comportamento por vezes divergente. Em alguns trabalhos, onde foi estudada a relação entre o fósforo absorvido por plantas e o fósforo orgânico total, ou a frações lábeis desta forma, os resultados apontaram para a existência de contribuição significativa destes componentes no solo.

É reconhecido que as plantas absorvem o fósforo na forma de íons ortofosfato dissolvidos na solução do solo. Entretanto, as plantas também podem absorver fosfatos orgânicos, como fitina e lecitina, diretamente de uma solução nutritiva, como também, podem promover a hidrólise de compostos fosfatados, como glicerol fosfato, ácidos nucleicos e nucleotídeos, pela ação de fosfatases excretadas pelas raízes. Contudo, estes autores não observaram a absorção direta ou a hidrólise, por fosfatases de raízes de milho e tomate, dos fosfatos orgânicos presentes em extrato aquoso da solução do solo.

A taxa de mineralização de fósforo também pode ser um indicador do potencial do solo em suprir parte da quantidade necessária às plantas, pois se tem considerado que os compostos orgânicos do fósforo do solo não são diretamente absorvidos em quantidade significativa. Estudos mais recentes envolvendo estimativa da taxa

de mineralização de fosfatos orgânicos adicionados ao solo indicaram que a quantidade de fósforo mineralizada durante o ciclo das culturas pode apresentar valor próximo da demanda, especialmente em ecossistemas com baixa disponibilidade do elemento no solo. Entretanto, os resultados de outras pesquisas não permitiram conclusões consistentes sobre a intensidade da mineralização de fósforo, à medida que, para alguns solos, especialmente aqueles que apresentam pH ácido, ou quando a incubação é feita à temperatura abaixo de 30° C, não foram observados efeitos ou diferenças significativas para valores de frações ou de índices analíticos de fósforo. Também, é possível que esta falta de detecção de mineralização líquida estatisticamente significativa decorra da incapacidade dos métodos de extração e análise empregados de refletirem, com precisão adequada, alterações que podem ser consideradas pequenas, relativamente aos valores normalmente encontrados para os componentes ou frações usados como indicadores desta mineralização.

A intensidade de mineralização de fósforo no solo se relaciona positivamente com a quantidade relativa da forma orgânica em relação ao total, a temperatura e ao pH do solo, enquanto, a relação C/P orgânicos não tem se mostrado influir marcadamente neste processo. A distribuição entre os diversos grupos de fosfatos que compõem a forma orgânica no solo também influi na mineralização, pois os fosfatos monoéster, onde predominam fosfatos de inositol, são mais resistentes à degradação, especialmente porque se ligam fortemente às partículas coloidais do solo do que os fosfatos diéster, como ácidos nucleicos e fosfolípidos. Os primeiros se incluem na fração não lábil, enquanto os últimos são considerados lábeis no solo.

Embora as reações de caráter físico-químico geralmente atuem com maior intensidade e rapidez sobre o equilíbrio dinâmico do fósforo no ecossistema solo do que as transformações bioquímicas, regulando sua disponibilidade aos vegetais, é certo que os componentes orgânicos deste nutriente, através de sua ciclagem permanente, contribuem decisivamente para manter, a médio e longo prazo, os níveis de formas lábeis que tendem ao esgotamento, pelos processos de perdas por precipitação, oclusão e erosão e pela remoção pelos produtos agrícolas colhidos.

ASPECTOS PRÁTICOS DO DIAGNÓSTICO E RECOMENDAÇÃO DE FÓSFORO ÀS PLANTAS

Uma das principais tarefas no manejo da fertilidade do solo é um correto diagnóstico da disponibilidade dos nutrientes no solo para poder identificar se há necessidade de aplicação de materiais contendo os nutrientes de modo a corrigir o solo e/ou suprir as necessidades das culturas. Para isso, uma das principais ferramentas é a análise química do solo, com a qual se pode utilizar de determinados indicadores, de modo semelhante ao que já foi abordado na unidade referente à acidez e à calagem.

MÉTODOS DE ANÁLISES DE FÓSFORO DISPONÍVEL NO SOLO

A avaliação do fósforo disponível é feita geralmente com o uso de soluções extratoras, ou agentes de troca iônica, que visam à quantificação de formas capazes de repô-lo à solução do solo após absorção pelas plantas. Os modelos de disponibilização consideram dois compartimentos interligados:

- a solução do solo, que constitui o fator intensidade (I);
- a fase sólida, que armazena os fosfatos que abastecem a solução, lábeis ou moderadamente lábeis, denominado fator quantidade (Q).

A cinética de como o primeiro compartimento é abastecido pelo segundo, chamado fator capacidade (C), representa o poder tampão, ou a taxa de recomposição do I pelo Q, a qual é controlada pela energia de ligação do nutriente em Q e pela difusividade para I, ou pelo grau de labilidade.

No caso do fosfato, quanto maior o valor de Q, menor a energia de ligação aos colóides, pois os sítios de maior avidéz já estão saturados. Por isso, os métodos de avaliação da fertilidade do solo procuram estimar a porção de Q passível de repor I, para predizer a necessidade de suplementação do nutriente. A eficiência desses métodos depende da forma físico-química em que o nutriente está inserido em Q e do acesso do extrator a essa forma. Admite-se que o fósforo estimado pelo método compõe a fração lábil.

Os extratores utilizados para predição do fósforo disponível são, normalmente, soluções de reagentes químicos e podem ser classificados em quatro grandes grupos segundo seus modos de ação. São eles:

- a. dissolução ácida;
- b. troca iônica;
- c. complexação de cátions; e
- d. hidrólise de cátions.

Nos extratores do primeiro grupo, que agem por dissolução ácida, são empregados ácidos fortes diluídos ou ácidos fracos que promovem a dissolução parcial dos colóides inorgânicos, sendo extraídos, em ordem decrescente de efetividade, as formas de fósforo ligadas a cálcio (P-Ca), a alumínio (P-Al) e a ferro (P-Fe). No segundo grupo de extratores, que agem por troca iônica, estes atuam na substituição do fósforo dos sítios de adsorção dos colóides pelos ânions da solução extratora, sendo normalmente utilizado para isto o acetato, bicarbonato, citrato, lactato ou sulfato. Neste grupo de extratores não há extração preferencial de fósforo de acordo com os tipos de colóides, pois como é baseado na troca iônica, o princípio mais importante é a energia de ligação com o colóide, e não a capacidade de dissolução do extrator. Já no terceiro grupo de extratores, que agem por complexação de cátions, eles atuam na complexação do metal do grupo funcional dos colóides. Assim, quando a solução extratora contém fluoreto ou alguns ânions orgânicos (citrato e lactato), estes complexam alumínio, sendo extraídas formas de P-Al. Similarmente, o bicarbonato complexa o cálcio (sendo precipitado CaCO_3), liberando fósforo de compostos P-Ca. No quarto grupo de soluções extradoras que promovem a hidrólise de cátions, a forma de liberação de fósforo dos compostos ocorre em pH alto devido à adição de ânions hidroxila. Estes ânions dissolvem compostos P-Al e P-Fe pela hidrólise dos cátions ferro e alumínio na superfície dos colóides.

Dentre os extratores de fósforo existentes, os laboratórios de análise de solo do Brasil utilizam com mais frequência os de Mehlich-1 e a resina de troca aniônica (RTA). O primeiro é o método oficial utilizado pela Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (ROLAS). O segundo método é recomendado como uma alternativa para alguns casos especiais nesses dois estados (CQFS-RS/SC, 2004) e é o método oficial no Estado de São Paulo.

O extrator de Mehlich-1 é composto de uma mistura de ácidos fortes em baixas concentrações (H_2SO_4 0,0125 mol L⁻¹ e HCl 0,05 mol L⁻¹) com pH entre 2 e 3. A extração do fósforo ocorre pela dissolução ácida dos compostos fosfatados de fraca energia, sendo maior para fosfatos de cálcio, seguido daqueles ligados ao alumínio e, por último, aqueles ligados ao ferro. O princípio do método é a dissolução ácida, porém um efeito secundário de troca iônica nos sítios de adsorção também ocorre, no caso, do íon sulfato pelo fosfato. Dentre as principais vantagens da utilização do método Mehlich-1 estão sua facilidade de execução e o baixo custo de análise. No entanto, deve ser observado que o extrator Mehlich-1 apresenta dois problemas na estimativa dos teores de P no solo. O primeiro se refere a uma exaustão da capacidade de extração com o aumento dos teores de argila e do grau de intemperização do solo. Isto foi contornado pela CQFS-RS/SC (2004) agrupando os solos em quatro classes texturais distintas e criando uma quinta classe para solos cultivados alagados. Assim, para os mesmos teores de fósforo obtidos em solos argilosos e arenosos resultam em diferentes classes de disponibilidade. O segundo problema é a superestimativa da disponibilidade em solos previamente adubados com fosfatos naturais, os quais são solubilizados pelo extrator sem que represente uma proporcional quantidade disponível.

O método da RTA tem sido utilizado para extração de vários elementos químicos do solo. As resinas são materiais sintéticos de alta massa molecular constituídas de uma matriz polimérica com grupos funcionais responsáveis pela troca de íons. O princípio da extração do fósforo pela RTA é a sua remoção contínua da solução pela troca com o bicarbonato ou cloreto da resina, criando um gradiente de concentração que força a saída da superfície dos colóides, até que seja alcançado um equilíbrio eletro-químico entre o solo e a RTA. O uso da RTA como extrator de fósforo é adequado para estimativa do fator quantidade e é considerado melhor que outros extratores, porque o processo de extração assemelha-se à ação das raízes das plantas. Além disso, não ocorre perda de força de extração do P em solos com alto teor de argila, não provoca dissolução química de constituintes do solo e evita superestimação do P disponível em solos que receberam adubação com fosfatos naturais.

Apesar dos diferentes métodos existentes, é por meio de pesquisas, denominadas de estudos de correlação, que um determinado método é selecionado para uma região específica. Nesse caso, são utilizados diversos critérios simultaneamente, como a eficácia dos métodos em estimar a disponibilidade do nutriente, mas também sua praticidade, rapidez e custo.

Recomendação da adubação fosfatada

Os valores de fósforo disponíveis mencionados nos laudos de análises de solo não representam a quantidade desse nutriente que uma planta absorverá. Eles são apenas uma quantidade extraída por uma solução extratora, que no RS e SC é uma mistura de ácidos fortes muito diluídos (método Mehlich-1). Então para que servem esses números? Se não tivessem sido feitos experimentos de campo medindo as produtividades das culturas, eles não serviriam para nada. Sempre se deve relacionar o valor de fósforo extraído por um método de laboratório com a produtividade das culturas a campo. Entretanto, se nós relacionássemos diretamente os teores de fósforo extraídos pelo método oficial usado no RS e SC (Mehlich-1) não encontraríamos correlação significativa. Isso ocorre devido aos problemas abordados anteriormente com esse método e, para resolver essa situação, os solos foram agrupados em classes em função do seu teor de argila. Lembrem-se de que os solos são coloidais e, portanto, muito reativos. Quanto maior o teor de argila (argilominerais, óxidos e matéria orgânica) menor é a capacidade do método de laboratório extrair o fósforo que potencialmente poderia ser disponível às plantas.

Desse modo, a primeira etapa à recomendação de fertilizantes fosfatados é combinar o teor de argila do solo com o seu teor de fósforo disponível (Tabela 10). A partir dessa combinação, nós trocaremos dois valores numéricos (38% de argila – textura 3 – e 5,2 mg P dm⁻³, por exemplo) por uma palavra de sentido qualitativo à disponibilidade de P (BAIXO, no exemplo citado). Essas palavras correspondentes a interpretação estão relacionadas à probabilidade de respostas das culturas à adição de fertilizantes (Figura 11). No caso do método da RTA, os valores para cada faixa são diferentes e não dependem dos teores de argila (Tabela 11).

O teor de suficiência ou teor crítico é o valor de potássio da análise de solo no qual a probabilidade de resposta à adição de fósforo é baixa ou nula. Ela corresponde ao limite superior da faixa “médio”. Então, a palavra ideal para a disponibilidade de P no solo é Alta. Se for abaixo dessa, o solo não apresenta boa capacidade de suprir esse nutriente e acima (Muito Alta), além de desperdício econômico, poderão ocorrer problemas de contaminação das águas superficiais decorrentes da maior facilidade de migração do P do solo para os mananciais hídricos.

INTERPRETAÇÃO	CLASSE TEXTURAL DO SOLO CONFORME O TEOR DE ARGILA ⁽¹⁾				SOLOS SALGADOS
	1	2	3	4	
Muito baixo	≤ 2,0	≤ 3,0	≤ 4,0	≤ 7,0	–
Baixo	2,1 – 4,0	3,1 – 6,0	4,1 – 8,0	7,1 – 14,0	≤ 3,0
Médio	4,1 – 6,0	6,1 – 9,0	8,0 – 12,0	14,1 – 21,0	3,1 – 6,0
Alto	6,1 – 12,0	9,1 – 18,0	12,1 – 24,0	21,1 – 42,0	6,1 – 12,0
Muito alto	> 12,0	> 18,0	> 24,0	> 42,0	> 12,0

⁽¹⁾ Textura 1: > 60% argila; textura 2: entre 41 e 60% argila ; textura 3: entre 21 e 40% de argila e textura 4: entre 1 e 20% de argila.

Tabela 10: Interpretação do teor de fósforo no solo extraído pelo método Mehlich-1, conforme o teor de argila e para solos alagados.

De modo semelhante, pode-se fazer a interpretação da disponibilidade de P pelo método da RTA, utilizando-se da Tabela 11.

INTERPRETAÇÃO	TEOR DE P (mg/dm ³)
Muito baixo	≤ 5,0
Baixo	5,1 – 10,0
Médio	10,1 – 20,0
Alto	20,1 – 40,0
Muito alto	> 40,0

Tabela 11: Interpretação do teor de fósforo do solo extraído por resina de troca aniônica em lâmina.

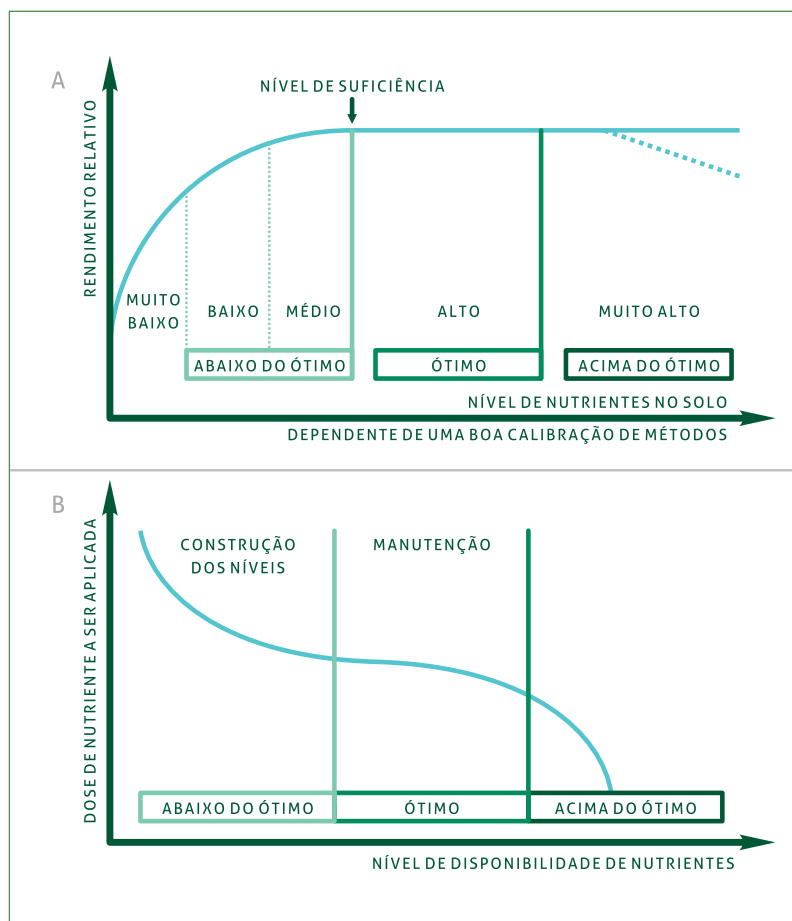


Figura 11: Estabelecimento das classes de disponibilidade de fósforo em relação ao rendimento relativo das culturas (a) e doses a serem aplicadas para a maximização da produtividade (b).

A partir do momento em que foi estabelecida a classe de disponibilidade de fósforo na referida amostra de solo, pode-se definir a dose de fosfato a ser adicionada ao solo para a obtenção da máxima eficiência econômica. Nos solos onde há baixa disponibilidade de fósforo (Muito Baixo, Baixo e Médio), há necessidade de se fazer a CORREÇÃO do solo, além obviamente da necessidade de se adicionar o nutriente necessário para o crescimento da planta. As doses de correção estimadas para essas três classes são de 120, 60 e 30 kg P₂O₅ ha⁻¹. Vejam que já definimos, para todos os tipos de solos e para todas as culturas a serem implantadas, doses para elevar o teor de fósforo à classe ALTO.

A correção do solo em fósforo deveria ser feita numa única vez e no momento do primeiro cultivo após a análise de solo, de modo a eliminar o problema da baixa disponibilidade de P. Esse procedimento deve ser empregado após a remoção da vegetação natural em áreas novas e também no último revolvimento do solo antes de ter sido adotado um sistema conservacionista do solo ou cultivos sem mobilização (sistema plantio direto, pastagem perene ou semipe-

rene, reflorestamento, sistema agroflorestal, fruticultura, etc.). Nos sistemas de produção de culturas anuais já estabelecidos, caso não tenha sido feita anteriormente, a correção da disponibilidade de fósforo pode ser feita numa única vez ou em duas vezes (com a finalidade de diluir os custos do investimento em dois cultivos). Caso a opção seja fazer em duas vezes, recomenda-se adicionar $\frac{2}{3}$ da dose de correção no primeiro cultivo e $\frac{1}{3}$ da dose no segundo cultivo, especialmente nas classes Muito baixo e Baixo. Para a classe Médio a recomendação é colocar toda a correção numa única vez, tendo em vista que a quantidade a ser aplicada é considerada baixa.

Após os solos apresentarem teores ALTOS de fósforo no solo, somente há necessidade de adicionar esse nutriente para a MANUTENÇÃO do teor no solo, fruto da necessidade da planta mais as perdas naturais que ocorrem no sistema. Cada tipo de planta e para cada produtividade de cada tipo de planta exigirá uma quantidade definida de fósforo. Esses dados foram obtidos por pesquisadores gaúchos e catarinenses nos últimos 60 anos. Quando o solo apresentar níveis MUITO ALTOS, a adubação pode até ser suprimida, mas, se adicionada, os valores devem ser iguais ou abaixo dos exportados pela cultura com a colheita (REPOSIÇÃO) (Figura 12).

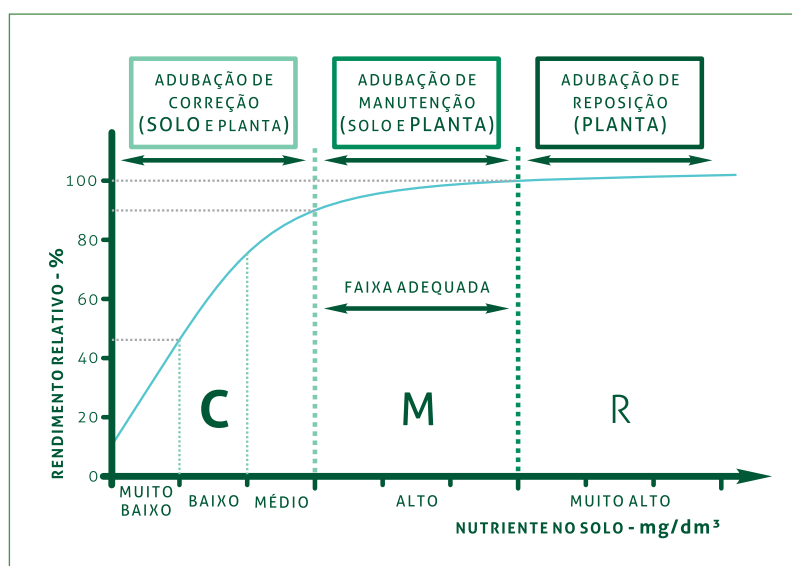


Figura 12: Relação entre o rendimento relativo de uma cultura e o teor de um nutriente no solo e as indicações de adubação para cada faixa de teor no solo (adaptado de Gianello & Wiethölter, 2004).

Assim, o sistema de recomendação é montado a partir de tabelas que contêm os valores necessários para a adubação e correção conforme a disponibilidade do nutriente no solo, a cultura e sua expectativa de produtividade e o cultivo a ser empregada a adubação após a análise do solo, conforme pode ser observado na Figura 13, extraída do Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS, 2004).

Soja

Fósforo e potássio

INTERPRETAÇÃO DO TEOR DE P OU DE K SOLO	FÓSFORO POR CULTIVO		POTÁSSIO POR CULTIVO	
	1º	2º	1º	2º
	kg de P ₂ O ₅ /ha		kg de K ₂ O/ha	
Muito baixo	110	70	125	85
Baixo	70	50	85	65
Médio	60	30	75	45
Alto	30	30	45	45
Muito alto	0	≤ 30	0	≤ 45

Para a expectativa de rendimento maior do que 2 t/ha, acrescentar aos valores da tabela **15 kg de P₂O₅/ha** e 25 kg de K₂O/ha, por tonelada adicional de grãos a serem produzidos.

Diagrama de aplicação: $\frac{2}{3} C + M$ (aplicado no 1º cultivo) e $\frac{1}{3} C + M$ (aplicado no 2º cultivo).
 Legendas: C + M, M, +M.

Figura 13: Indicação das quantidades de fósforo e potássio a aplicar para a cultura da soja a partir das classes de disponibilidade no solo e os cultivos após a análise do solo.

Exemplos de como o sistema é utilizado na recomendação para diferentes grupos de culturas serão abordados na Unidade E.

SAIBA MAIS

ADUBAÇÃO DE CORREÇÃO COM FERTILIZANTES FOSFATADOS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

A adubação de correção é prática rotineira na implantação do sistema plantio direto no Cerrado, mas foi negligenciada na região Sul. A adubação de correção foi adotada pelo RS e SC até 1986 e, a partir daí, optou-se pela filosofia da construção gradativa da fertilidade do solo, basicamente, por causa das restrições de crédito para aquisição de fertilizantes. Justamente a partir desse ano é que houve uma grande expansão na área cultivada em sistema plantio direto. Considerando que o sistema plantio direto foi implantado em solos anteriormente manejados sob cultivo convencional ou sob vegetação natural (cerrado ou campo nativo), o solo deveria ter sido preparado para a adoção do sistema, com prévia calagem e adubação de correção.

Na filosofia de construção da fertilidade, considera-se que a dose de correção deve ser dividida em dois cultivos: $\frac{2}{3}$ da dose de correção total no primeiro cultivo e $\frac{1}{3}$ no segundo cultivo (CQFS-RS/SC, 2004). O uso da construção gradativa dos níveis de fósforo disponíveis no sistema plantio direto pode trazer grandes problemas, uma vez que ela foi concebida para o cultivo convencional. Nesse sistema, por ocasião do revolvimento do solo, fazia-se uma homogeneização nos teores de fósforo pelo menos na camada 0-20 cm. No sistema plantio direto, em áreas com classe de disponibilidade abaixo do ótimo, a construção da fertilidade está se dando unicamente na camada superficial, criando um acentuado gradiente de concentração. Consequentemente, tem se observado baixo percentual de amostras de solo abaixo de 10 cm contendo níveis de fósforo disponíveis acima do teor crítico.

Os questionamentos que se fazem são: (a) qual a dose a ser aplicada num solo que apresente teor de fósforo na faixa ótima na camada 0-10 cm e muito abaixo da ótima na camada 10-20 cm? (b) como se espera construir a fertilidade das camadas mais profundas com a aplicação de fosfato a lanço na superfície no

sistema plantio direto? Além disso, há trabalhos demonstrando quedas na produtividade de algumas culturas em função de problemas físicos na subsuperfície impedindo o acesso ao fósforo, demais nutrientes e água.

A forma de aplicação de fertilizantes fosfatados depende de fatores de solo e de planta. Experimentos desenvolvidos por Barber e seus colaboradores demonstram que sempre que as doses de fosfatos forem altas há similaridade de eficiência agrônômica com as diferentes formas de aplicação (linha, faixa e lanço). Esses dados foram obtidos com aplicações na linha e a lanço, mas incorporados na camada arável, e não devem ser interpretados como sendo similares aos da aplicação superficial no sistema plantio direto.

No sistema plantio direto se tem observado que a aplicação de fosfato deve ser feita na linha de semeadura, sempre que houver probabilidade de resposta da cultura a aplicação do fertilizante (disponibilidade de fósforo abaixo do teor crítico). Assim, a aplicação superficial ficaria limitada somente àquelas glebas com teores de fósforo acima do ótimo, pelo menos na camada 0-20 cm, pois nessa condição a probabilidade de resposta é muito pequena ou ausente e o modo de aplicação não é o fator limitante, e somente se identificada alguma vantagem operacional. Caso contrário, a aplicação deve ser sempre na linha de semeadura. A época de aplicação dos fertilizantes fosfatados continua sendo no momento da semeadura. Se antecipada, há perda de produtividade, pois a energia de ligação do fosfato aos grupos funcionais aumenta com o tempo e, conseqüentemente, diminui a disponibilidade de fósforo às plantas.

Fertilizantes fosfatados

Após definida a necessidade de aplicação do nutriente, pode-se utilizar de diferentes materiais, de origem orgânica ou inorgânica, como fonte do elemento às plantas. Uma fonte importante para o fornecimento de fósforo no contexto da propriedade rural é a adição de resíduos de animais, os quais também podem conter quantidades variadas de fósforo total e diferentes proporções de formas orgânicas e inorgânicas. Pode-se ainda utilizar a farinha de ossos como fonte de fósforo. Os aspectos relacionados à utilização da adubação orgânica serão abordados em outra unidade, tendo em vista que esse tipo de material pode fornecer vários dos nutrientes essenciais simultaneamente.

As principais fontes externas de fósforo, baseadas na exploração das reservas naturais, são os fosfatos naturais obtidos pela moagem das apatitas ou fosforitas. Nesse caso, para aplicação direta ao solo, são indicados os fosfatos de rocha reativos, os quais são aplicados diretamente como fertilizantes em solos ácidos em que a presença de alumínio não seja um fator limitante (Tabela 12). No caso da maioria dos fosfatos naturais brasileiros, de origem apatítica (magmática), o fósforo é lentamente disponível. Esses produtos apresentam baixa eficiência agrônômica para culturas anuais e não são indicados para aplicação direta e sim para a fabricação de fertilizantes industriais.

TIPO DE FOSFATO	DOSES DE CALCÁRIO, t ha ⁻¹			
	0	2	8,5	17
	---- t ha ⁻¹ ----			
Testemunha	2,2	3,8	4,2	5,6
Gafsa	103	6,7	6,1	4,6
Arad	8,7	5,1	6,3	4,2
Super triplo	10,0	10,7	11,4	12,3

Tabela 12: Produtividade acumulada de campo nativo melhorado submetido a doses de calcário superficial e tipos de fosfatos. Adaptado de Gatiboni et al. (2001)

Abaixo estão sistematizadas as condições ideais para a utilização de fosfatos natural e solúvel.

FOSFATO NATURAL	FOSFATO SOLÚVEL
Funciona melhor em solos mais ácidos.	Para solos corrigidos e de qualquer textura.
Não pode haver recomendação de calagem.	Aplicar depois da calagem.
Funciona melhor em solos pobres em Ca e P.	Para solos com qualquer teor de Ca e P.
Funciona melhor com aplicação a lanço e incorporado.	Aplicar em linha para solos argilosos e a lanço para solos arenosos.
Aplicar na forma de pó (ou farelo).	Aplicar na forma granulada.
Mais indicado para culturas de ciclo longo (perenes ou semi-perenes)	Para qualquer cultura.

Os fertilizantes industriais são obtidos do tratamento do fosfato natural de modo a solubilizar o fosfato quimicamente (Figura 14). Os principais produtos formados são: superfosfato simples, superfosfato triplo, fosfato de monoamônio – MAP, fosfato de diamônio – DAP. Também podem ser produzidos fosfatos parcialmente acidulados, termofosfatos e escória de Thomas.

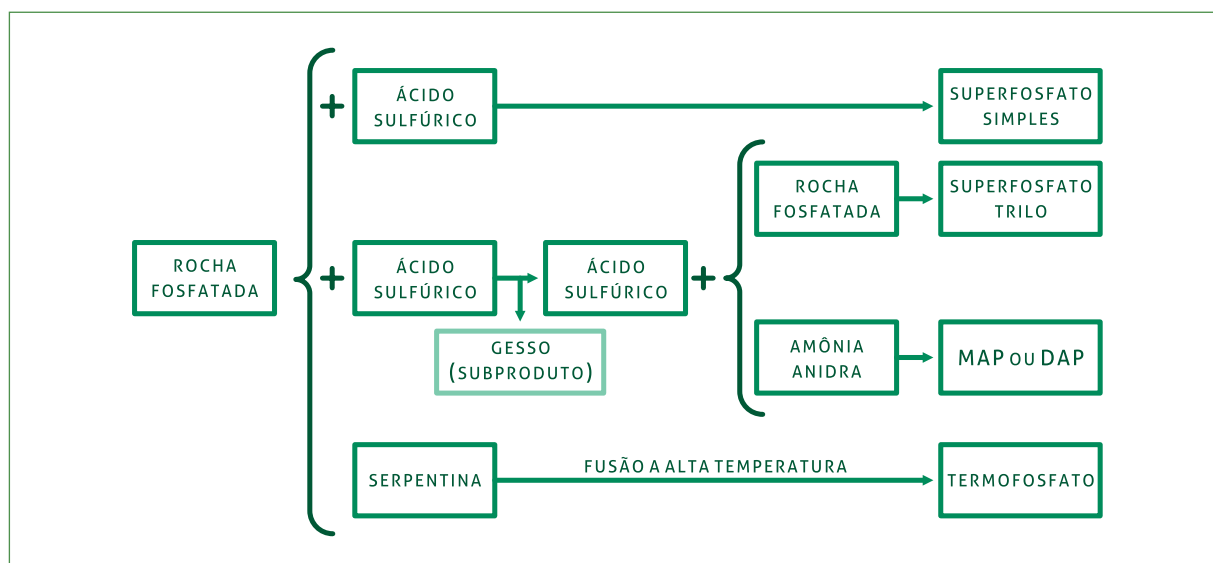


Figura 14: Obtenção dos principais fertilizantes fosfatados e dos fosfatados amoniacais.

O fósforo presente nos adubos é expresso em concentração de P_2O_5 , embora essa forma não ocorra nos adubos. Uma unidade de P_2O_5 contém em média 44% de fósforo, necessitando de uma correção para calcular a real concentração do elemento nos adubos. Entretanto, como as recomendações de adubações são expressas em kg de P_2O_5 por ha^{-1} e as formulações também são expressas em concentração de P_2O_5 , não há necessidade de se fazer correções. Cabe salientar que, às vezes, os adubos orgânicos são expressos em porcentagem de P. Nesses casos, devem ser realizadas as correções para P_2O_5 , utilizando um fator de correção, em que se multiplica o teor de P por 2,29 para ter o equivalente em P_2O_5 .

CAPÍTULO 2 – BIOGEOQUÍMICA DO POTÁSSIO

O potássio é outro nutriente requerido em grande quantidade pelas plantas superiores. Embora tenha uma dinâmica no solo-planta bem mais simples que a do fósforo, as quantidades requeridas pelas culturas nem sempre são supridas pelo solo, o que também o torna um elemento frequentemente adicionado nas adubações. Assim, a semelhança do P, dará destaque às formas e as reações dele no solo e nos procedimentos para avaliar sua disponibilidade, bem como a prática de recomendação da adubação.

ASPECTOS TEÓRICOS DA DINÂMICA DO POTÁSSIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

Potássio na planta

A absorção de potássio se dá pelas células das raízes dos vegetais a partir do íon K^+ da solução do solo. O potássio absorvido é acumulado pelas células vegetais no citosol e nos vacúolos, sempre como íon livre. O processo de absorção de potássio no solo é um processo essencialmente ativo. Por difusão, da epiderme das células, é transportado para dentro da célula contra um gradiente de concentração. É levado da raiz para a parte aérea pelo xilema e também pelo floema. O potássio é um elemento essencial às plantas e é o cátion presente em maior quantidade nas culturas, encontrando-se dentro delas, predominantemente, na forma de íon K^+ . Como o íon não é constituinte de estruturas orgânicas, isso lhe confere uma alta mobilidade entre as células, os tecidos e os órgãos das plantas. Sua função principal é na regulação do potencial osmótico das células vegetais, mantendo o turgor das células. A abertura e o fechamento das células guardas ocorrem por meio do aumento ou da diminuição do potencial osmótico. A planta utiliza íons como o K^+ para aumentar o potencial osmótico e absorver água, causando a abertura dos estômatos, ou diminuindo o potencial osmótico resultando no fechamento dos estômatos. Esse mecanismo é importante

na regulação da taxa de transpiração das plantas e a difusão do CO₂ atmosférico para o processo fotossintético. Ele é também ativador de inúmeras enzimas envolvidas na respiração e na fotossíntese.

A baixa disponibilidade de potássio no solo pode levar à deficiência nas plantas. Limitação na disponibilidade de potássio irá diminuir inicialmente a taxa fotossintética, causando a diminuição do crescimento da planta. Em condições severas, os sintomas visuais de deficiência podem ocorrer. Nessas condições, ocorre a formação de clorose em manchas ou marginal, evoluindo para necrose (Figura 15). Pela alta mobilidade do potássio dentro da planta, os sintomas de deficiência aparecem inicialmente nas folhas mais maduras, na base da planta. Os caules com deficiência em potássio são delgados e fracos e facilmente podem sofrer acamamento. Em condições de déficit hídrico, as plantas apresentam menor resistência à seca, devido à diminuição do turgor das células, dificultando o fechamento dos estômatos, perdendo água.

As plantas apresentam diferenças na absorção de potássio, em função da sua exigência nutricional, disponibilidade do elemento no solo e do estágio de desenvolvimento da planta. Esses fatores estão associados a características morfológicas das plantas, como comprimento, raio, taxa de crescimento e volume das raízes, como da exigência da parte aérea das plantas. Esses fatores condicionam a exigência e a resposta delas à adubação potássica. Disponibilidade alta de potássio no solo fará com que a planta acumule potássio no vacúolo das células. Esse processo denomina-se o “consumo de luxo”, aumentando as exportações de potássio pelas plantas, sem aumentar a produtividade. Como o potássio não faz parte de compostos orgânicos na planta, é facilmente “lavado” das plantas com a água das chuvas à medida que a planta entra em senescência, sendo que uma grande parte do K absorvido pela cultura retorna ao solo após o cultivo.

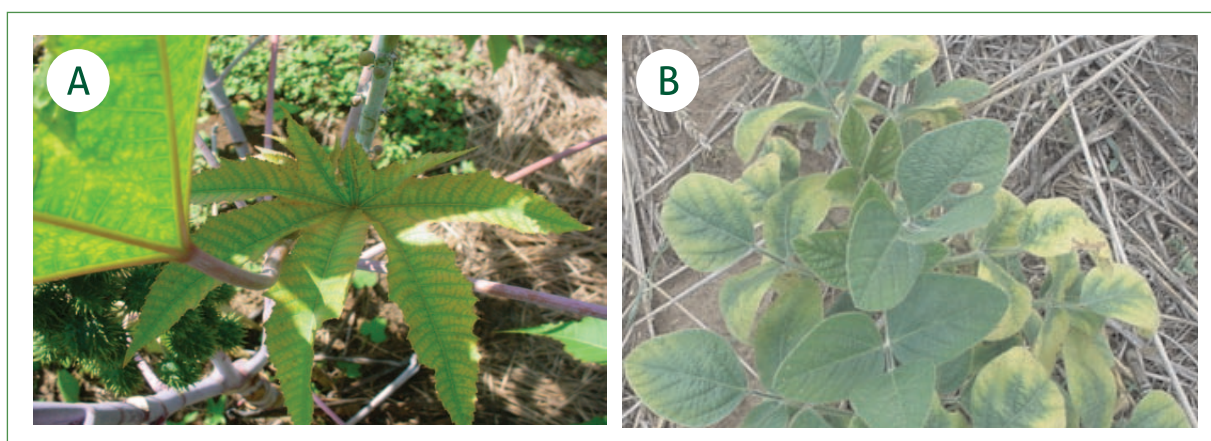


Figura 15: Sintomas de deficiência em potássio (a) mamona e (b) soja.

Fonte: Diovane Freire Moterle

Dinâmica do potássio no solo

O teor médio de potássio na crosta terrestre é de 2,6%. Ele ocupa a sétima posição em ordem crescente de abundância. No solo, os teores variam de menos que 0,1% em solos intemperizados até mais de 3,0% em solos jovens ricos em argilominerais do tipo 2:1. Os solos brasileiros predominam na fração argilominerais do tipo caulinita e óxidos de ferro e alumínio. No entanto, em alguns casos, existem pequenas quantidades minerais primários ricos potássio nas frações grosseiras (areia e silte), sendo fonte potencial de potássio às plantas. Originalmente, o potássio está aprisionado dentro de estruturas minerais rígidas (*potássio estrutural*). Ele se encontra desidratado e por isso a energia de ligação é forte. Durante o intemperismo, quando os minerais vão sendo destruídos ou modificados, há liberação à solução do solo de vários íons, inclusive do K^+ .

Imediatamente, quando o K^+ chega à solução do solo, ele se hidrata, ou seja, ele atrai moléculas de água ao seu redor. Sempre que ele se movimenta no solo, essas moléculas de água vão com ele. Sua concentração varia, em média, de 2 a 5 mg L⁻¹ e é dependente do equilíbrio entre as outras formas de potássio ocorrentes no solo, da umidade do solo, da presença de outros cátions, dos ligantes orgânicos, atividade dos microrganismos e da absorção pelas plantas. Esses valores são muitíssimo mais elevados do que os valores de fósforo (<0,01 mg L⁻¹). O K^+ hidratado da solução do solo pode seguir diferentes destinos:

- a. absorvido pela biota do solo e pelas plantas;
- b. percolado no perfil do solo e atingir os mananciais de água, inclusive, chegar ao mar;
- c. escoado superficialmente na superfície do solo, sozinho ou ligado aos sedimentos;
- d. adsorvido às cargas negativas do solo na superfície dos argilominerais, óxidos e matéria orgânica;
- e. adsorvidos especificamente dentro dos argilominerais 2:1.

O ideal agrônômico e ecológico seria que todo o potássio liberado pelo intemperismo fosse absorvido pela vida do solo ou ficasse adsorvido. No entanto, lembre-se de que o solo é um sistema aberto e como tal sempre haverá transferência para as outras esferas. No caso do potássio, predomina a transferência aos mananciais de águas, tanto superficiais como os subsuperficiais.

A adsorção do potássio é bem mais simplificada do que a adsorção do fósforo. De forma simplificada, dá para considerar que há apenas dois tipos de adsorção de potássio: adsorção física ou não específica e adsorção química ou específica. Para compreender a adsorção de potássio, é necessário lembrar que:

- a. há basicamente dois tipos de cargas elétricas negativas nas partículas de tamanho coloidal do solo: cargas permanentes e car-

- gas variáveis (Ver apostila de Gênese e Propriedades do Solo). As cargas permanentes são originárias pela substituição isomórfica e, portanto, ocorrem no interior dos argilominerais. Os do tipo 2:1 são os grandes portadores de cargas elétricas negativas permanentes (montmorilonita e vermiculita). As cargas variáveis estão presentes na matéria orgânica do solo, na superfície dos argilominerais e dos óxidos. Elas se originam pela dissociação dos grupos funcionais (saída do próton para a solução do solo). Então elas variam segundo a variação do pH da solução do solo;
- b. embora o íon de potássio na solução do solo esteja sempre hidratado, ele pode se desidratar quando se aproxima da superfície carregada eletricamente negativa; o íon hidratado é muito maior do que o desidratado e parte da 'vontade' de se adsorver já foi 'gasta' com a hidratação (ligação com as moléculas de água);
 - c. a carga negativa variável do grupo funcional (R-COO⁻, Si-O⁻, Fe-O⁻, etc) da parte sólida do solo (matéria orgânica, argilominerais e óxidos) atrai o íon K⁺ hidratado da solução do solo. Mesmo que a atração seja mínima, já se considera *adsorção física* ou não específica. Então o íon não mais pertence à solução do solo, mas sim está adsorvido à superfície dos colóides do solo. Muito pouco potássio fica adsorvido nessa forma. Uma vez iniciada a aproximação do íon à superfície, a energia de adsorção vai aumentando. Similarmente a um relacionamento humano. No início, é apenas o 'ficar' e logo pode surgir um verdadeiro amor eterno. Para que esse relacionamento íon – superfície seja forte, é necessário 'despir' o íon, ou seja, perder suas moléculas de água. Então, o íon desidratado pode se aproximar ao máximo a superfície e a energia de ligação passa a ser forte. Essa adsorção é denominada de *adsorção química* ou específica. Logicamente que não tão forte como a ligação fosfato – superfície vista no capítulo anterior, mas o suficiente para que esse íon não sofra percolação no perfil do solo e fraca o suficiente para que ocorra dessorção e a planta possa absorvê-lo. Agromicamente, esse potássio é denominado de *trocável* (tanto o adsorvido fisicamente quanto o adsorvido quimicamente);
 - d. as cargas negativas permanentes estão localizadas em espaços físicos definidos e somente o íon potássio desidratado pode se ajustar fisicamente dentre dessa cavidade (entre as camadas). Desse modo, se houver presença de argilominerais do tipo 2:1 haverá adsorção específica com grande energia de adsorção. Esse potássio somente retornará à solução do solo quando os teores na solução forem extremamente baixos ou quando o argilomineral for destruído (milhares ou milhões de anos). Agromicamente, denomina-se de *potássio não trocável*.

Desse modo, o potássio no solo pode ser classificado em potássio da solução do solo, potássio trocável, potássio não trocável e potássio estrutural conforme apresentado na Figura 16.

O potássio denominado de trocável é comumente extraído com uma mistura de ácidos fortes diluídos (Mehlich-1) ou resinas trocadoras de cátions, a semelhança dos métodos usados para o fósforo. Nesse caso, os métodos avaliam o elemento que está adsorvido as cargas negativas na superfície dos grupos funcionais da matéria orgânica, dos argilominerais e dos óxidos. Esta forma é responsável pelo suprimento imediato de potássio às plantas.

O potássio não trocável é aquele adsorvido especificamente na entrecamada dos minerais do tipo 2:1 (Figura 17). Esse potássio é fortemente adsorvido em decorrência do colapso parcial da estrutura que imobiliza fisicamente o elemento na entrecamada.

O potássio estrutural representa a maior reserva de potássio do solo. Os minerais primários são as principais fontes de potássio nessas formas, tais como os feldspatos e as micas (Figura 17). A liberação dessas formas depende da estrutura cristalina do mineral, do grau de intemperização e do nível de potássio das outras formas ocorrentes no solo.

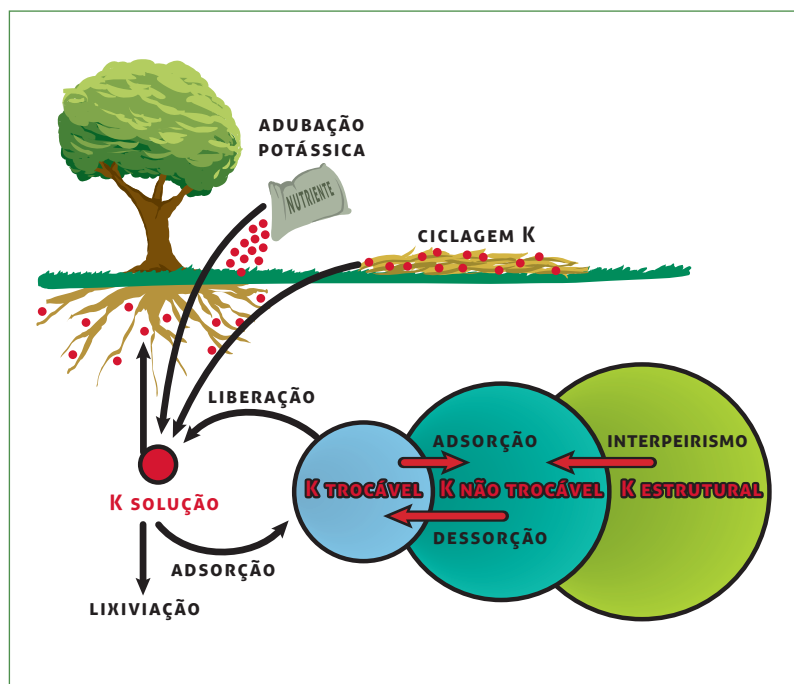


Figura 16: Esquema representando a dinâmica do potássio no solo.

Disponibilidade de potássio para as plantas

O potássio é absorvido a partir daquele que se encontra dissolvido na solução do solo. Essa forma encontra-se em equilíbrio com as demais formas. Entretanto, as diferentes formas de potássio no solo podem sobrepor, estabelecer um equilíbrio entre elas, mas

com velocidades de liberação e dessorção diferentes. Considera-se que as formas trocáveis são rapidamente dessorvidas para a solução do solo, enquanto que as formas não trocáveis são lentas. Assim, a avaliação da quantidade de K na forma trocável é a principal ferramenta para a avaliação da disponibilidade de K às plantas.

A forma trocável representa um índice limitado para expressar a disponibilidade às plantas, quando considerado em um conjunto de solos com propriedades distintas. Atualmente, a CQFS (2004) usa a CTC_{pH7} do solo como parâmetro na recomendação de adubação potássica e relaciona com a presença de grupos funcionais de superfícies. Nesse sentido, os solos mais argilosos possuem maiores quantidades de grupos funcionais que solos arenosos, afetando diretamente a quantidade de potássio adsorvido no solo como também a taxa de dessorção do potássio no solo.

Em diversas situações, verificou-se que a quantidade de potássio extraída pelas plantas é superior às formas consideradas disponíveis, determinadas nos laboratórios de análise de solo. Nessas situações, as formas não trocáveis de potássio contribuem significativamente na nutrição das plantas. A contribuição do potássio não trocável tem sido relacionado à presença de minerais primários (micas e feldspatos) e ou secundários (ilitas, esmectitas com hidróxi-Al nas entrecamadas) como fonte de potássio nos solos. Esses possuem alta densidade de cargas negativas na entrecamada adsorvendo especificamente o potássio (Figura 17). Nas bordas parcialmente intemperizadas das micas, chamadas zonas em cunha, o potássio adsorvido especificamente se hidrata, que por força de concentração são removidos da entrecamada do mineral. Esse processo de liberação de potássio para a solução do solo é conhecido como processo de vermiculização, ou transformação de mica até vermiculita (Figura 17).

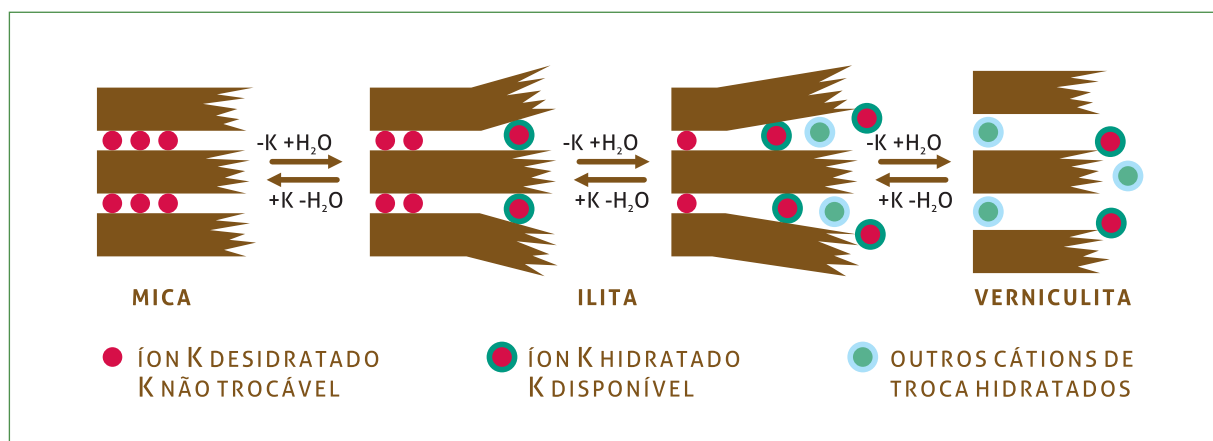


Figura 17: Representação do processo de intemperismo das micas até vermiculitas e liberação do potássio não trocável.

O aumento da adubação potássica pode favorecer o gradiente adsorção do potássio no solo. As formas trocáveis são rapidamente alteradas enquanto as formas não trocáveis sofrem menos interferência e dependem do tipo de mineral predominante no solo. A reação de desorção ocorre quando a planta absorve potássio do solo causando a diminuição de sua disponibilidade na solução do solo. Nesse mecanismo, a raiz absorve o nutriente criando gradiente de concentração em direção a rizosfera, na qual aumenta o fluxo de potássio em direção à reserva trocável.

ASPECTOS PRÁTICOS DA RECOMENDAÇÃO DA ADUBAÇÃO POTÁSSICA

Muito do que foi abordado para a recomendação fosfatada se aplica para a recomendação da adubação potássica. Assim, a abordagem será mais direta, detalhando-se apenas aquilo que for peculiar a esse elemento.

A recomendação da adubação potássica no RS e SC está baseada na determinação de potássio no solo, determinado pelo extrator de Mehlich-1. Em função da resposta das culturas em relação à adubação potássica, foram estabelecidas faixas de interpretação dos teores desse nutriente no solo (Tabela 13). Essas faixas foram separadas de acordo com a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC₇).

INTERPRETAÇÃO	CTC pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³)		
	> 15,0	5,1 – 15,0	≤ 5,0
	---- mg de potássio dm ⁻³ ----		
Muito baixo	≤ 30	≤ 20	≤ 15
Baixo	31 – 60	21 – 40	16 – 30
Médio	61 – 90	41 – 60	31 – 45
Alto	91 – 180	61 – 120	46 – 90
Muito alto	> 180	> 120	> 90

Tabela 13: Interpretação do teor de potássio conforme as classes de CTC do solo a pH 7,0.

A interpretação dos resultados de uma análise de solo para a recomendação da adubação potássica consiste no enquadramento dos resultados das análises em faixas, como MUITO BAIXO, BAIXO, MÉDIO, ALTO E MUITO ALTO. Esse enquadramento é realizado conforme a probabilidade de resposta em rendimento das culturas. A probabilidade de resposta é de muito alta, alta, média, baixa e muito baixa para as faixas de interpretação muito baixas, baixa, média, alta e muito alta, respectivamente, de maneira análoga à utilizada para o fósforo no capítulo anterior. O teor de suficiência ou teor crítico é o valor de potássio da análise de solo no qual a probabilidade de resposta à adição de potássio é baixa ou nula. Ela

corresponde ao limite superior da faixa “médio”. Os teores críticos estabelecidos foram de 45, 60 e 90 mg dm⁻³ para solos com CTC₇ ≤ 5,0, entre 5,1 e 15,0 e > 15,0 cmol_c dm⁻³, respectivamente.

As quantidades de potássio a serem adicionadas seguem os mesmos princípios abordados para a recomendação da adubação fosfatada. Na recomendação da adubação potássica, devem ser levados em consideração três aspectos. O primeiro é a disponibilidade de potássio no solo, determinado por meio de análise química, utilizando o extrator de Mehlich-1. O segundo é verificar a CTC₇ do solo para enquadrar na classe de CTC₇ a fim de estabelecer o nível de suficiência. Em terceiro, devemos considerar a cultura e a expectativa de rendimento para estabelecer a dose de potássio a ser adicionada, dentro do cultivo a ser realizado (Tabela 14).

Soja

Fósforo e potássio ⁽¹⁾

INTERPRETAÇÃO DO TEOR DE P OU DE K SOLO	FÓSFORO POR CULTIVO		POTÁSSIO POR CULTIVO	
	1º	2º	1º	2º
	kg de P ₂ O ₅ /ha		kg de K ₂ O/ha	
Muito baixo	110	70	125	85
Baixo	70	50	85	65
Médio	60	30	75	45
Alto	30	30	45	45
Muito alto	0	≤ 30	0	≤ 45

Para a expectativa de rendimento maior que 2t/ha, acrescentar os valores da tabela 15kg de P₂O₅/ha, por tonelada adicional de grãos a serem produzidos.

⁽¹⁾ Ver ITENS 7.4 E 7.9

Tabela 14: Indicação das quantidades de fósforo e potássio a aplicar a partir das classes de disponibilidade no solo e os cultivos, após a análise do solo.

Fertilizantes contendo potássio

Os adubos potássicos podem ser de origem orgânica (dejetos ou resíduos orgânicos) ou inorgânica (mineral). Os adubos de origem orgânica possuem baixa concentração do elemento e variam de 0,5% até 3,5%. No caso do potássio, como não faz parte da estrutura de compostos orgânicos, o índice de eficiência dos adubos orgânicos é de 1,0. Isso indica que todo o nutriente adicionado na adubação orgânica estará disponível às plantas no primeiro cultivo. Maior detalhe sobre a adubação orgânica será tratada na sequência dessa disciplina.

Os adubos de origem inorgânica são obtidos de rochas potássicas. As principais rochas que contêm potássio na sua estrutura são a silvita (KCl), cainita (KCl.MgSO₄.3H₂O) e langbeinita (K₂SO₄.2MgSO₄), que contêm o equivalente a 63%, 19% e 23% de K₂O respectivamente. Essas fontes são solúveis em água e contêm altos teores de

potássio, tornando viáveis economicamente para a sua exploração e comercialização como fertilizante agrícola. Outras fontes de potássio como minerais silicatados ricos em potássio contêm 10 a 20% de K_2O , mas não são solúveis em água e são de difícil solubilização em processos industriais, não sendo utilizado como adubo mineral.

Os principais adubos potássicos de origem mineral são o cloreto de potássio (58% de K_2O e 48% de Cl), sulfato de potássio (48% de K_2O e 15 a 17% de enxofre), nitrato de potássio (13 % de NO_3^- e 46% de K_2O) e o sulfato de potássio e magnésio (18% de K_2O , 22% de enxofre e 4,5% de Mg). Mais de 99% do fertilizante potássio consumido no Brasil é o cloreto de potássio. O cloreto de potássio apresenta restrição ao uso apenas na cultura do fumo, pois a alta concentração de cloro pode interferir na combustão do produto, ou seja, do cigarro. Outra limitação do cloreto de potássio é na colocação de altas doses próximas à semente. A alta salinidade pode danificar as sementes e raízes.

O potássio presente nos adubos é expresso em concentração de K_2O , embora essa forma não ocorra nos adubos. Uma unidade de K_2O contém em média 83% de potássio, necessitando de uma correção para calcular a real concentração do elemento nos adubos. Entretanto, como as recomendações de adubações são expressas em kg de K_2O por ha^{-1} e as formulações também são expressas em concentração de K_2O , não há necessidade de se fazer correções. No entanto, às vezes, os adubos orgânicos são expressos em porcentagem de K. Nesses casos, devem ser realizadas as correções para K_2O , utilizando um fator de correção, em que se multiplica o teor de K por 1,2 para ter o equivalente em K_2O .

Na adubação corretiva, a aplicação dos fertilizantes potássicos industriais em sistemas conservacionistas, pastagens perenes ou semiperenes e arboricultura a adubação corretiva deveria ter sido feita a lanço seguida de incorporação no início dos cultivos. Caso isso não tenha sido feito, haverá um problema e a solução é parcial com a adubação na linha. Mesmo em solos com baixa capacidade de troca de cátions, é questionável a aplicação de fertilizantes potássicos na superfície do solo.

Na adubação das culturas (manutenção e reposição), os fertilizantes devem ser aplicados na linha de semeadura e no momento da semeadura ou transplante das mudas. Não há vantagens em termos de eficiência do adubo potássico com a aplicação em cobertura, embora vantagens operacionais tenham sido alegadas para justificar essa prática. Entretanto, se o solo for deficiente em potássio, os fertilizantes devem ser sempre aplicados na semeadura. Lembre-se de que as respostas à adubação potássica em solos com teores acima do teor crítico (45, 60 ou 90 $mg\ dm^{-3}$) são muito pequenas e as quantidades aplicadas são justificadas apenas para

manutenção dos teores no solo. Dessa forma, a adição de fertilizante no solo com níveis ALTO e MUITO ALTO não depende do modo de aplicação, já que são pequenas ou não há respostas das plantas nessas condições. No caso de solo com níveis MUITO ALTO, a adubação potássica poderia ser até dispensada no primeiro cultivo.

CAPÍTULO 3 – BIOGEOQUÍMICA DO NITROGÊNIO

O nitrogênio tem sua dinâmica mais complexa do que fósforo e potássio, mas as formas e reações são fortemente relacionadas com a atividade biológica do solo e, portanto, esse assunto foi amplamente trabalhado na disciplina de Biologia do Solo. Recomendamos a leitura da Unidade G dessa disciplina para revisar o conteúdo. Alguns aspectos da dinâmica solo-planta-atmosfera serão retomados nesse capítulo, bem como os procedimentos para recomendação da adubação nitrogenada.

ASPECTOS TEÓRICOS DA DINÂMICA DO NITROGÊNIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

Nitrogênio na planta

As plantas absorvem os íons amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) da solução do solo. As raízes das plantas são especializadas em absorver água e nutrientes e as folhas em realizar a fotossíntese. Alguns pensam que as folhas são órgãos importantes para a absorção de nutrientes e isso não é verdade! Dentro da planta, o nitrogênio é convertido a aminoácidos, as unidades de formação das proteínas, e muito outros compostos nitrogenados. Os aminoácidos são então usados na formação do protoplasma. Consequentemente, o nitrogênio é um componente necessário para a estrutura e as funções da célula, uma vez que o protoplasma é o local de divisão celular e de crescimento das plantas. O nitrogênio é constituinte do DNA e RNA e, portanto, ele está envolvido em todas as reações biológicas, inclusive, obviamente, na transmissão genética. Todas as enzimas das plantas são proteínas. Assim sendo, o nitrogênio é necessário para todas as reações enzimáticas nos vegetais. Como uma parte da molécula de clorofila, o nitrogênio está diretamente envolvido na fotossíntese, é um componente necessário da biotina, tiamina, niacina, riboflavina e de outras vitaminas, e ajuda a planta a produzir e a usar os carboidratos, além de afetar as reações energéticas.

O principal sintoma de deficiência de nitrogênio é o amarelamento das folhas, normalmente da ponta para a base em forma de "V" e inicia nas mais velhas. Esse comportamento denota grande mobilidade interna do nutriente. Em casos mais severos, ocorre o secamento da folha, começando na ponta das folhas mais velhas e

progredindo ao longo da nervura principal. Em algumas espécies, pode ocorrer ainda necrose seguida de dilaceramento dos tecidos.

Nitrogênio no solo

Muito pouco nitrogênio é encontrado nas rochas e nos minerais que formaram os solos. Assim, a quantidade de nitrogênio em forma prontamente disponível no solo é pequena e quase todo o nitrogênio do solo é proveniente da atmosfera da terra, a qual contém um suprimento quase ilimitado. Cerca de 78% do ar que respiramos é composto por nitrogênio (N_2), mas este é um gás inerte. O nitrogênio precisa ser combinado com outros elementos antes que as plantas possam usá-lo. As formas de nitrogênio que as plantas utilizam são os íons de NH_4^+ e NO_3^- , presentes na solução do solo. Essas formas são consideradas inorgânicas e representam menos que 3% do nitrogênio total do solo.

Como explicar o fato de haver muito nitrogênio no solo e não ser originário da rocha? O nitrogênio presente no solo é originário do gás N_2 presente na atmosfera. Embora haja mecanismos puramente físico-químicos de transformação do N_2 em N mineral (NO , N_2O , NO_3^- , ...) por meio de descargas elétricas na atmosfera, quase que a totalidade do N encontrado no solo foi transformado biologicamente em formas orgânicas. Na evolução das espécies, a presença da enzima *nitrogenase* foi crucial. Graças a essa enzima (logicamente presente dentro de organismos vivos) foi, é e será possível quebrar as três fortíssimas ligações entre os dois N da molécula de N_2 . Para tal, os organismos vivos usam energia, elétrons e prótons e geram duas moléculas de NH_3 . Imediatamente, essa forma de nitrogênio é incorporada num esqueleto orgânico (produzido na fotossíntese) e formam-se os mais diversos compostos orgânicos nitrogenados. Há microrganismos que vivem sozinhos, mas a maioria deles está associada a outros organismos vivos, principalmente as plantas. Desse modo, a maior parte do nitrogênio do solo está presente em formas orgânicas, tais como a matéria orgânica do solo e os resíduos culturais e dejetos de animais. De maneira geral, diz-se que os três principais processos físico-químico-biológicos da Terra são a fotossíntese, a fixação biológica e a capacidade de troca de cátions do solo.

A forma mais econômica e ecológica de entrada de nitrogênio ao solo é através da fixação biológica. Cultivo de leguminosas nos sistemas de produção agropecuário e, mesmo, melhorando-se a eficiência da fixação por outros gêneros de plantas, como é o caso das gramíneas, é altamente recomendado. Isso porque a fixação biológica pode ser simbiótica ou não simbiótica. A fixação simbiótica de nitrogênio refere-se a microrganismos que fixam o nitrogênio enquanto crescem em associação com a planta hospedeira. O processo beneficia a ambos, organismo e planta. O exemplo mais

amplamente conhecido da fixação simbiótica é a associação entre a bactéria *Rhizobium* / *Bradyrhizobium* e as raízes das leguminosas. A bactéria forma nódulos nas raízes. As bactérias nesses nódulos fixam o nitrogênio da atmosfera e o torna disponível para a leguminosa. As leguminosas fornecem os carboidratos que dão à bactéria a energia para fixar o nitrogênio. A fixação simbiótica de nitrogênio pelas bactérias das leguminosas é considerada a mais importante fonte natural deste nutriente nos solos. A fixação não simbiótica do nitrogênio é levada a efeito por bactérias de vida livre no solo. A quantidade de nitrogênio fixada por esses organismos é muito menor do que a quantidade fixada simbioticamente.

Uma vez fixado o nitrogênio numa forma orgânica, ele não é prontamente disponível às plantas. As plantas não absorvem ("co-mem") matéria orgânica, absorvem íons de elementos químicos da solução do solo. Para que o nitrogênio presente nas substâncias orgânicas seja aproveitado por uma planta, a substância orgânica deve ser decomposta pelo ataque dos microrganismos e a consequente liberação à solução do solo do nitrogênio na forma mineral (NH_4^+ e NO_3^-). Esse processo é chamado de "mineralização". Assim, a matéria orgânica do solo é considerada a grande reserva de nitrogênio no solo e é utilizada como um indicativo da capacidade de o solo fornecer esse nutriente às plantas. O nitrogênio também pode ser convertido da forma inorgânica para a forma orgânica. Este processo é chamado de "imobilização". Ele é o reverso da mineralização e ocorre quando resíduos de culturas com alto teor de carbono e baixo em nitrogênio são incorporados ao solo e os organismos retiram o nitrogênio inorgânico do solo para obter o que dele necessitam. Mas grande parte desse nitrogênio volta à forma disponível, à medida que os corpos dos microrganismos se decompõem. A mineralização e a imobilização ocorrem simultaneamente nos solos. A mudança no solo em direção às formas orgânica ou inorgânica depende grandemente da relação carbono/nitrogênio (C/N) dos materiais orgânicos em decomposição. Os materiais com relação C/N alta (acima de 30:1) favorecem a imobilização. Materiais com relação C/N baixa (menos de 20:1) favorecem uma mineralização mais rápida. Em relações C/N em torno de 25:1 os dois processos praticamente se igualam.

Sendo assim, a reciclagem de todo e qualquer material orgânico é fundamental para a manutenção do nitrogênio na crosta terrestre. Então, uma fonte importante para o fornecimento de nitrogênio é a adição de resíduos de animais e de processamento de vegetais, os quais podem conter quantidades variadas de nitrogênio total e diferentes proporções de formas orgânicas e inorgânicas. A grande vantagem é que os custos desses insumos estão associados apenas aos sistemas de estocagem e distribuição, além de dar um descarte

ambientalmente mais seguro aos materiais. A dificuldade maior é dimensionar as quantidades a aplicar e associar às épocas de aplicação com a disponibilidade desses resíduos nas propriedades.

É importante lembrar que o nitrogênio não está estável termodinamicamente nos compostos orgânicos. A forma mais estável é o N_2 . Ele tenta voltar à forma original, mesmo que tenha que passar por fases intermediárias. Muitas dessas formas intermediárias são gases (NO , N_2O) ou formas facilmente percoláveis no perfil do solo (NO_3^-). As formas gasosas representam perdas e problemas ambientais relacionados ao aquecimento global e as formas percoláveis, além de serem perdas causam a contaminação das águas subsuperficiais. Desse modo, tem-se grande dificuldade de manter ele no solo. Como vocês bem estudaram nas outras disciplinas, o nitrogênio pode ganhar e perder muitos elétrons [NH_4^+ (-4) até NO_3^- (+5)]. Agronomicamente, a principal mensagem útil disso é que há necessidade constante de fixar biologicamente o nitrogênio do ar e é essencial que o uso e manejo do solo sejam adequados para minimizar a decomposição da matéria orgânica do solo. Somente assim, pode-se manter e até aumentar o estoque de nitrogênio do solo.

Dessa forma, o manejo da adubação nitrogenada pressupõe um sistema integrado da avaliação da necessidade para os cultivos (cultura a ser implantada), a capacidade do solo em fornecer nitrogênio (avaliado pela matéria orgânica do solo), da entrada via fixação biológica (sistema de culturas anteriormente utilizado na propriedade) e o aproveitamento de resíduos gerados na propriedade (disponibilidade de dejetos de animais ou resíduos de agroindústria). Somente após esse estudo é que se considera a necessidade de entrada de insumos externos, com a utilização de fertilizantes industriais.

ASPECTOS PRÁTICOS DA RECOMENDAÇÃO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA

No caso do nitrogênio, devido a sua dinâmica basicamente de ordem biológica, a recomendação da adubação nitrogenada não segue os mesmos princípios utilizados para o P e o K. Em algumas culturas, como a soja, que realiza simbiose com bactérias altamente eficientes na fixação biológica de N, a adubação nitrogenada pode ser completamente descartada, tendo em vista que as quantidades supridas podem satisfazer às necessidades da cultura durante todo o ciclo. Outras espécies leguminosas em que a fixação biológica de N não é tão eficiente, como o feijão, as doses utilizadas serão mais baixas e dependem da disponibilidade existente no solo. O mesmo se refere às espécies que não recebem quantidades significativas de N via FBN, como as gramíneas. Entretanto, nesses casos, a cultura antecedente pode interferir na recomendação da adubação nitrogenada, tendo em vista o papel da decomposição dos resíduos

culturais na dinâmica do elemento no solo.

Assim, a avaliação da disponibilidade de N é realizada através da interpretação da análise do teor de matéria orgânica do solo, principal reservatório de N no solo, em conjunto com a exigência da cultura em função da produtividade e o tipo de resíduo da cultura antecedente, como pode ser exemplificado na recomendação da cultura do trigo (Tabela 15). Pode-se observar que, tendo em vista as características do N no solo abordadas anteriormente, não se aplicam os princípios de adubação de Correção, Manutenção ou Reposição, conforme já discutido para o P e o K respectivamente.

Trigo

Nitrogênio

TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO	NITROGÊNIO	
	CULTURA ANTECEDENTE	
	LEGUMINOSA (SOJA)	GRAMÍNEA (MILHO)
%	---- kg de N/ha ----	
≤ 2,5	60	80
2,6 – 5,0	40	60
> 5,0	≤ 20	≤ 20

Para a expectativa de rendimento maior do que 2 t/ha, ACRESCENTAR AOS VALORES DA TABELA 20 KG de N/ha em trigo após leguminosa e 30 kg de N/ha em trigo após gramínea, por tonelada de grãos a serem produzidos.

Tabela 15: Indicação das quantidades de fósforo e potássio a aplicar a partir das classes de disponibilidade no solo e os cultivos após a análise do solo.

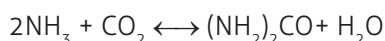
Mais detalhes e exemplos da adubação nitrogenada serão encontrados na Unidade E.

Fertilizantes nitrogenados

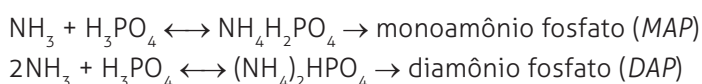
Para romper as ligações, os organismos usam a enzima nitrogenase, energia (geralmente oriunda da fotossíntese), elétrons (geralmente fruto da quebra da molécula de água) e prótons (geralmente da quebra da molécula de água). No caso do rompimento físico-químico natural, a energia é oriunda das descargas elétricas na atmosfera e os elétrons e prótons são oriundos de gases atmosféricos. A partir desses conhecimentos, o homem dominou a técnica de ruptura das ligações entre os átomos de nitrogênio do N₂ por meio de processo industrial. No entanto, para tal, há necessidade de energia, elétrons e prótons. Todos são obtidos a partir de combustíveis fósseis. Obviamente, os países desenvolvidos são os principais produtores de fertilizantes nitrogenados. Exceção é a Venezuela que tem grande produção por ser um país com grandes reservas de petróleo. Infelizmente, governos brasileiros no passado priva-

tizaram ou desativaram a indústria de fertilizantes do Brasil, não somente a de nitrogenados. Então, hoje, quase 100% dos fertilizantes nitrogenados são importados de países como Holanda, Venezuela e Estados Unidos. Todas as plantas industriais de produção de fertilizantes nitrogenados produzem inicialmente o gás amônia (NH_3) e posteriormente os demais produtos (Figura 18).

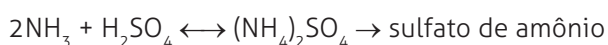
A partir da amônia, é possível produzir a uréia, simplesmente pela reação com o gás carbônico da atmosfera:



A reação da amônia com o ácido fosfórico (produzido a partir da acidificação da rocha fosfatada) gera os dois principais fertilizantes fosfatados e nitrogenados:



A reação da amônia com o ácido sulfúrico resulta na síntese do sulfato de amônio ou como subproduto da produção de caprolactama (indústria têxtil):



Todos os fertilizantes nitrogenados industriais apresentam alta solubilidade e, portanto, dissolvem-se rapidamente na água do solo. A uréia necessita de uma enzima para iniciar a reação de sua decomposição. Após a quebra da uréia, forma-se o gás amônia (NH_3) e o gás carbônico. Então, ocorrerão perdas por volatilização. As perdas podem ser muitíssimo elevadas (> 50%) se ela for aplicada na superfície do solo e as condições de umidade do solo e a demanda atmosférica forem adversas. As perdas podem ser minimizadas e tenderem a zero se a uréia for incorporada ao solo. A incorporação não precisa ser mais profunda do que apenas um centímetro. A necessidade de incorporação é para que ocorra a reação do gás amônia com o próton da solução do solo:

$\text{NH}_3 + \text{H}^+ \longleftrightarrow \text{NH}_4^+$ (cátion que será adsorvido as cargas negativas do solo e servirá de substrato para o crescimento de bactérias que o transformará em NO_3^-).

O MAP, DAP e sulfato de amônio não precisam de enzimas para a sua degradação, pois são compostos inorgânicos. Basta haver água para que ocorra a solubilização. Ambos liberam já o cátion amônio (NH_4^+) que não é volátil. A indústria oferece sulfato de amô-

nio como substituto da uréia afirmando que ele é mais eficiente do que ela. Na verdade, as perdas podem ser menores, mas o preço atualmente praticado para esses produtos ainda é muito mais vantajoso para a uréia. Adicionalmente, práticas para minimizar as perdas de N com a utilização de uréia devem ser utilizadas, maximizando ainda mais sua vantagem em relação ao sulfato de amônio.

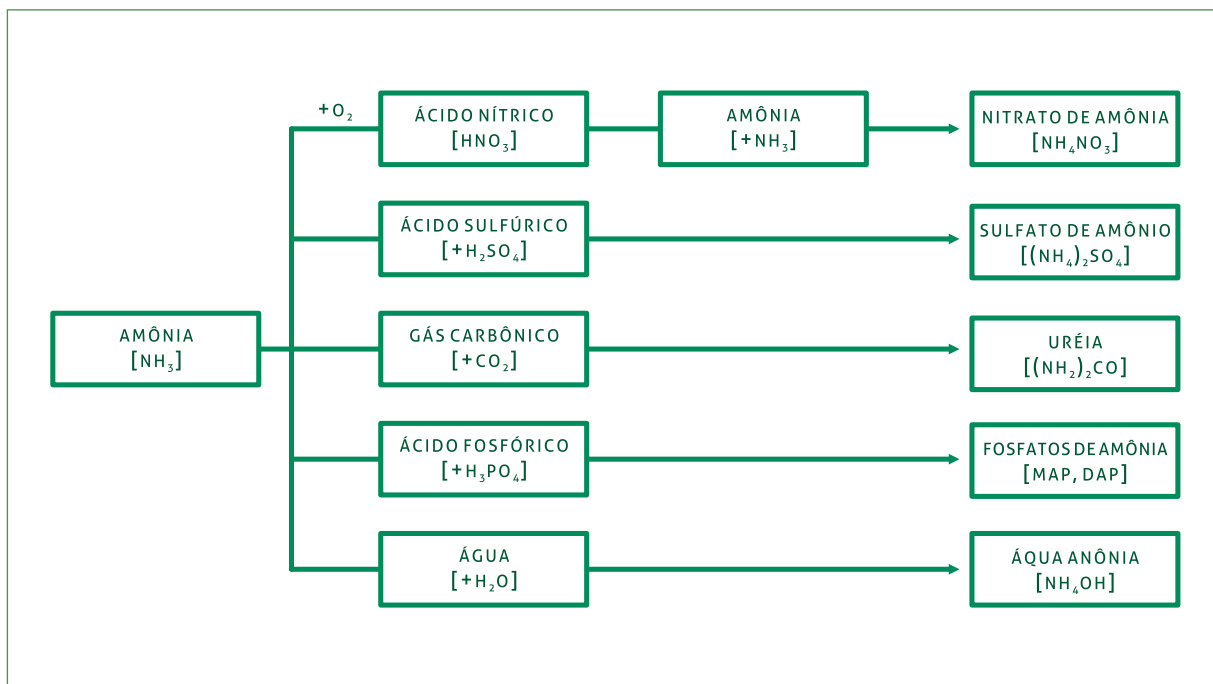


Figura 18: Rota de produção dos fertilizantes nitrogenados.

CAPÍTULO 4 – BIOGEOQUÍMICA DO CÁLCIO, MAGNÉSIO E ENXOFRE

Nesse grupo, estão nutrientes que são absorvidos em quantidades relativamente grandes, mas menores que as relacionadas com o nitrogênio, fósforo e potássio. Dessa forma, o solo pode apresentar disponibilidade suficiente para os cultivos e nem sempre é necessário adicionar esses nutrientes via adubação. Adicionalmente, considerando a composição dos fertilizantes usados para suprir N, P e K, as adubações com estes elementos já fornecem uma quantidade de cálcio, magnésio e enxofre suficiente para a cultura, mesmo que não considerados individualmente. No caso do cálcio e magnésio, convém ressaltar que sua disponibilidade e recomendação estão muito associadas ao manejo da calagem, sendo o calcário utilizado como corretivo da acidez a principal fonte desses elementos ao solo.

CÁLCIO E MAGNÉSIO

O cálcio e o magnésio são absorvidos pelas plantas como cátion Ca^{2+} e Mg^{2+} da solução do solo. Uma vez dentro da planta, o cálcio funciona de várias maneiras: estimula o desenvolvimento das raízes e das folhas; forma composto que é parte das paredes celulares; ajuda a ativar vários sistemas enzimáticos nas plantas, melhorando as condições para o desenvolvimento das raízes, estimulando a atividade microbiana e aumentando a disponibilidade de molibdênio e a absorção de outros nutrientes. O magnésio é um mineral constituinte da clorofila e conseqüentemente está envolvido ativamente na fotossíntese. A maior parte do magnésio nas plantas é encontrada na clorofila, mas as sementes também são relativamente ricas, apesar de culturas produtoras de grãos, tais como o milho, possuírem baixos níveis desse nutriente nas sementes. O magnésio também ajuda no metabolismo do fosfato, na respiração da planta e na ativação de vários sistemas enzimáticos.

O cálcio e o magnésio, à semelhança do potássio, existem como cátions e são governados pelo fenômeno de troca de cátions. Assim, as formas disponíveis são aquelas solúveis e retidas nos pontos de troca em equilíbrio com a solução do solo. O cálcio e o magnésio também fazem parte da estrutura de diversos minerais do solo, em formas indisponíveis às plantas a não ser que ocorra a dissolução destes minerais. Na realidade, minerais como a dolomita e a calcita, que fazem parte da constituição do calcário agrícola, e a apatita, que é utilizada como fosfato natural, são as maiores fontes de cálcio e magnésio do solo através do manejo da calagem e da adubação. Em decorrência da maior parte dos solos deficientes em cálcio e magnésio também ser ácida, a prática da calagem pode adicionar esses nutrientes de modo eficiente para suprir a necessidade das plantas por vários anos. Assim, um correto manejo da calagem do

solo deve proporcionar condições adequadas para a disponibilidade desses elementos. De qualquer forma, a Tabela 16 apresenta a interpretação dos resultados da análise de cálcio e magnésio, sendo que se pode recomendar a adição de algum material contendo esses elementos nos casos em que a calagem for dispensada e os teores no solo estiverem no nível Baixo.

INTERPRETAÇÃO	LEGUMINOSA (SOJA)	GRAMÍNEA (MILHO)
	---- cmol _c /dm ³ ----	
Baixo	≤ 2,0	≤ 0,5
Médio	2,4 – 4,0	0,6 – 1,0
Alto	> 4,0	> 1,0

Tabela 16: Interpretação dos teores de cálcio e magnésio trocáveis do solo.

Tanto o calcário calcítico, como o magnesiano e o dolomítico, são fontes excelentes, variando apenas nas concentrações de cálcio e magnésio. No Brasil, são bastante comercializados os calcários dolomíticos, que apresentam 26 a 32% de Ca e 9 a 15% de Mg, constituindo-se em excelentes fontes conjunta desses nutrientes. O superfosfato simples, que contém 50% de gesso (18 a 20% de Ca), e também em menor intensidade, o superfosfato triplo (12 a 14% de Ca), podem adicionar cálcio ao solo, embora as quantidades fornecidas em comparação com o calcário sejam bem menores.

ENXOFRE

Enxofre na planta

A essencialidade do enxofre para as plantas é indiscutível, pela presença essencial dos aminoácidos sulfurados cistina, cisteína e metionina nas proteínas vegetais, nas vitaminas biotina e tiamina, na coenzima e nas proteínas Fe-S. Os sintomas de deficiência são redução da síntese de proteínas, crescimento retardado, clorose uniforme ou nas folhas mais novas e acúmulo de antocianinas. No solo, este nutriente encontra-se principalmente armazenado na forma orgânica. A manutenção de teores adequados de matéria orgânica garante o suprimento gradual de S às plantas, através da mineralização. Entretanto, o uso do solo de forma inadequada, resultando em diminuições no teor de matéria orgânica, associado ao uso de corretivos em superfície e de fertilizantes concentrados com ausência de S, e às exportações deste elemento pelas colheitas diminui a disponibilidade desse nutriente às plantas. Nesse contexto, aumenta-se a probabilidade de resposta das culturas agrícolas à adubação sulfatada.

As principais plantas cultivadas podem ser reunidas de acordo com a necessidade de enxofre em três grupos: as que necessitam de grandes quantidades para o seu desenvolvimento (brássicas e liliá-

ceas); as que necessitam de nível intermédio (leguminosas, algodão e girassol); e as que apresentam baixa necessidade (gramíneas).

As brássicas, por produzirem altas quantidades de proteínas e óleos, requerem relação N/S próxima a de 7:1. No RS, a relação média entre N/S é de 5:1. Experimentos com canola (*Brassica napus* L. var. *napus*) conduzidos nos EUA evidenciaram que para ter ótimas produções de grãos e rendimento de óleo, deve ser aplicado em torno de 20 kg ha⁻¹ de S-SO₄⁻². Em solos do cerrado, a colza (*Brassica napus* L. oleifera) respondeu até a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de S-SO₄⁻². A soja tem apresentado respostas à aplicação de enxofre em latossolos altamente intemperizados do cerrado brasileiro. A aplicação de gesso agrícola (CaSO₄) proporcionou aumentos de 350 a 485 kg ha⁻¹ de grãos em diversos latossolos e de 350 kg ha⁻¹ de grãos em solos derivados de arenito. Do mesmo modo, constataram-se aumentos significativos na produção de soja com a aplicação de S como superfosfato simples onde a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de S-SO₄⁻² aumentou a produção de grãos em 846 kg ha⁻¹. Outras culturas com boa resposta a aplicação de enxofre são o feijão e o algodão. Tem-se observado resposta à aplicação de até 30 kg ha⁻¹ de S-SO₄⁻², embora houvesse experimentos de feijão e algodão onde não se observaram respostas. Várias gramíneas também respondem a aplicação de enxofre, apesar de serem classificadas como plantas que requerem baixa quantidade desse nutriente para o seu desenvolvimento. O capim colonial (Figura 19), capim gordura (*Melinis minutiflora*), o jaraguá (*Hyperrenia rufa*), a braquiaria (*Brachiaria decumbens*), a setária (*Setaria anceps*) e o *Paspalum notatum* responderam a aplicação de 20 a 40 kg ha⁻¹ de S-SO₄⁻².

A resposta ocorre principalmente em espécies com alta produção de matéria seca, em áreas com alta disponibilidade de fósforo e nitrogênio, acompanhada de baixa disponibilidade de sulfato no solo.



Figura 19: Resposta do capim colonião a aplicação de enxofre (doses da esquerda para a direita: 0, 60 e 120 / 0, 60 e 120 mg de S kg⁻¹ solo). Fonte: Martins (1997).

Enxofre no solo

A entrada de enxofre no solo pode ocorrer pelo intemperismo de minerais sulfatados, pelas águas da chuva e irrigação, pela adsorção direta do enxofre atmosférico e pelas adições de fertilizantes minerais ou orgânicos. Por outro lado, as saídas deste elemento estão relacionadas às exportações pelas culturas, à lixiviação, à erosão e à emissão de gases sulfurados.

O aporte de enxofre pela água da chuva é significativo e é maior nas proximidades dos mares e centros industriais e urbanos. A chuva pode ser considerada como um “sistema de limpeza” da atmosfera. Muitos dos elementos que atingem o solo carregado pela água da chuva são poluentes atmosféricos. Isso acontece com o enxofre, pois em situações de elevados níveis de poluição atmosférica por gases sulfurados, a chuva contém altos teores de SO_4^{2-} , associados a baixos valores de pH, caracterizando a chuva ácida. Dessa forma, a movimentação das massas de ar pode explicar a variação deste aporte de enxofre atmosférico. A média mensal da quantidade de sulfato que entra no sistema solo pela água da chuva, estimado na área do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, é de $0,8 \text{ kg ha}^{-1}$, ou $9,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Esse valor é similar à quantidade exportada por 40 sacas de soja. O valor de deposição de enxofre por via úmida obtido no Campus da UFSM é inferior a outros valores encontrados na literatura, como, por exemplo, os $39,4$ a $99,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ monitorados em Porto Alegre. Entretanto, as proximidades aos centros industriais devem permitir maiores aportes de enxofre, tendo em vista a maior quantidade de gases emitidos para a atmosfera nessas regiões.

A litosfera contém aproximadamente 0,06% de enxofre. Durante o intemperismo, muito do enxofre presente em piritas e outros sulfetos metálicos podem ser transformados em sulfato (SO_4^{2-}), sendo que este pode ser adsorvido pelos colóides do solo, perdido por lixiviação ou transformado em formas orgânicas pelos microorganismos e plantas.

O enxofre se encontra nos solos nas formas orgânica e inorgânica. A forma orgânica representa mais de 90% do enxofre total na maioria dos solos, observando-se relação positiva entre esse e os teores de carbono e de nitrogênio orgânico. A forma orgânica pode ser dividida em três frações: compostos com ligação S-O (sulfatos de ésteres), como nos sulfatos de colina, fenólicos e polissacarídeos sulfatados, que constituem aproximadamente 50% do enxofre orgânico; compostos com ligação S-C, representados pelos aminoácidos (cisteína e metionina) e enxofre inerte ou residual, que são compostos não bem conhecidos ou identificados. Os dois primeiros são os que mais contribuem indiretamente ao suprimento de enxofre às plantas.

As transformações do enxofre nos solos envolvem a mineralização daquele na forma orgânica para formas inorgânicas, a

imobilização ou conversão de enxofre inorgânico em compostos orgânicos pelos microorganismos, a produção de sulfeto (S^{2-}) pela redução de SO_4^{2-} , a formação de gases voláteis e a oxidação de S^0 elementar em outras formas reduzidas (Figura 20).

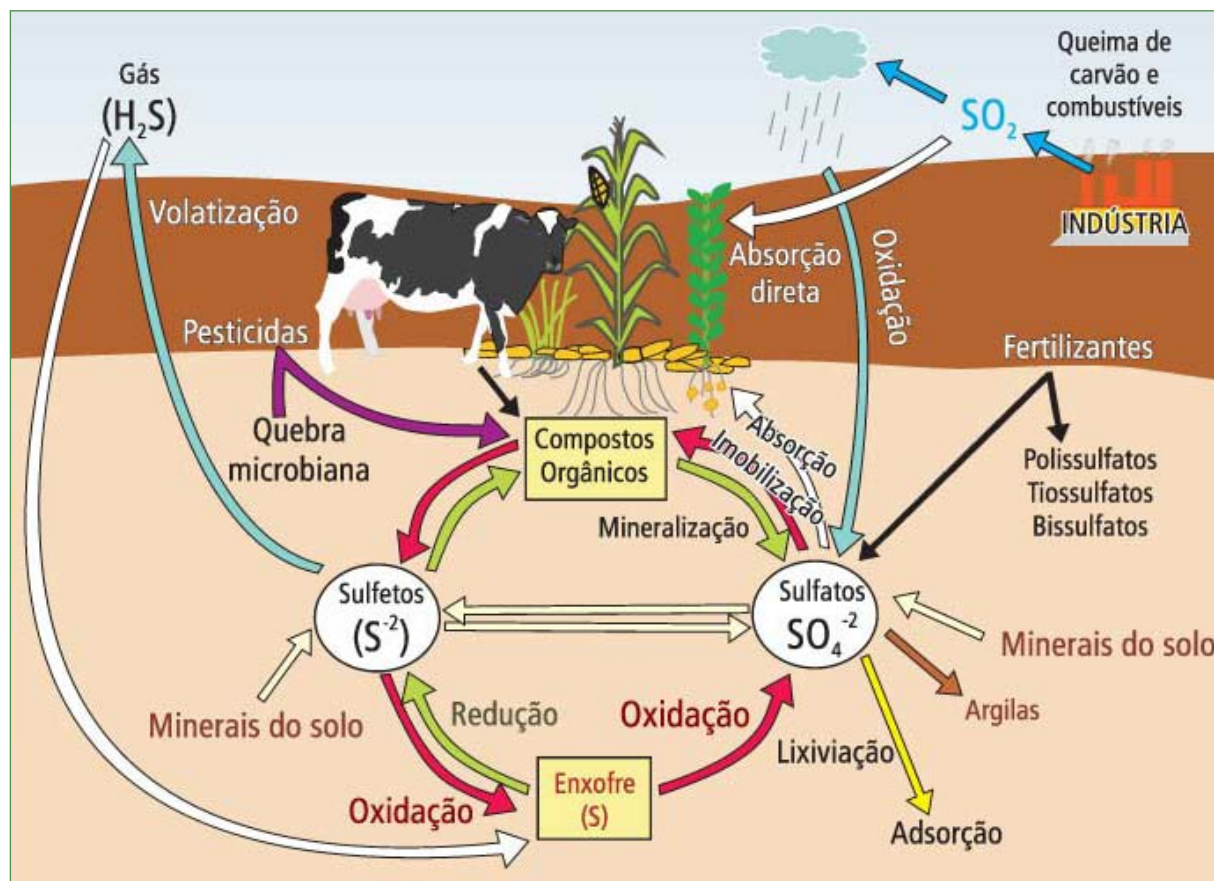


Figura 20: Extraída da apostila de Biologia do Solo

O processo de mineralização do enxofre orgânico é de grande importância à disponibilidade de SO_4^{2-} às plantas. A mineralização do enxofre orgânico nos solos é influenciada por fatores ambientais e de solo. Entre os fatores ambientais e edáficos, destacam-se a temperatura, a umidade, a aeração, o pH, a população microbiana e as formas predominantes de enxofre orgânico. Os fatores ambientais afetam a população e a atividade microbiana e esta influencia na mineralização, pois os microorganismos utilizam a matéria orgânica como substrato para seu crescimento e, se sobrar enxofre do seu metabolismo, disponibilizam-no às culturas. A mineralização é mais intensa na rizosfera, detritosfera, porosfera, dritosfera e agregatosfera, pois há maior atividade microbiana e maior quantidades de substâncias passíveis de serem aproveitadas pelos microorganismos.

O enxofre inorgânico é encontrado nos solos como SO_4^{2-} , na solução ou adsorvido na superfície dos colóides inorgânicos. Há, embora em baixíssimas concentrações, formas reduzidas como di-

óxido de S (SO_2), sulfito (SO_3^{-2}), tiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$), S elementar (S) e sulfeto (S^{-2}). Em solos bem drenados, as formas reduzidas são facilmente oxidadas a SO_4^{-2} . O SO_4^{-2} pode formar, com os grupos funcionais dos colóides inorgânicos, complexos de esfera externa e, principalmente, complexos de esfera interna, sendo que a sua adsorção aos grupos funcionais é muito menos energética do que a reação com o ânion fosfato, mas a energia é superior a do ânion nitrato. Os principais colóides adsorventes de SO_4^{-2} são os óxidos de ferro, sendo que a adsorção pode ocorrer, também, nos óxidos de Al e argilominerais 1:1, sendo em argilominerais 2:1 a adsorção quase desprezível, comparativamente aos óxidos. Como esses minerais estão presentes na fração argila do solo, há alta correlação do teor de enxofre total ou de sulfato com o teor de argila, uma vez que os solos argilosos comportam maior teor de matéria orgânica.

A adsorção de SO_4^{-2} nos grupos funcionais dos colóides inorgânicos é dependente do pH do solo. À medida que aumenta o pH, aumenta a dissociação de H^+ dos grupos funcionais e, consequentemente, aumenta a energia de ligação do oxigênio com o metal, dificultando a troca com o SO_4^{-2} . Desse modo, mais SO_4^{-2} permanece livre na solução do solo e maior é a labilidade daquele adsorvido. O SO_4^{-2} livre na solução do solo pode ser lixiviado para os horizontes subsuperficiais, o que pode significar perda caso ocorram altas precipitações pluviométricas.

DIAGNÓSTICO DA DISPONIBILIDADE DE ENXOFRE

A disponibilidade de nutrientes às plantas é geralmente estimada por extratores químicos, cujo princípio é de apenas haver correlação entre um valor extraído e uma probabilidade de produtividade. No caso do enxofre, os extratores são classificados, conforme as formas do elemento que são removidas, em três grupos. Os extratores do primeiro grupo extraem enxofre na forma de SO_4^{-2} da solução do solo. Alguns destes são CaCl_2 , NaCl , LiCl , HCl e a própria água fria. O segundo grupo compreende os extratores de SO_4^{-2} da solução do solo mais àquele adsorvido aos colóides inorgânicos do solo. O terceiro, além das duas formas anteriores, extrai parte do enxofre orgânico. Os extratores do segundo e terceiro grupo de maior destaque são $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)$, NH_4OAc e $\text{NH}_4\text{OAc}+\text{HOAc}$. Estes apresentam melhores correlações como o enxofre absorvido em solos de maior poder tampão. O método de extração de S através da resina trocadora de ânions apresenta a possibilidade de extrair formas prontamente solúveis de SO_4^{-2} e as adsorvidas e precipitadas, mas que podem passar para a solução.

A Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos Estados do RS e SC (2004) preconiza a extração de enxofre com utilização de solução de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)$ 500 mg L^{-1} de P, seguida da determinação

por turbidimetria com cloreto de bário, após a digestão do extrato com ácido perclórico. A interpretação dos resultados da análise encontra-se na Tabela 17.

CLASSE DE DISPONIBILIDADE	LEGUMINOSAS, BRÁSSICAS E LILIÁCEAS	OUTRAS PLANTAS
	---- mg/dm ³ ----	
Baixa	< 5,0	< 2,0
Média	5,0 – 10,0	2,0 – 5,0
Alta	> 10	> 5,0

Tabela 17: Interpretação do resultado da análise de enxofre com solução de Ca(H₂PO₄) 500 mg L⁻¹ de P.

Esses valores precisam ser melhores checados para as diferentes culturas e tipos de solo, a fim de aumentar a confiabilidade na tomada de decisão em aplicar ou não fertilizante sulfatado e, caso haja necessidade, qual a dose a ser utilizada.

Alguns estudos realizados no RS com diferentes solos mostram que culturas cultivadas em solos com baixos teores de matéria orgânica e argila (Tabela 18) apresentam maiores possibilidades de apresentarem resposta a aplicação de fertilizantes sulfatados.

REGIÃO AGROECOLÓGICA	NÚMERO TOTAL DE AMOSTRAS	PERCENTUAL	TEOR DE S-SO ₄ ⁻² (mg/kg)				
			< 2,0	2,1 – 5,0	5,1 – 10	10 – 20	> 20
			---- % ----				
Alto Vale do Uruguai	8.171	9,1	0,7	12,4	39,2	35,7	12,2
Campanha	2.586	2,9	0,2	9,3	45,1	38,6	7,0
Depressão Central	6.084	6,8	2,6	13,9	43,1	32,6	7,8
Encosta Inferior da Serra do Nordeste	2.323	2,6	5,7	18,7	34,4	27,9	13,3
Litoral	1.608	1,8	0,1	9,1	45,2	38,2	7,5
Missionária de São Luiz Gonzaga	5.805	6,4	0,3	9,8	41,2	36,2	12,5
Planalto Médio	45.852	50,9	0,9	12,3	35,7	38,9	12,1
Planalto Superior	8.009	8,9	0,5	6,3	21,3	43,2	28,7
Grandes Lagos	1.730	1,9	0,7	7,4	46,4	39,1	6,5
São Borja – Itaqui	1.402	1,6	0,1	8,0	43,6	38,9	9,4
Serra do Nordeste	6.185	6,9	0,1	8,0	41,4	38,7	11,9
Serra do Sudoeste	337	0,4	2,4	17,8	43,0	31,8	5,0
ESTADO	90.092	100,0	1,0	11,3	36,7	38,1	12,9

Tabela 18: Disponibilidade de sulfato em solos do Estado do Rio Grande do Sul.

Fonte: Alvarez (2004).

A análise do tecido das plantas é outra ferramenta útil na predição da disponibilidade de enxofre na planta para que se obtenha

uma boa produtividade. A concentração de enxofre na totalidade do material vegetal ou de partes específicas desta permite diagnosticar o estado do elemento na planta, onde o teor crítico dependerá principalmente da espécie. Para a boa predição do estado nutricional da planta, geralmente se recomenda a amostragem no momento de maior demanda desta pelo nutriente. O estágio de início de floração geralmente é o mais recomendado para observar o estado nutricional da planta. Por outro lado, para observar a quantidade de nutrientes exportada pela cultura é importante analisar o teor do elemento no grão, caso sejam culturas comerciais, ou da planta inteira, no caso de culturas para uso na alimentação de animais ou silagens de forrageiras. Alguns estudos permitiram estabelecer o teor crítico de enxofre dentro da planta. Para culturas não exigentes, exigências médias e exigentes são de aproximadamente 0,10–0,15%, 0,15–0,25% e 0,25–1,25% respectivamente. Acima desses valores, a probabilidade de resposta das plantas a adição de enxofre é pouco provável.

Quando houver a necessidade de aplicar enxofre no solo, o gesso agrícola é a fonte mais barata (às vezes é gratuita). A aplicação pode ser feita na superfície do solo, sem a necessidade de incorporação (não há volatilização e o sulfato migra no perfil do solo). Justifica-se até a aplicação em cobertura, a semelhança a adubação nitrogenada. Tomar cuidado, pois há oferta de fertilizantes nitrogenados portadores de enxofre que, nos preços praticados atualmente são muito caros e não compensariam o valor pago pelo enxofre adicionado. Esse é o caso dos sulfatos nitrogenados. A melhor prática para melhorar a disponibilidade de enxofre é o correto manejo do solo para manter e até aumentar o estoque de matéria orgânica deste. A reciclagem de todo e qualquer material orgânico na propriedade é obrigatória e diminui drasticamente a deficiência de enxofre às culturas. Lembrar também que o superfosfato simples também contém sulfato, mas é mais caro do que outras formas de fosfato e antes de tomar a decisão de adquiri-lo deve ser considerada a real resposta das plantas ao enxofre.

CAPÍTULO 5 – BIOGEOQUÍMICA DOS DEMAIS NUTRIENTES ESSENCIAIS

Nesse capítulo, apresentaremos de forma simplificada os principais aspectos relacionados à essencialidade, aos fatores que afetam a biodisponibilidade e às alternativas de manejo para que as plantas sejam bem nutridas em nutrientes exigidos em pequenas quantidades (micronutrientes). O capítulo terá três subcapítulos: (a) Por que são denominados de micronutrientes?; (b) Fatores que afetam a disponibilidade dos micronutrientes; e (c) Descrição resumida da biogeoquímica, diagnóstico da disponibilidade e formas de correção das deficiências.

5.1. POR QUE SÃO DENOMINADOS DE MICRONUTRIENTES?

As plantas necessitam para o seu pleno crescimento e desenvolvimento dezessete elementos químicos. Todas as substâncias orgânicas e todos os processos enzimáticos são formados ou são funcionais somente quando a planta tiver acesso a esses elementos químicos, denominados essenciais ou nutrientes. A fim de facilitar o estudo deles é que os classificamos, assim como temos o hábito de tudo classificar, separar, caracterizar e assim por diante. A classificação mais simplista e apenas com critério quantitativo (Tabela 19) é aquela que separa os nutrientes em quatro grupos:

- Primeiro Grupo – Estruturais: C, O e H.
- Segundo Grupo – Macronutrientes Primários: N, P e K.
- Terceiro Grupo – Macronutrientes Secundários: Ca, Mg e S.
- Quarto Grupo – Micronutrientes: Zn, Cu, Mn, Fe, Ni, B, Cl e Mo.

NUTRIENTE	TEOR NO TECIDO (mg kg ⁻¹)	NÚMERO DE ÁTOMOS
MICRONUTRIENTES		
Molibdênio	0,1	1
Níquel	0,05	1
Cobre	6	100
Zinco	20	300
Manganês	50	1.000
Ferro	100	2.000
Boro	20	2.000
Cloro	100	3.000
MACRONUTRIENTES		
Enxofre	1.000	30.000
Fósforo	2.000	60.000
Magnésio	2.000	80.000
Cálcio	5.000	125.000
Potássio	10.000	250.000
Nitrogênio	15.000	1.000.000
ESTRUTURAIS		
Oxigênio	450.000	30.000.000
Carbono	450.000	40.000.000
Hidrogênio	60.000	60.000.000

Tabela 19: Teores médios de nutrientes encontrados em tecidos de plantas e a quantidade de átomos em relação ao molibdênio

A forma mais correta de classificação dos nutrientes é aquela que leva em conta os processos fisiológicos aos quais eles estão envolvidos, como já apresentada na Unidade A (para maiores detalhes, revise o conteúdo da Unidade A). Essa classificação fisiológica não é a habitualmente usada no ensino de graduação até

porque geralmente os estudantes têm grandes deficiências em Bioquímica e Fisiologia de Plantas.

A tabela 19 evidencia a diferença nas quantidades exigidas pelas plantas superiores para ter seu crescimento e desenvolvimento adequados. Significa que, para cada átomo de molibdênio que a planta necessita, ela tem que ter disponível 30 mil átomos de enxofre, um milhão de átomos de nitrogênio e 60 milhões de átomos de hidrogênio. Desse modo, aqueles nutrientes que são normalmente encontrados no tecido das plantas na escala de mg kg^{-1} (0,1 a 100 mg kg^{-1}) são ditos micronutrientes, enquanto que aqueles encontrados na escala de g kg^{-1} (1 a 15 g kg^{-1}) são chamados de macronutrientes. No entanto, convém lembrá-los de que os micronutrientes são tão importantes para a nutrição das plantas quanto os macronutrientes primários e secundários, embora as plantas, em geral, não necessitem deles em grandes quantidades. A falta de qualquer um deles no solo pode limitar o crescimento das plantas, mesmo quando todos os outros nutrientes essenciais estão presentes em quantidades adequadas.

A essencialidade dos micronutrientes tem sido confirmada há muito tempo, com exceção do níquel que somente nos meados do século passado foi comprovada sua funcionalidade na planta. De um modo simplificado, e a fim de introduzir o estudo individual dos micronutrientes, a tabela 20 apresenta as principais funções dos micronutrientes.

MICRONUTRIENTE	PRINCIPAIS FUNÇÕES
Fe, Mn, Cu e Ni	Constituintes de enzimas (metalloproteínas)
B e Zn	Constituintes da parede celular e membranas.
Mn e Zn	Ativação de enzimas.
Fe, Cu, Mn, e (Cl)	Envolvidos no transporte de elétrons na fotossíntese.
Mn, Zn e Mo	Envolvidos na tolerância a estresse.
Cu, Mn, Zn e B	Envolvidos no crescimento reprodutivo (indução ao florescimento, polinização e estabelecimento do fruto).

Tabela 20: Principais funções dos micronutrientes nas plantas

A necessidade de micronutrientes é conhecida há muitos anos, mas o seu uso em fertilizantes é relativamente pouco frequente. A principal razão é que a disponibilidade no solo é normalmente maior que a exigência da maioria das culturas. Dessa forma, é difícil prever a correta disponibilidade do nutriente no solo e são raras as culturas que exigem aplicação para melhorar seus rendimentos. Entre as culturas comerciais, as destinadas à produção de hortaliças e tubérculos e de frutos podem requerer aplicação de micronutrientes, pela grande extração de nutrientes em ciclos relativamente curtos no caso das hortaliças e tubérculos e a qualidade/aspecto visual no caso dos frutos.

5.2. FATORES QUE AFETAM A DISPONIBILIDADE DOS MICRONUTRIENTES

As quantidades de micronutrientes presentes num solo e as suas disponibilidades dependem de vários fatores e, principalmente, da interação entre eles. A fim de facilitar o aprendizado, será feita breve descrição de como os principais fatores afetam os micronutrientes em geral, sem entrar em detalhes nas especificidades de cada nutriente. Desse modo, o material de origem, o grau de evolução do solo, o teor de argila, o teor de matéria orgânica, a acidez do solo (em especial a acidez ativa ou pH) e o potencial redox (Eh) do solo são os mais importantes.

Todos os micronutrientes são originários das rochas. Com exceção do cloro, todos os demais têm quantidades desprezíveis na atmosfera e os ciclos biogeoquímicos ficam mais simplificados. Então, o principal fator que condiciona o teor total de micronutriente presente no solo é o seu material de origem. Solos originários de material de origem cujo resfriamento foi lento (basalto) ou pela sedimentação de partículas finas (siltitos e folhelhos) terão maiores teores do que solos originários de granitos e arenitos, por exemplo. Minerais como a *olivina* e o *piroxênio*, abundantes no basalto, são fontes primordiais de ferro, cobre, zinco, manganês e molibdênio. Por outro lado, o quartzo fornece somente silício que não é um elemento essencial e o feldspato é fonte de cobre. Logicamente que podem ocorrer alguns minerais extremamente específicos em cada tipo de rocha e fornecer altos teores de um micronutriente a um referido solo. Mesmo que não seja elemento essencial às plantas, mas muito importante para a saúde animal, o selênio é um elemento que somente é encontrado em quantidades consideráveis em solos cujo material de origem contenha os minerais *clausthalite* (PbSe) ou *berzelianite* (CuSe), encontrado em maiores quantidades em rochas sedimentares do que em rochas ígneas ou metamórficas.

À medida que o solo vai envelhecendo, mais intemperizado, ocorrem transferências de elementos químicos do solo aos mananciais aquáticos. Lembrem-se de que o solo é aberto e a ação do intemperismo visa diminuir a energia livre, principalmente, pelo aumento da desordem do sistema (entropia). Dessa maneira, os minerais primários (portadores natos dos micronutrientes no solo), ao serem destruídos pela ação de agentes químicos, físicos e biológicos e condicionados pelos fatores de formação do solo, liberam os nutrientes à solução do solo. A maioria dos micronutrientes permanece no solo, exceto o cloro que parte com facilidade rumo ao mar, mas sempre haverá perdas. Como consequência, à medida que o solo envelhece, ele se empobrece em teor total de micronutrientes. Solos jovens (Vertissolos, Nitossolos, etc) sempre terão maiores quantidades de micronutrientes que solos velhos (Latosolos).

Partindo-se do fato que o quartzo é composto somente por silício e oxigênio, podendo ter muitíssima contaminação por outros elementos químicos, e por ser um mineral grande e extremamente resistente ao intemperismo, solos originários de material de origem ricos nesse mineral terão partículas de tamanho grande (areia) e muito pobres em partículas finas (argila). Por outro lado, solos originários de minerais que se transformam rapidamente e podem originar solos com grandes quantidades de partículas finas. Lembrem-se, caros estudantes, de que as partículas reativas são exatamente as mais finas (tamanho coloidal). A presença de partículas de tamanho coloidal (argilominerais, óxidos e matéria orgânica) retém os micronutrientes, quer na sua própria estrutura, quer adsorvido aos seus grupos funcionais. Logicamente que haverá baixa disponibilidade de micronutrientes em solos arenosos e, geralmente, os solos argilosos contêm quantidades suficientes de todos os micronutrientes.

Similarmente ao apresentado para o teor de argila, solos ricos em matéria orgânica armazenam maiores quantidades de micronutrientes do que solos pobres. Convém ressaltar que não há solos arenosos com altos teores de matéria orgânica. Há relação direta entre teor de argila e quantidade de matéria orgânica que ele pode possuir, pois o acúmulo de matéria orgânica do solo ocorre se ela for protegida da decomposição microbiana. A maneira natural de proteger a matéria orgânica do solo é a reação dela com os argilominerais e óxidos. Dessa forma, solos que têm elevados teores de matéria orgânica devem fornecer quantidades suficientes de todos os micronutrientes às plantas. A matéria orgânica armazena micronutrientes de duas maneiras: (a) o micronutriente fazendo parte de sua estrutura, como é o caso do boro e também do zinco, ferro, cobre e níquel. Para que esses nutrientes sejam disponibilizados às plantas, há necessidade de decomposição da matéria orgânica pela ação dos microrganismos; (b) o micronutriente é adsorvido aos grupos funcionais, onde todos os micronutrientes catiônicos são beneficiados. Nesse caso, não há necessidade de destruição da matéria orgânica para que esses micronutrientes sejam absorvidos pelas plantas. A saída delas dos grupos funcionais se dá por equilíbrio químico. A planta absorve aquele que está na solução do solo e aquele que estava adsorvido se desorve para repor a solução do solo. Os micronutrientes aniônicos (cloro, molibdênio e boro) não são adsorvidos à matéria orgânica. A matéria orgânica tem altíssima afinidade com o cobre e menor afinidade com os demais micronutrientes catiônicos. Assim, um dos primeiros micronutrientes a faltar às plantas, quando o teor de matéria orgânica é baixo, é o cobre. Por outro lado, em solos muito ricos em matéria orgânica, o cobre pode estar tão fortemente adsorvido que a planta sofre por deficiência.

Mudanças nas condições geoquímicas da solução do solo não afetam a quantidade total de micronutrientes presentes no solo, mas praticamente controlam as suas disponibilidades. As principais variáveis que controlam a disponibilidade são a acidez ativa (pH do solo) e o potencial redox (Eh). À medida que a quantidade de prótons da solução do solo aumenta (baixando pH) ou diminui (pH aumenta), alteram-se as reações químicas dos micronutrientes dentro da solução do solo e da reação deles com a fase sólida do solo.

Quando há grande oferta de OH^- na solução do solo (pH alto: solos jovens ou que receberam calagem), os cátions metálicos (Zn^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} e Ni^{2+}) reagem com os OH^- formando precipitados insolúveis e, portanto, deixam de ser disponíveis às plantas.

Zn^{2+} (zinco disponível) + $2\text{OH}^- \longleftrightarrow \text{Zn}(\text{OH})_2$ (precipitado – zinco não disponível).

Essa reação é idêntica àquela que vocês estudaram para o alumínio. A dissociação do calcário gera a produção de OH^- que reage com o Al^{3+} , neutralizando-o. Desse modo, em solos com pH baixo (alta acidez ativa) a reação é dificultada e os micronutrientes metálicos ficam muito mais disponíveis. Em média, diz-se que para cada unidade de pH do solo que se aumente, diminui em 10 vezes a disponibilidade desses nutrientes.

Quando o solo é acidificado (baixo pH), os prótons da solução do solo reagem com os grupos funcionais, diminuindo as cargas elétricas negativas (argilominerais, óxidos e matéria orgânica). Com menor quantidade de cargas elétricas negativas, menor será a quantidade de cátions adsorvido (inclusive os micronutrientes catiônicos) e maior será a sua disponibilidade. Isso porque eles ficarão mais na solução do solo e menor será a energia de ligação daquele que está adsorvido às poucas cargas negativas. Obviamente que nessa condição haverá fortíssima adsorção do ânion MoO_4^{2-} , que é um micronutriente aniônico.

Resumidamente, a disponibilidade dos micronutrientes em relação à variação do pH do solo pode ser visualizada na figura abaixo.

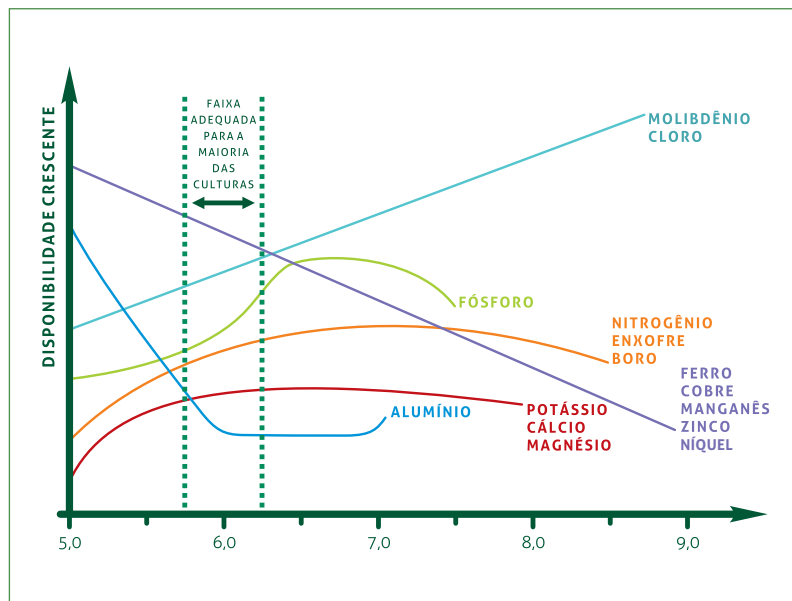


Figura 21: Alteração da disponibilidade de micronutrientes em função do pH do solo.

Alguns micronutrientes podem facilmente ganhar ou perder elétrons e, até por apresentar essa propriedade é que eles são fundamentais nos processos biológicos. Dentro dos organismos vivos, praticamente todos os micronutrientes tem essa capacidade (Fe, Mn, Zn, Ni, Cu e Mo), mas, nas condições de solo, apenas o ferro e o manganês sofrem reações de oxi-redução em nível de afetar suas disponibilidades. No solo, a fonte principal de elétrons é a matéria orgânica. Os elétrons oriundos da fotólise da água ($H_2O + \text{energia luminosa} \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + e^-$) na fase inicial da fotossíntese são usados para efetivar as ligações entre os átomos de carbono (oriundos do CO_2) e entre o carbono e outros heteroátomos (N, O, S e P, principalmente). Então, a decomposição da matéria orgânica liberará o carbono na forma de gás carbônico, a energia na forma de calor e os elétrons, os quais são captados pelo oxigênio, regenerando a molécula de água. Essa é a única função do oxigênio nos seres vivos: evitar a intoxicação dos organismos pelos elétrons! Caso haja pouco ou nenhum oxigênio no meio, assim mesmo haverá microrganismo capaz de viver. Para tal, eles se livram dos elétrons entregando-os a outros aceptores. Há microrganismos que os entregam a compostos orgânicos (transformação do vinho em vinagre, por exemplo) e muitos outros que entregam a outros elementos químicos. Entre os elementos químicos que podem receber facilmente esses elétrons estão o nitrogênio (quando na forma de NO_3^-), o Mn^{+4} e o Fe^{+3} . Esses dois últimos estão oxidados e, portanto, estão na forma de um óxido (mineral) e, assim, não são disponíveis às plantas. Quando esses dois micronutrientes recebem elétrons (da decomposição microbiana das substâncias orgânicas na ausência de oxigênio), eles se reduzem a Mn^{+2} e Fe^{+2} , totalmente disponíveis.

veis. Em conclusão, sempre que houver ausência de oxigênio no solo (provocado pelo excesso de umidade ou alagamento do solo), ocorrerá a redução dos óxidos de manganês e de ferro e a disponibilidade desses dois nutrientes é enormemente aumentada. O arroz irrigado por inundação pode sofrer por toxidez de ferro em função desse processo de redução. Mesmo em solos de sequeiro, como os do Planalto do Rio Grande do Sul, em épocas chuvosas, haverá microsítios no solo (dentro de microagregados) em que a difusão do oxigênio é baixa e haverá condições para que esses dois micronutrientes sejam reduzidos e, portanto, tornem-se disponíveis às plantas. É comum ocorrer toxidez de manganês na soja em locais baixos (várzeas) e em anos chuvosos (solo permanece encharcado por vários dias). O sintoma é de fácil reconhecimento, pois as folhas começam a amarelar e caem.

Finalmente, as plantas têm exigências diferentes em cada micronutriente. Isso, portanto, também afeta o conceito de 'disponibilidade'. De modo geral, as gramíneas são muito exigentes em zinco; as brássicas (couve-flor, brócolis e repolho), o girassol e a videira em boro; a soja e outras leguminosas em molibdênio; os citrus em zinco e cobre; a erva-mate tem dificuldade tremenda em absorver ferro (não se pode usar calcário); entre outros. No entanto, mais importante do que o tipo de planta é a relação entre o que tem disponível no solo e a produtividade da planta. Por exemplo, na produção de 12 toneladas de grãos de milho são necessários muito mais molibdênio do que na produção de 4 toneladas de soja. A exigência da planta é apenas um indicativo para dar mais ênfase à disponibilidade daqueles micronutrientes exigidos em maior quantidade. Não há recomendação prévia de um dado micronutriente simplesmente por causa da planta que será cultivada.

5.3. DESCRIÇÃO DA BIOGEOQUÍMICA, DIAGNÓSTICO DA DISPONIBILIDADE E FORMAS DE CORREÇÃO DAS DEFICIÊNCIAS

A biogeoquímica dos micronutrientes catiônicos (Mn^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} e Zn^{2+}) é muito similar. Vocês perceberão que os cinco micronutrientes catiônicos encontram-se no centro da tabela periódica (metais de transição) (<http://www.tabela.oxigenio.com>). Eles pertencem a quarta série e têm a configuração eletrônica da última camada como segue: Mn ($s^2 d^5$), Fe ($s^2 d^6$), Ni ($s^2 d^7$), Cu ($s^2 d^9$) e Zn ($s^2 d^{10}$). Todos eles são divalentes e sua capacidade de ligação muito superior comparativamente aos outros cátions divalentes, como é o caso do cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}). Todos eles estão à procura de átomos como o oxigênio e enxofre para se ligarem. Isso significa que o cobre é o mais adsorvido pelos grupos funcionais (em especial aqueles da matéria orgânica), seguido pelo zinco, níquel, ferro e por último o manganês.

Por outro lado, as biogeoquímicas dos micronutrientes aniônicos são muito diferentes (Cl^- , MoO_4^{2-} e H_3BO_3). O cloro pertence ao grupo 7A da tabela periódica e, portanto, ele forma pares iônicos com cátions presentes na solução do solo e faz ligações muito fracas com as cargas positivas do solo. Por outro lado, mesmo que o molibdênio seja um metal de transição, em função de sua configuração eletrônica ser s^1d^5 , ele tem altíssima reatividade com o oxigênio e por isso é que ele ocorre na forma dos ânions estáveis MoO_4^{2-} ou HMoO_4^- . O boro é um não metal (grupo 3A), pertence aos elementos ditos normais (não é de transição) e sua configuração eletrônica é, portanto, s^2p^1 . Ele também tem alta estabilidade quando unido ao oxigênio formando o ácido bórico (H_3BO_3), mas embora tenha aparente neutralidade, ele tem comportamento de um ânion.

Zinco

O zinco é absorvido pelas raízes das plantas na forma de Zn^{2+} ou em muito menor quantidade na forma de complexos solúveis e carregados positivamente. Em função de sua alta afinidade por grupos funcionais orgânicos, ele pode ser retido nas raízes e não ser transportado à parte aérea. Há casos de que a adição de altas doses de fosfato acentua a deficiência de zinco, justamente por promover a sua retenção nas raízes (reação do zinco com o fosfato nas raízes). Entre os processos que o zinco participa na planta, destacam-se: (a) a produção do triptofano que é um precursor do ácido indolacético (hormônio de crescimento) e (b) a remoção de radicais superóxido (O_2^-) por participar das enzimas superóxido desmutase e catalase. Caso haja deficiência de zinco, acumula-se o superóxido provocando a degradação do ácido indolacético inibindo o crescimento das brotações (Figura 22). Também ocorrerá o vazamento do conteúdo citoplasmático da célula, sendo visualizado clorose e necrose nas folhas (www.malavolta.com.br).

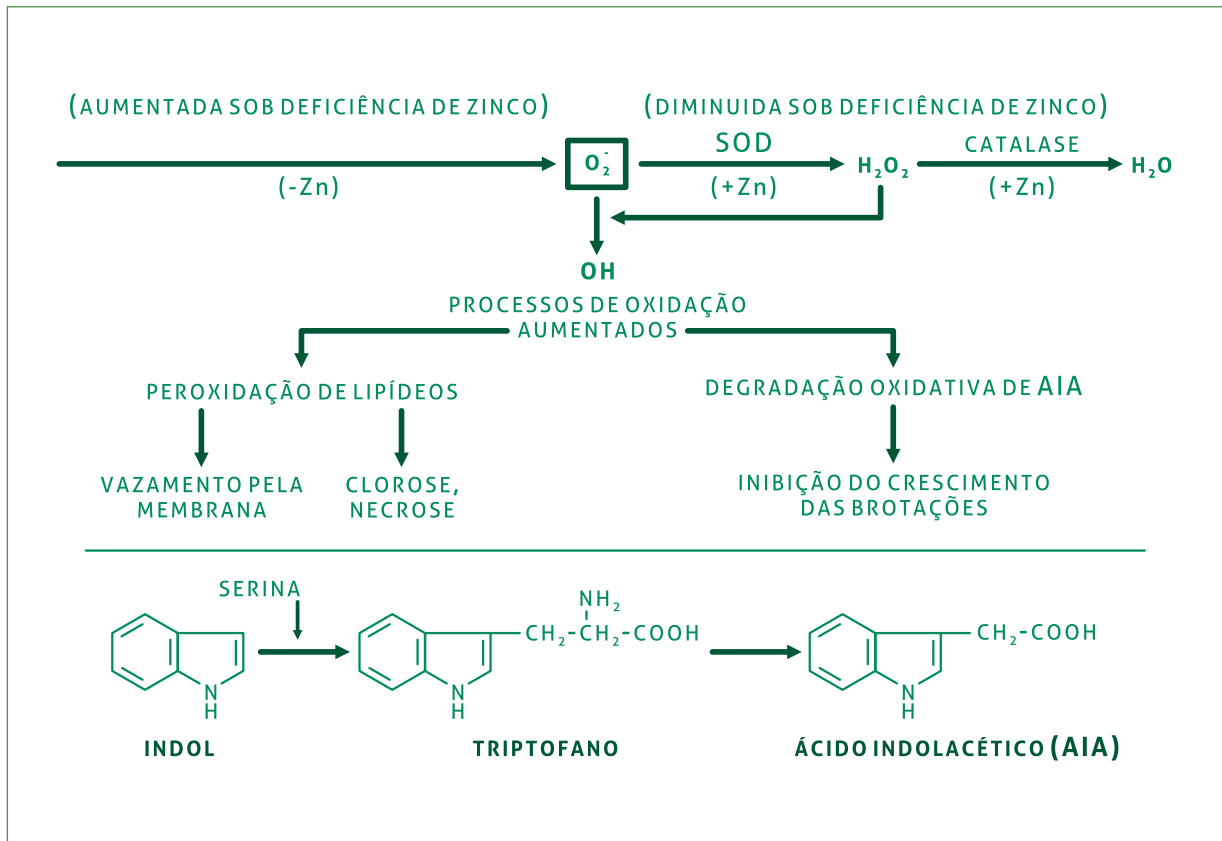


Figura 22: Participação do micronutriente zinco processos fisiológicos das plantas.

A principal fonte de zinco do solo é o mineral *esfalerita* (ZnS). Nos solos de regiões subtropicais e tropicais não há mais esse mineral e praticamente todo o zinco está adsorvido às partículas de tamanho coloidal. Também, quando se eleva o pH do solo pela aplicação de corretivos de acidez do solo, o zinco pode se precipitar na forma de óxido (ZnO). Entre os fatores que controlam a disponibilidade às plantas, em primeiro lugar vem o pH, seguido pelo teor e tipo de óxidos, teor e tipo de argila, teor de matéria orgânica e disponibilidade de fósforo (zinco e fósforo são muito reativos entre si).

Desse modo, solos muito arenosos, solos muito velhos e solos que receberam calagem excessiva podem não fornecer quantidades adequadas de zinco às plantas. Tem-se observado sintomas de deficiência de zinco em gramíneas na fase inicial de crescimento (especialmente o milho) quando cultivadas sob sistema plantio direto onde se aplicam doses desnecessárias de calcário na superfície do solo. Isso porque o pH do solo fica muito elevado ($> 6,5$) e a disponibilidade de zinco despenca violentamente (cada unidade de pH que aumenta, diminui 10 vezes a disponibilidade de zinco). À medida que o sistema radicular se aprofunda no perfil e, conseqüentemente, encontra solo com mais baixo pH, ele absorverá quantidades suficientes de zinco e os sintomas de deficiência desaparecem. Imagine se alguém tivesse aplicado zinco foliar nessa situação. Ele vai ficar empolgado pela res-

posta à aplicação de zinco, quando, na realidade, se ele não tivesse feito nada, teria o mesmo efeito, ou ainda se não tivesse exagerado no calcário, nada teria ocorrido.

Em função de ser muitíssimo rara a obtenção de respostas das culturas à aplicação de zinco, fica difícil estabelecer um teor crítico de zinco disponível. Apenas como indicativo, a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (CQFS-RS/SC) estabeleceu a seguinte classificação dos teores de zinco extraídos pelo HCl 0,1 mol L⁻¹: < 0,2 mg L⁻¹ é Baixo; 0,2 a 0,5 mg L⁻¹ é Médio; e > 0,5 mg L⁻¹ é Alto. Isso significa que, se o solo tiver mais do que 0,5 mg L⁻¹ de zinco disponível, não haverá resposta à aplicação de fertilizantes contendo esses micronutrientes. Vocês têm que procurar muito pelos cantos do Rio Grande para encontrar uma amostra de solo que tenha menos do que isso. Caso haja necessidade, existem várias fontes de zinco, especialmente os sulfatos (ZnSO₄). No Cerrado Brasileiro, já há oferta de fertilizante N-P-K + Zn, uma vez que há muitos solos deficientes nesse nutriente. Aqui no Sul do Brasil, não há necessidade desse tipo de fertilizante para a grande maioria das situações. Se falta zinco, um pouco de esterco pode resolver o problema, até porque os dejetos de suínos e aves podem conter altas concentrações de zinco e cobre. Em espécies perenes, como os citrus, quando detectada a deficiência, uma das poucas alternativas é a adição de zinco junto com as caldas de pulverização (agrotóxicos ou mesmo produtos agroecológicos contendo micronutrientes).

Cobre

O cobre é absorvido pelas raízes das plantas na forma de Cu²⁺ ou em muito menor quantidade na forma de complexos solúveis e carregados positivamente. Entre os processos que o cobre participa na planta, destacam-se a participação na transformação dos fenóis em quinonas (enzima polifenol oxidase e ascorbato oxidase) e os seus destinos finais, como a síntese da lignina (parede celular mais resistente), a produção de melaninas (ação contra fungos) e a síntese de fitoalexinas (Figura 23). Os sintomas de deficiência de cobre aparecem nas folhas mais velhas que ficam com aparência de murchas; nos cereais, as pontas das folhas ficam esbranquiçadas e enroladas; nas brássicas, os brotos terminais morrem (www.malavolta.com.br).

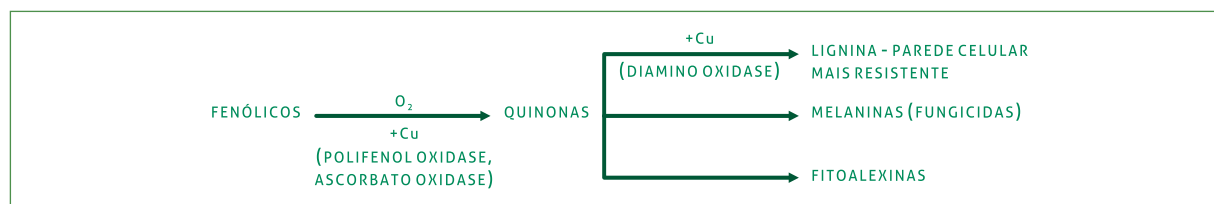


Figura 23: Participação do micronutriente cobre na formação da parede celular, produção de melaninas e fitoalexinas.

A principal fonte de cobre do solo são os minerais bornita e calcopirita. Nos solos de regiões subtropicais e tropicais, não há mais esses minerais e todo o cobre está adsorvido às partículas de tamanho coloidal, em especial na matéria orgânica do solo. Na solução do solo, praticamente 100% do cobre encontra-se complexado pelas substâncias orgânicas como o citrato, oxalato, tartarato e gluconato (todos esses compostos orgânicos são de cadeia curta e originam-se da atividade microbiana ou são exsudados pelo sistema radicular). Também, quando se eleva o pH do solo pela aplicação de corretivos de acidez do solo, o cobre pode se precipitar na forma de óxido (CuO). Entre os fatores que controlam a disponibilidade às plantas, em primeiro lugar vem o pH e o teor de matéria orgânica. Secundariamente, o teor e tipo de óxidos e argilominerais também condicionam a sua disponibilidade.

Desse modo, solos muito arenosos, solos com elevados teores de matéria orgânica (solos orgânicos) e solos que receberam calagem excessiva podem não fornecer quantidades adequadas de cobre às plantas. Tem-se observado sintomas de deficiência de cobre em citrus quando esses são cultivados em solos de baixada com elevados teores de matéria orgânica. Nas lavouras de culturas produtoras de grãos (milho, soja, trigo, etc), na produção de folhas (fumo, erva-mate, chás, etc), fibras (algodão, sisal, etc) não se tem observado ganhos de produtividade por causa da adição desse micronutriente.

Em função de ser muitíssimo rara a obtenção de respostas das culturas à aplicação de cobre, fica difícil estabelecer um teor crítico de cobre disponível. Apenas como indicativo, a CQFS-RS/SC estabeleceu a seguinte classificação dos teores de cobre extraídos pelo HCl 0,1 mol L⁻¹: < 0,2 mg L⁻¹ é Baixo; 0,2 a 0,4 mg L⁻¹ é Médio; e > 0,4 mg L⁻¹ é Alto. Isso significa que se o solo tiver mais do que 0,4 mg L⁻¹ de cobre disponível não haverá resposta à aplicação de fertilizantes contendo esses micronutrientes. Vocês têm que procurar muito pelos cantos do Rio Grande para encontrar uma amostra de solo que tenha menos do que isso. Caso haja necessidade, existem vários fontes de cobre, especialmente os sulfatos (CuSO₄). É comum a aplicação de produtos fitossanitários (agrotóxicos ou calda bordalesa) em frutíferas (principalmente em videira e figueiras) e em olerícolas e que podem, inclusive, intoxicar a planta e o solo em cobre. Se faltar cobre, um pouco de esterco deve resolver o problema, como já comentado no caso do zinco.

Ferro

O ferro é absorvido pelas raízes das plantas na forma de Fe²⁺ ou em muito menor quantidade na forma de complexos solúveis e carregados positivamente. Em função de sua alta afinidade pelo oxigênio, ele é transformado muito rapidamente em óxidos (hematita, goe-

thita, lepidocrocita, ferridrita) tornando-se indisponíveis às plantas. Entre os processos que o ferro participa na planta, sem dúvida alguma a mais importante é a síntese de clorofila (Figura 26). Também, o ferro é um micronutriente extremamente importante para o funcionamento de várias enzimas, entre as quais destaca-se o nitrato redutase (transformação e incorporação do NO_3^- absorvido pelo sistema radicular na forma reduzida e ligada ao esqueleto carbonado, como por exemplo: $\text{R-CN}_2\text{-COOH}$). O ferro está envolvido, praticamente, em todas as reações que envolvam transferência de elétrons, como em várias etapas da fotossíntese e respiração. Caso haja deficiência de ferro, ocorrerá amarelecimento das folhas (similar à falta de nitrogênio e enxofre), somente que, nas novas, mantendo-se as nervuras verdes (www.malavolta.com.br). A toxidez de ferro é muito comum em arroz irrigado por inundação pelo fato da redução do ferro e aumento intenso de sua disponibilidade, o qual será abordado com mais detalhes na próxima Unidade.

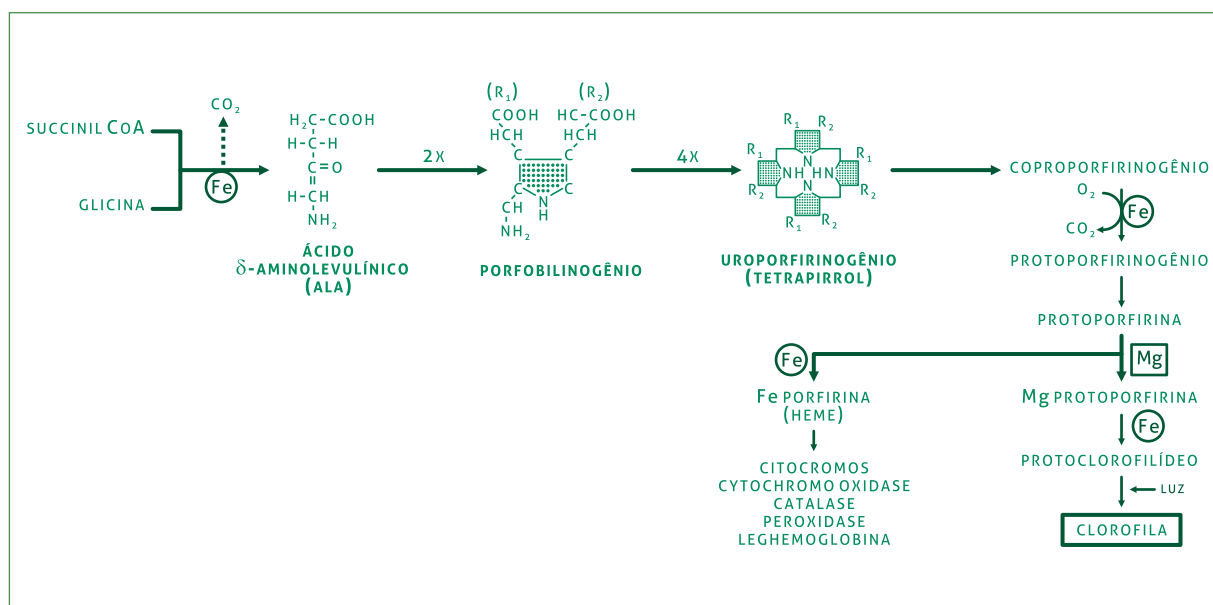


Figura 24: Envolvimento do micronutriente ferro na síntese da clorofila.

O ferro no solo é originado de diversos minerais, sendo que a maior parte dele estava na forma de ferro reduzido (Fe^{2+}) preso na estrutura e, portanto, não disponível aos organismos vivos. Há bactérias e outros microrganismos que têm habilidade de criar mecanismos (especialmente liberação de complexantes orgânicos) que conseguem retirar o ferro das estruturas cristalinas. No entanto, o mecanismo predominante de liberação do ferro dessas estruturas é o intemperismo, até porque o ferro reduzido pode facilmente doar elétrons ao oxigênio, oxidando-o e formando imediatamente um óxido (hidróxido e oxi-hidróxido). Agora, na forma de Fe^{3+} , continua não sendo disponível às plantas. Em solos tropicais e subtropicais

(velhos ou intemperizados) a quase totalidade do ferro encontra-se na forma de óxidos. Então, para que ele seja disponível (Fe^{2+}) em condições oxidadas deve haver muito baixo pH ($< 3,0$). Em solos com baixa quantidade de oxigênio, o Fe^{3+} é rapidamente reduzido a Fe^{2+} e se torna disponível às plantas. Desse modo, mesmo em solos ditos oxidados haverá regiões dentro do solo que têm pouco oxigênio e lá haverá ferro disponível às plantas.

Entre os fatores que afetam a disponibilidade, sem dúvida nenhuma a concentração de oxigênio (que pode ser associada com o valor de Eh) é o mais importante. Em solos bem oxidados, a disponibilidade de ferro é muito baixa e em solos alagados, a disponibilidade é máxima. Além disso, logicamente que o pH do solo também afeta consideravelmente a sua disponibilidade pelo fato do Fe^{2+} reagir com os OH^- da solução do solo, diminuindo sua disponibilidade, como pode ser constatado na Figura 21.

Desse modo, a deficiência de ferro ocorre muito raramente e os sintomas de deficiência aparecem em solos calcários (pH $> 7,0$) e bem oxidados. O diagnóstico da disponibilidade de ferro é muito complicado, porque é impossível de reproduzir os microsítios menos oxidados do solo onde justamente é controlada a sua disponibilidade. Mesmo assim, há métodos químicos de extração como o HCl, o oxalato de amônio, o DCB e o EDTA. Como não há deficiência, não há resposta das culturas à aplicação de fertilizantes contendo ferro, fica impossível estabelecer faixas de disponibilidade e, muito menos ainda, doses para a aplicação. O mais comum para nós aqui no Rio Grande do Sul e Santa Catarina é a toxidez de ferro na cultura do arroz (o que pode ser indicado pelo teor de $\text{Fe} > 5 \text{ g dm}^{-3}$, extraído pelo oxalato de amônio pH 3,0).

Manganês

O manganês é absorvido pelas raízes das plantas na forma de Mn^{2+} ou em muito menor quantidade na forma de complexos solúveis e carregados positivamente. Em função de sua alta afinidade pelo oxigênio, ele é transformado muito rapidamente em óxidos tornando-se indisponíveis às plantas. Os teores de óxidos de manganês no solo são muito mais baixos do que os de óxido de ferro. Eles encontram-se na forma de nódulos e não impregnam o solo com sua cor, como os de ferro. Entre os processos que o manganês participa na planta, sem dúvida alguma os mais importantes são aqueles relacionados à transferência de elétrons, como na quebra da molécula da água no início da fotossíntese (Figura 25). Além disso, esse micronutriente é necessário para a formação do cloroplasto e síntese de clorofila e é ativador metálico de várias enzimas (Descarboxilases, Hidrolases e RNA Polimerase). Caso haja deficiência de manganês, ocorrerá clorose internervural com pequenas manchas

necróticas. A clorose pode ocorrer em folhas jovens ou velhas, dependendo da espécie vegetal e da taxa de crescimento. As folhas ficam enroladas com aparência de murcha (www.malavolta.com.br).

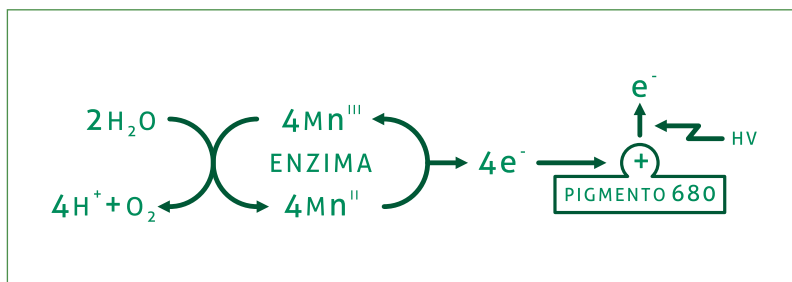


Figura 25: Participação do micronutriente manganês na fotólise da água.

Semelhantemente ao ferro, a concentração de oxigênio presente no solo é o fator que mais afeta a disponibilidade de manganês às plantas. Em solos bem oxidados, a disponibilidade de manganês é muito baixa e em solos alagados, a disponibilidade é máxima. O manganês é até mais facilmente reduzido do que o ferro. Além disso, logicamente que o pH do solo também afeta consideravelmente a sua disponibilidade pelo fato do Mn^{2+} reagir com os OH^- da solução do solo, diminuindo sua disponibilidade como pode ser constatado na Figura 21.

Desse modo, a deficiência de manganês ocorre muito raramente e os sintomas de deficiência aparecem em solos calcários ($\text{pH} > 7,0$) ou com calagem excessiva e bem oxidados. O limite entre a deficiência e a toxidez de manganês é muito tênue. Culturas como a soja podem sofrer com deficiência desse micronutriente quando o teor no solo for inferior a 5 mg dm^{-3} e sofrer por toxidez quando for maior do que 35 mg dm^{-3} . Essa faixa pode ser facilmente ultrapassada caso não seja feita uma correta correção da acidez do solo: se colocar pouco corretivo, terá mais do que 35 e se colocar excesso de calcário, terá menos do que 5. Desse modo, é fundamental o estabelecimento correto da dose de calcário e aplicar da forma correta, uma vez que ele tem pouca mobilidade no solo. O mais comum é a toxidez de manganês, especialmente, na cultura da soja quando cultivada em solos oxidicos (Latosolos), em anos chuvosos e nas áreas de baixada. No Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o manganês disponível é estimado pela extração com $\text{HCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$, a partir do qual é estabelecido pela CQFS-RS/SC a seguinte interpretação: Baixo ($< 2,5 \text{ mg dm}^{-3}$), Médio ($< 2,5 - 5,0 \text{ mg dm}^{-3}$) e Alto ($> 5 \text{ mg dm}^{-3}$). Não é comum e nem necessário fazer a correção da deficiência de manganês nos solos do RS; basta fazer uso correto dos corretivos da acidez.

Boro

O boro é absorvido pelas raízes das plantas na forma de H_3BO_3 , BO_3^{3-} e até $B_4O_7^{2-}$. Em solos de regiões tropicais e subtropicais praticamente todo o boro encontra-se na matéria orgânica do solo. Entre os processos que o boro participa na planta, sem dúvida alguma os mais importantes são aqueles relacionados à formação da parede celular (pectina, hemicelulose e precursores da lignina) e a divisão e crescimento celulares (Figura 26). Além disso, esse micronutriente atua no transporte de carboidratos e no metabolismo dos fenóis.

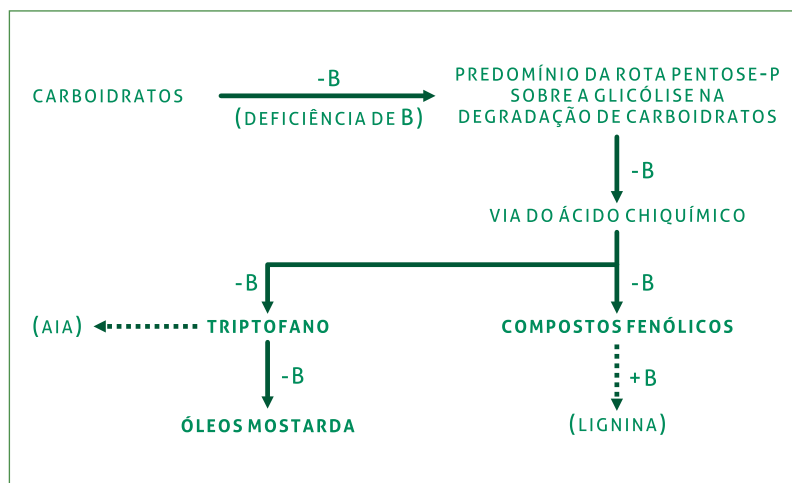


Figura 26: Participação do micronutriente boro na rota de degradação dos carboidratos, síntese da lignina e do triptofano.

Em decorrência de sua participação na construção da parede celular, quando há deficiência de boro, ocorre a inibição da atividade da enzima ATPase e absorção de nutrientes levando a retardamento do crescimento da planta. A deficiência de boro diminui a divisão celular no tubo polínico, causando aborto das flores e diminuindo o número de sementes, especialmente em plantas como o girassol, a couve-flor e a videira (www.malavolta.com.br). Também, ocorrerá acúmulo de fenóis, degradação do hormônio AIA, aumento na quantidade de óleos e formação de quinonas tóxicas às plantas podendo ser visualizadas necrose e morte dos pontos de crescimento.

O mineral primário *turmalina* é a fonte original de boro nos solos. No entanto, esse mineral é facilmente degradado durante o intemperismo. O boro liberado desse e de outros minerais é incorporado à matéria orgânica do solo. Desse modo, a disponibilidade é altamente dependente da quantidade de matéria orgânica do solo e, por conseguinte, da atividade microbiana, à semelhança ao discutido para o nitrogênio e enxofre. Também, após a liberação do boro da matéria orgânica, sua disponibilidade é controlada pelo teor e tipo de óxido, uma vez que ele é adsorvido de forma similar ao fósforo. Em conclusão, o diagnóstico da disponibilidade de boro

é extremamente complicado (mistura a problemática microbiana com os fatores de adsorção). Mesmo assim, a CQFS/RS-SC, usa a água quente como extrator e quando o teor extraído é $< 0,1 \text{ mg dm}^{-3}$ o solo é classificado como Baixo, de $0,1$ a $0,3 \text{ mg dm}^{-3}$ é considerado Médio e acima de $0,3 \text{ mg dm}^{-3}$ é Alto. Como as faixas são muito estreitas, qualquer erro na amostragem do solo ou durante a análise no laboratório, pode gerar mudança na classe de disponibilidade.

Como para qualquer outro micronutriente, às vezes é recomendada a análise foliar como complemento da análise de solo. Isso é mais importante em culturas perenes (videira, citrus, etc). A interpretação dos níveis ideais de boro nas plantas é ainda preliminar, mas geralmente valores entre 35 e 50 mg kg^{-1} de matéria seca de folhas. Caso haja necessidade de aplicação de boro, a melhor alternativa é aplicar no solo durante a semeadura ou transplante de mudas na forma de bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Também há possibilidade de aplicação foliar, como ácido bórico (H_3BO_3), embora não mais do que 1,5% do boro total aplicado seja absorvido e translocado até os órgãos das plantas deficientes.

Molibdênio

O molibdênio é absorvido pelas raízes das plantas na forma de MoO_4^{2-} ou HMoO_4^- . Em solos de regiões tropicais e subtropicais, a maior parte do molibdênio encontra-se na matéria orgânica do solo. Entre os processos que o molibdênio participa na planta, sem dúvida alguma os mais importantes são aqueles relacionados à dinâmica do nitrogênio, em especial, como constituinte das enzimas nitrogenase e redutase do nitrato (Figura 27). Desse modo, a falta desse nutriente causa deficiência de nitrogênio por limitar a fixação do gás N_2 pelos micro-organismos (em especial nas leguminosas com boa associação simbiótica) e também pela ineficácia de redução e incorporação do nitrato em esqueletos carbonados, como aminoácidos e proteínas, mesmo que a absorção do nitrogênio segue normal (www.malavolta.com.br).

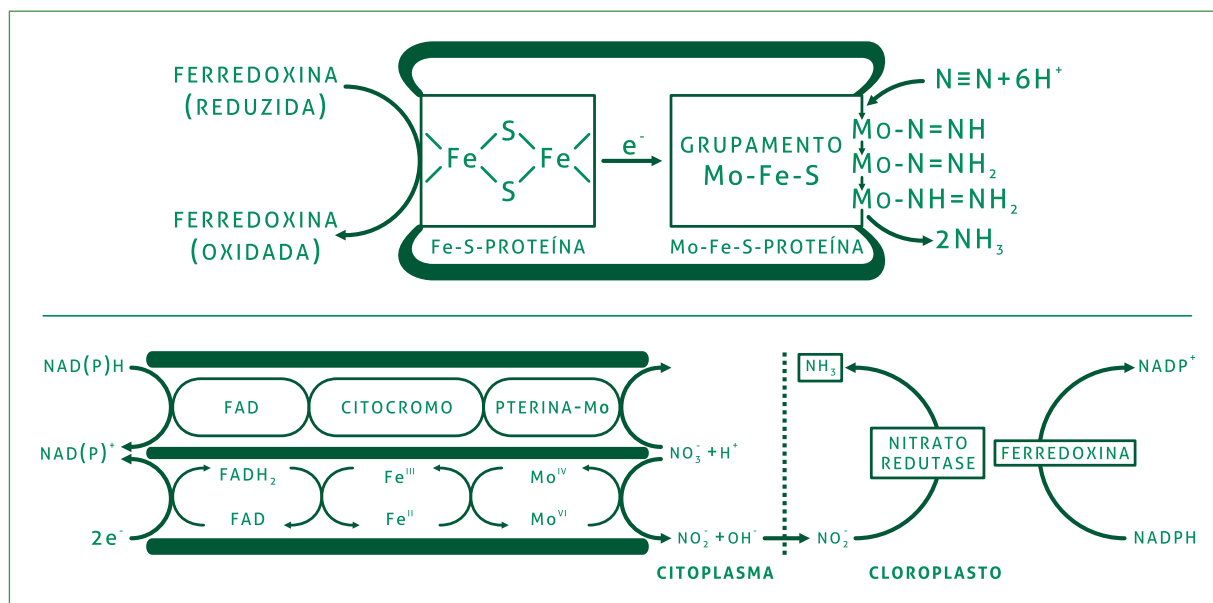


Figura 27: Participação do micronutriente molibdênio em processos envolvendo as transformações do nitrogênio nas plantas.

Os dois principais minerais fornecedores de molibdênio no solo são a *molibdenita* (MoS_2) e a *wulfenita* ($\text{Pb}(\text{MoO}_4)$). Ambos os minerais são relativamente solúveis ao ponto de não mais estarem presentes em solos tropicais e subtropicais. O molibdênio tem alta afinidade pelos grupos funcionais dos óxidos e da matéria orgânica. Por isso, sua disponibilidade é relacionada à quantidade de matéria orgânica do solo e teor e tipo de óxido.

Não há métodos confiáveis para o diagnóstico da disponibilidade de molibdênio no solo. Os valores são tão baixos que os erros de amostragem e de análises laboratoriais mascaram a real disponibilidade. Também, a maior fonte de molibdênio às plantas é aquela armazenada dentro das sementes. Sementes produzidas em solos com bons teores de matéria orgânica e valores adequados de pH para a referida cultura acumulam quantidades suficientes desse nutrientes para que a planta complete o seu ciclo sem perder produtividade.

O único caso em que há recomendação de aplicação “preventiva” de molibdênio é o cultivo de leguminosas com alta eficiência simbiótica para fixar nitrogênio em solos com pH muito baixos, menor do que 5,5 (baixa disponibilidade desse nutriente – Figura 21). O tratamento das sementes deve ser feito juntamente com a inoculação da bactéria fixadora de nitrogênio (*Rhizobium* – *Bradyrhizobium*) em quantidades entre 12 a 25 g ha^{-1} . Há possibilidade de aplicação no solo na forma de molibdato de amônio em doses que vão de 0,5 a 1,0 kg ha^{-1} .

Cloro

Embora o cloro seja um elemento essencial (nutriente), praticamente não há ambiente na crosta terrestre deficiente nesse nutriente. Contrariamente, há relatos na literatura de toxidez em plantas. A planta absorve-o da solução do solo na forma de Cl^- . O cloro é essencial para manter o potencial de cargas das membranas. Ele é o ânion acompanhante de muitos produtos químicos, em especial, os fertilizantes potássicos, cujas quantidades aplicadas para suprir as necessidades de potássio superam em muito as necessidades de cloro pelas plantas.

Tendo em vista a baixa exigência pelas plantas e sua alta disponibilidade no solo, há muito pouca informação sobre avaliação da disponibilidade e recomendação de adubação com esse nutriente para as culturas. Há culturas que não toleram grandes quantidades de cloro como é o caso do fumo. Também há muitos mitos ecológicos a respeito do cloro. Há uma confusão generalizada entre o gás Cl_2 , que realmente é tóxico, e o íon Cl^- que não possui as mesmas propriedades.

Níquel

A essencialidade no níquel foi comprovada recentemente. Ele é absorvido na forma de Ni^{2+} a partir da solução do solo. Na planta, ele atua como cofator da enzima urease, enzima responsável pela quebra de ureídeos (forma de nitrogênio sintetizado nas raízes – rizóbios e transportado à parte aérea das plantas), inclusive da ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2$). Desse modo, ele atua principalmente na mobilização de compostos nitrogenados durante a germinação de sementes. Em sementes deficientes em níquel e solos com baixo suprimento, podem ocorrer: (a) não germinação das sementes e (b) acúmulo de ureídeos nas folhas. Não há casos registrados de deficiência de níquel em escala de campo.

Tendo em vista sua essencialidade ser evidenciada recentemente e a baixa exigência pelas plantas, há muito pouca informação sobre avaliação da disponibilidade e recomendação de adubação com esse nutriente para as culturas.

Por fim, a tabela 21, traz um resumo dos principais fatores que afetam a disponibilidade dos principais micronutrientes, bem como algumas outras informações úteis e sintetizadas.

DINÂMICA DE MICRONUTRIENTES						
COMPORTAMENTO	FERRO	MANGANÊS	ZINCO	COBRE	BORO	MOLIBDÊNIO
ESTRUTURAL	Goethita Hematita	Vários óxidos	Zn-P	-	-	-
COMPLEXADO COM MO	++	+	+++	++++	-	-
CONSTITUINTE MO	-	-	-	-	Sim	Pouco/semente
QUIMIOSORVIDO	Sim	Sim	Sim	Sim	Menor força	-
PRECIPITADO	++Kps10 ⁻³⁹	++	+	+	-	-
DISPONIBILIDADE	Oxirredução pH	Oxirredução pH	Ph MO	MO pH	-	pH
TOXIDEZ	Arroz	Arroz Soja	-	-	MO pH	-
DEFICIÊNCIA			Milho, Arroz	Citrus	Inibição germinação	Leguminosas

Tabela 21: Dinâmica de micronutrientes

Leitura complementar (Livros)

BORKERT, C.M. & LANTMANN A.F. Edit. **Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira**. Londrina, EMBRAPA/IAPAR/SBCS, 1988. 317p.

FERREIRA, M.E., CRUZ, M.C.P. da. **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS, 1991. 734p.

UNIDADE D

SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO

INTRODUÇÃO

Conforme já foi visto em unidades anteriores, um solo, para ser considerado fértil, deve ter a capacidade de suprir às plantas, em quantidade e proporção adequada, a água e os nutrientes que são essenciais para o seu crescimento e desenvolvimento pleno. Nessas condições, há maior produtividade de grãos, fibras e/ou frutos das culturas comerciais cultivadas com a finalidade de suprir as necessidades humanas. Entretanto, nem sempre o solo é capaz de fornecer os nutrientes em quantidades adequadas ao desenvolvimento das plantas e, nessa situação, deve-se utilizar a prática da adubação.

Adubar consiste em adicionar ao solo materiais que venham a disponibilizar algum(ns) nutriente(s) essencial(ais) às plantas cultivadas, procurando atender a demanda da planta sem comprometer os recursos naturais. As necessidades de adubações são minimizadas pelo uso e manejo adequado dos solos, pela adoção de um sistema de rotação de culturas inteligente e pela reciclagem dos resíduos orgânicos dentro da propriedade. As recomendações de nutrientes são feitas a partir do conhecimento da exigência da planta em cada nutriente e da capacidade do solo (às vezes, da água e do ar) em fornecer cada um desses nutrientes e, então, adiciona-se apenas a quantidade que falta. Para a ampla maioria dos dezessete nutrientes essenciais, NÃO HÁ NECESSIDADE DE ADIÇÃO e aqui vamos tratar daqueles em que a aplicação é mais frequente.

As quantidades de cada nutriente exigidas por cada cultura foram obtidas por experimentos feitos em todos os cantos da Terra. Os dados são disponibilizados na literatura nacional e internacional. Localmente, os pesquisadores dos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, têm trabalhado desde os anos 50 e há grande confiabilidade na recomendação para a maioria das culturas comerciais. Há ainda necessidade de pesquisa em culturas de menor expressão, como o mirtilo, as ervas aromáticas, as essências florestais nativas, entre outras.

Em decorrência da grande demanda das plantas e da não capacidade do solo e do ar em fornecer adequadamente as quantidades exigidas pelas plantas, tem-se observado perdas de produtividade pelas deficiências de nitrogênio, fósforo e potássio em praticamente todos os solos. No entanto, deve-se fazer o correto diagnóstico para quantificar o déficit para cada situação. Por exemplo, embora a soja seja uma das plantas mais exigentes em nitrogênio, não é necessário aplicar nitrogênio quer por intermédio de fertilizantes químicos ou dejetos orgânicos. Isso ocorre pela alta eficiência simbiótica estabelecida entre a planta e certos tipos de bactérias. En-

tão a primeira etapa para a recomendação desses três nutrientes é saber qual PLANTA se pretende cultivar para conhecer as suas exigências. Após isso, para saber a capacidade do solo em fornecer nutrientes, não tem alternativa melhor do que uma análise química de solo. Então, a recomendação de aplicação de nitrogênio, fósforo e potássio é fundamentada em confrontar a exigência da PLANTA com a OFERTA do solo (e do ar para o caso do N).

Uma das primeiras etapas para a recomendação da adubação é a avaliação da disponibilidade de nutrientes no solo. Essa avaliação compreende três fases: amostragem do solo, interpretação do resultado da análise do solo e recomendação da adubação propriamente dita. Neste capítulo, serão discutidos os procedimentos indicados para a amostragem do solo, a interpretação da análise do solo e recomendação para algumas culturas, além do cálculo da adubação utilizando fontes orgânicas.

CAPÍTULO 1 – AMOSTRAGEM DO SOLO

Mesmo que as propriedades físicas e biológicas do solo sejam extremamente importantes, até mesmo para a biodisponibilização dos nutrientes, não há ainda sistemas de recomendação de fertilizantes que usam esses parâmetros. Há várias justificativas, entre elas destacam-se: a inexistência de correlação direta entre atividade biológica e disponibilidade de nutrientes; a impossibilidade de medir parâmetros biológicos que sejam constantes no solo com o tempo, com as variações em umidade e temperatura e com as condições geoquímicas da solução do solo; os parâmetros físicos, especialmente aqueles relacionados com crescimento radicular e armazenamento de água, também não têm correlação direta com a produtividade; a falta de pesquisas na interface química-biologia-física. Não há nenhum país que inclua unicamente parâmetros biológicos ou físicos para a recomendação de nutrientes. Há pouquíssimas tentativas de inclusão de algum parâmetro físico ou biológico como auxiliar na recomendação de nutrientes. Há, sim, países ou regiões dentro de países que estão incluindo parâmetros ambientais nos sistemas de recomendação de nutrientes. Um dos primeiros casos foi o da Holanda, seguido pela região da Bretanha na França. O primeiro por contaminação com fosfato e o segundo devido ao excesso de disponibilidade de dejetos de origem animal (suínos e aves). O sistema de recomendação de adubação e de calagem adotado nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, a partir de 2004, insere a preocupação com o excesso de adição de fertilizantes no solo, introduzindo a classe muito alta de disponibilidade de nutriente. Essa preocupação é pertinente, uma vez que não há resposta econômica das culturas e existe a possibilidade de causar danos ambientais, principalmente, nos recursos hídricos.

Os parâmetros relacionados diretamente com a disponibilidade dos nutrientes no solo é que são utilizados para estimar a quantidade de nutrientes passível de ser absorvida pelas plantas. Logicamente, que os melhores são os indicadores químicos, mesmo para o nitrogênio que é armazenado unicamente na forma orgânica.

A avaliação dos atributos químicos do solo é feita basicamente através de uma análise de solo, cujos resultados podem ser interpretados de acordo com a influência que os valores determinados exercem sobre a disponibilidade dos nutrientes e, conseqüentemente, sobre a produtividade das culturas. A partir disto, é possível estabelecer a quantidade de nutrientes a ser aplicada em cada cultura em uma propriedade agrícola. Uma das primeiras etapas da avaliação das propriedades químicas do solo é a amostragem do solo. A amostragem é uma fase crítica e deve ser feita com todo o cuidado. Quando mal feita, produz interpretação equivocada que causa prejuízos muitas vezes irreparáveis aos agricultores.

Seleção da área a ser amostrada:

A área a ser amostrada deve apresentar características bastante uniformes, considerando aspectos como a cor do solo, a posição na encosta, a cobertura vegetal ou cultura, a textura, a drenagem, o histórico da área, a produtividade da gleba, entre outros. A figura 28 mostra uma propriedade agrícola com suas diferentes glebas que apresentam características próprias, justificando a coleta de amostras separadamente, de acordo com a uniformidade de cada uma. A área experimental do Departamento de Solos (em torno de 15 ha) deverá ser separada em pelo menos dez glebas, uma vez que há áreas de várzea, de encosta e de coxilha e, principalmente, muitas áreas experimentais que foram severamente modificadas em termos de acidez e disponibilidade de nutrientes. Por outro lado, teoricamente, as áreas de cada pivô central são relativamente homogêneas, podendo ser considerada cada área como uma gleba.



Figura 28 – Foto de parte da área experimental do Departamento de Solos (a) e de parte de uma grande propriedade rural no Cerrado (b), evidenciando a necessidade de amostragem do solo por glebas homogêneas. Fonte: Google Earth.

Em áreas que incluem culturas permanentes (fruticultura, espécies florestais, sistemas agroflorestais, silvipastoris, etc.) e culturas adubadas com grandes quantidades de fertilizantes no camalhão (fumo, batata, etc.), devem ser tomados cuidados especiais. Nessas situações, o homem provocou alta variabilidade horizontal além daquela naturalmente existente em qualquer gleba de terra. Onde coletar as amostras? Cada situação exige uma decisão diferente. Por exemplo, em pomares de maçã, é recomendada a coleta do solo na linha das plantas em área sob projeção da copa e nunca coletar nas entrelinhas. No entanto, caso sejam utilizados os espaços entrelinhas para cultivos anuais durante a fase de formação do pomar, a coleta deve ser feita separadamente nas entrelinhas a fim de recomendação específica para a cultura a ser implantada. Esse procedimento é válido também para os sistemas integrados de plantas arbóreas com anuais, como o cultivo em aléias. Outro exemplo é a coleta de amostras em lavouras de fumo, cuja recomendação é não coletar amostras do camalhão, pois ali estão con-

centrados os nutrientes aplicados. No entanto, caso o fumicultor semear o milho diretamente sobre o camalhão, as amostras de solo deveriam ser coletadas nesse local.

Época de amostragem:

A coleta de amostras pode ser feita em qualquer época do ano. Entretanto, considerando-se o tempo gasto para a amostra chegar ao laboratório, a realização das análises e o recebimento do resultado para sua interpretação, aconselha-se realizar a amostragem, no mínimo, 60 dias antes da implantação da cultura. O mais importante é coletar o solo com teor adequado de umidade. Caso o solo esteja muito seco, é praticamente impossível a coleta, principalmente em solos argilosos e muito argilosos. Por outro lado, não é recomendada a coleta de solo quando o teor de umidade se aproxima ou ultrapassa a capacidade de campo. O teor de umidade adequado para a coleta de amostras é quando o solo estiver friável.

Quanto coletar – variabilidade horizontal?

O ideal seria coletar todo o solo a ser cultivado. Isso, obviamente é impossível e absurdo. O que fazer então? Coletar uma pequena quantidade e de qualquer forma ou seguir alguma recomendação com base experimental? É impossível reproduzir a variabilidade horizontal dos solos cultivados. É possível, dentro de cada gleba, expressar um valor médio. Então, deve-se considerar que a subamostra é uma porção de solo coletada em cada ponto do terreno e a amostra composta é a mistura homogênea das várias subamostras. Para a maioria dos atributos químicos usados nos sistemas de recomendação de adubação e de calagem, essa média é muito mais do que o suficiente e pode ser obtida com a coleta de poucas subamostras (todos os parâmetros de acidez: pH, índice SMP, Al, Ca, Mg; matéria orgânica; sulfato; micronutrientes). No entanto, a variabilidade horizontal para o fósforo e o potássio exige amostras compostas com elevado número de subamostras.

O número de subamostras é calculado pela fórmula:

$$n = \left(\frac{t_{\alpha} CV}{e} \right)^2$$

onde **n** é o número de subamostras a ser coletado, **CV** é o coeficiente de variação, **t** é o valor da tabela (teste t) correspondente ao erro α e ao número de graus de liberdade do quadrado médio residual e; **e** é o erro em torno da média. Geralmente, se usa **t** de $\alpha = 0,05$ de intervalo de confiança e 20% de erro em torno da média. Aceitando-se essas condições, deve-se coletar entre 15 a 20 subamostras em cada área homogênea para compor uma amostra composta.

Nos sistemas conservacionistas, em especial no sistema plantio direto, como o solo não é revolvido (ou sofre revolvimento parcial na linha de semeadura) e os nutrientes fósforo e potássio são praticamente imóveis no solo, há concentração deles no local de aplicação (geralmente na linha de semeadura, mas na superfície do solo). Isso é um complicador para a amostragem de solo. Há metodologias que definem quantas subamostras devem ser coletadas na linha e quantas na entrelinhas. No entanto, isso é de pouca importância e de difícil execução no campo. Também, há recomendação de que seja coletada uma fatia de solo que abrange o espaço do meio de uma entrelinha até o meio da outra entrelinha. Isso também é impraticável no campo, pois, por exemplo, no cultivo do milho com espaço entre linhas de 70 cm, deveria ser coletado um volume de solo correspondente a: 70 cm de largura x 10 cm de profundidade x 5 cm de espessura. Imagine coletar 15 subamostras para compor uma amostra composta.

O trabalho feito por Schindweins & Anghinoni (2002) é, sem dúvida alguma, o mais esclarecedor e prático a respeito da amostragem em áreas de sistema plantio direto e por isso as suas conclusões estão compiladas e adaptadas abaixo:

- a. Amostragens de solo com pá de corte no sistema plantio direto, com tamanho de fatia maior do que 5/10 cm (espessura/largura) não representam ganhos substanciais na redução da variabilidade de fertilidade do solo em lavouras com adubação a lanço.
- b. Amostragens de solo com pá de corte com 5/10 cm (espessura/largura) em lavouras com adubação a lanço, apresentam eficiência semelhante à de amostragens com 5 cm/largura das entrelinhas com adubação em linha no sistema plantio direto.
- c. As 10 a 20 subamostras recomendadas pela CQFS-RS/SC (2004) para o sistema de cultivo convencional, admitindo-se um erro de 20% em relação à média, se forem coletadas com pá de corte com 5/10 cm podem ser usadas no sistema plantio direto.
- d. O uso do trado de rosca requer a coleta de um número muito elevado de subamostras no sistema plantio direto, especialmente nas lavouras com adubação em linha e pode induzir a recomendações mais elevadas de adubos e corretivos pela perda da camada superficial do solo no momento da coleta.

Que camada de solo amostrar – variabilidade vertical?

Áreas sob agricultura em preparo convencional do solo (aração e gradagem) e para formação de pastagens: coletar o solo da camada 0-20 cm.

Áreas sob cultivo de arroz inundado: coletar o solo da camada 0-20 cm.

Áreas para cultivo de frutíferas e essências florestais: a primeira amostragem (implantação) deve incluir duas camadas (0-20 e 20 a 40 cm) separadamente. Isto permite ao técnico avaliar as glebas onde as culturas apresentarão mais problemas para o desenvolvimento normal das raízes em profundidade e sugerir as medidas práticas de manejo para minimizar seus efeitos nas produções futuras.

Áreas para cultivo de forrageiras: em pastagens naturais deve-se coletar o solo da camada de 0-20 cm; em áreas sob cultivo convencional e em áreas sob sistema plantio direto seguir as recomendações das outras culturas anuais (0-20 cm no convencional e 0-10 cm no sistema plantio direto).

Áreas sob sistema plantio direto (sem revolvimento do solo): coletar o solo da camada 0-10 cm. É fortemente recomendado que seja realizada coleta também do solo da camada 10-20 cm, pelo menos uma vez a cada 4-5 anos. Os resultados das análises do solo dessa camada (10-20 cm) auxiliarão o técnico a tomar decisões quanto à possibilidade de adição de corretivos na superfície do solo, necessidade de aprofundamento da adição de fósforo e potássio e, até, na tomada de decisão em reiniciar o sistema plantio direto. Tem-se observado que os solos manejados sob sistema plantio direto estão com excesso de nutrientes na camada extremamente superficial e muito pobres em nutrientes e, principalmente, com presença de alumínio trocável na camada abaixo dos 10 cm de profundidade, onde encontram-se bastante compactados. Isso é um grave problema e tem que ser encarado sem paixão, mas sim com razão.

Instrumentos para a coleta do solo:

Embora haja disponibilidade de inúmeros instrumentos para a coleta de solo, nenhum é mais eficaz do que a pá de corte. Os trados de rosca perdem o solo da camada superficial, exatamente aquele rico em nutrientes e, especialmente, em matéria orgânica. Há possibilidade de automação dos instrumentos de coleta, mas se deve tomar cuidado para que todo o solo da camada amostrada seja realmente coletado. Quanto menor o volume de solo amostrado em cada subamostra, maior deverá ser o número de subamostras. Então, para coleta de amostras de solo com trados, uma boa alternativa é coletar várias subamostras em cada subamostra (identificar o local da subamostra e coletar, no mínimo, em 6 pontos em torno desse local) e continuar coletando entre 15 e 20 subamostras para compor a amostra composta.

Procedimentos para coleta e remessa de amostras de solo para análise:

Antes de realizar a amostragem do solo, a superfície do local deve ser limpa, retirando-se restos de plantas, folhas e ramos, mas to-

mando-se o cuidado de não revirar o solo. Em seguida, deve-se retirar o solo equivalente a uma subamostra. Prosseguir deste modo, caminhando em ziguezague na gleba limitada, retirando as demais subamostras e colocando-as em um balde. Após a coleta de todas as subamostras, estas devem ser bem misturadas e destorroadas manualmente em recipiente limpo, dentro do próprio recipiente ou sobre uma lâmina de plástico resistente.

Depois de bem misturadas, retiram-se em torno de 300 a 500 g de solo, que irão constituir a amostra composta que será enviada ao laboratório. A amostra deve ser enviada ao laboratório em saco plástico reforçado, limpo e devidamente identificado. Sempre que possível, seque a amostra à sombra antes de enviá-la ao laboratório.

Cada amostra deve ser acompanhada de uma etiqueta de identificação sobre a área a que se refere. A identificação da amostra deve ser feita também no croqui ou mapa da propriedade que fica com o proprietário ou remetente. Essas informações serão fundamentais para uma adequada recomendação da adubação e dará base para futuros trabalhos de levantamento sobre culturas, uso de solo, doses de adubo e calcário.

Algumas informações importantes:

- a. Não retirar subamostras próximas a casas, brejos, voçorocas, árvores, sulcos de erosão, formigueiros, caminho de pedestres.
- b. Nunca colocar as amostras compostas em recipientes previamente usados ou sujos, como latas de soda, saquinhos de leite, sacos de adubos, de calcário, de cimento, embalagens de defensivos, entre outros.

CAPÍTULO 2 – INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DO SOLO

Depois de encaminhada ao laboratório, a amostra é analisada de acordo com uma série de procedimentos (métodos de análise) previamente testados para cada parâmetro a ser avaliado. Esses procedimentos são definidos pela ROLAS (Rede Oficial de Laboratórios de Análise do Solo), a qual é composta por vários laboratórios de análise do solo no RS e em SC, os quais sofrem constante avaliação do padrão de qualidade das amostras realizadas.

Os valores obtidos na lauda de análise do solo devem ser interpretados sob o ponto de vista qualitativo e para isso deve-se recorrer ao Manual de Adubação e de Calagem para os Estados do RS e de SC (CQFS, 2004), cujas tabelas serão reproduzidas nos capítulos referentes aos nutrientes na Unidade C.

Muitos dos atributos analisados corriqueiramente nas amostras de solo não são diretamente usados para a recomendação de

calagem e de adubação. Embora os resultados de análise de cálcio, magnésio, micronutrientes e enxofre possam até ser enquadrados em classes de disponibilidade, não há ainda recomendações de doses de fertilizantes às culturas. Isso é decorrente da falta de respostas das culturas em virtude da dificuldade de encontrar solos com teores abaixo dos níveis críticos e pela não obtenção de aumento de produtividade quando da adição de fertilizantes.

As tabelas 22, 23 e 24 apresentam as classificações da maioria dos atributos utilizados na interpretação das análises de solo. A separação dos solos em classes de argila é utilizada para a interpretação da real disponibilidade de fósforo. Os teores de matéria orgânica são agrupados em apenas três faixas. Cada faixa de matéria orgânica será utilizada como fator auxiliar na definição da dose de nitrogênio. A capacidade de troca de cátions a pH 7,0 será usada como critério auxiliar na interpretação da real disponibilidade de potássio e no cálculo da saturação por bases.

ARGILA		MATÉRIA ORGÂNICA		CTC _{pH7,0}	
FAIXA	CLASSE	FAIXA	INTERPRETAÇÃO	FAIXA	INTERPRETAÇÃO
%		%		cmol _c dm ⁻³	
≤ 20	4	≤ 2,5	Baixo	≤ 5,0	Baixo
21 – 40	3	2,6 – 5,0	Médio	5,1 – 15,0	Médio
41 – 60	2	> 5,0	Alto	> 15,0	Alto
> 60	1	-	-	-	-

Tabela 22 – Interpretação de teores de argila, matéria orgânica e capacidade de troca de cátions a pH 7,0.

Os teores de cálcio e magnésio são separados em três faixas e servem apenas para a tomada de decisão em aplicar ou não calcário para o cultivo de arroz irrigado no sistema pré-germinado ou transplante de mudas. No caso da disponibilidade de enxofre, há dois níveis críticos, 5,0 e 10,0 mg dm⁻³ para as culturas em geral e para três famílias de plantas específicas (leguminosas, brássicas e liliáceas), respectivamente.

INTERPRETAÇÃO	CÁLCIO	MAGNÉSIO	ENXOFRE	
			Geral	Especial ¹
	----- cmol _c dm ⁻³ -----		----- mg dm ⁻³ -----	
Baixo	≤ 2,0	≤ 0,5	≤ 2,0	≤ 5,0
Médio	2,0 – 4,0	0,6 – 1,0	2,1 – 5,0	5,1 – 10,0
Alto	> 4,0	> 1,0	> 5,0	> 10,0

¹ Leguminosas, brássicas e liliáceas

Tabela 23 – Interpretação de teores de cálcio, magnésio e enxofre disponíveis em solos.

INTERPRETAÇÃO	PH EM ÁGUA	SATURAÇÃO POR BASES (CTC _{ph7,0})	SATURAÇÃO POR ALUMÍNIO (CTC _{efetiva})
		----- % -----	
Muito baixo	≤ 5,0	< 45	< 1
Baixo	5,1 – 5,4	45 – 64	1 – 10
Médio	5,5 – 6,0	65 – 80	10,1 – 20
Alto	> 6,0	> 80	> 20

Tabela 24 – Interpretação de valores de pH em água, saturação da capacidade de troca de cátions por bases e por alumínio.

Os parâmetros relacionados à acidez do solo podem ser interpretados separadamente (pH, Al³⁺ e bases trocáveis). No entanto, é muito mais interessante a interpretação relativa desses atributos. Nesse sentido, a saturação por alumínio (m% = Al/CTC efetiva x 100) é dita como sendo baixa quando for menor do que 10% e alta quando maior do que 20%. Nessa mesma linha de raciocínio, a saturação por bases (V% = Soma de bases / CTC pH 7,0 x 100) é considerada baixa quando menor do que 65% e alta quando superior a 80%. Sempre que o pH do solo for maior do que 5,5, a saturação por alumínio trocável tende a zero e a saturação por bases é superior a 65%. Por outro lado, solos com baixos valores de pH, baixos teores de cálcio e magnésio trocáveis e altos teores de alumínio trocável terão baixa saturação por bases e alta saturação por alumínio. É por isso que a CQFS-RS/SC (2004) adotou a saturação por bases como critério auxiliar na tomada de decisão em aplicar ou não o corretivo da acidez do solo.

A fim de facilitar a compreensão, usaremos os dados de duas análises de solo para fins de recomendação de calcário e de nutrientes. Ambas as amostras foram coletadas em solos manejados sob sistema plantio direto há mais de quinze anos e, portanto, representa a camada de solo 0-10 cm. A amostra número um é oriunda do município de Santo Ângelo e a número dois do município de Manuel Viana (Tabela 25).

Antes mesmo de olhar os valores analíticos dos atributos físicos (teor de argila) e químicos já dá para escrever algo sobre os dois solos. Os solos da região de Santo Ângelo são derivados do basalto e, portanto, devem ter altos teores de argila. São solos bem intemperizados, bem drenados, profundos e de coloração avermelhada. Naturalmente, eram cobertos por mata nativa altamente biodiversa e exuberante. A floresta foi praticamente dizimada ainda nos anos 50-60. Os solos tinham altos teores de matéria orgânica e muito baixa disponibilidade de fósforo. Em decorrência do uso do fogo e cultivo convencional com aração e gradagem, sofreram grandes perdas de solo por erosão hídrica. Todas essas informações são fundamentais para uma boa interpretação das análises de solo. Por exemplo, o solo coletado em Santo Ângelo apresentou 68% de argila e somente 3,9% de matéria orgânica. Isso significa que no passado

foi manejado incorretamente e mesmo após 15 anos de adoção do sistema plantio direto não recuperou os seus teores originais de matéria orgânica. Também fica evidente que o solo já recebeu calagem, pois o pH original dos solos dessa região é em torno de 4,5 e a saturação por alumínio não baixava de 60%. Então, o solo não é mais o mesmo. Semelhantemente, pode-se afirmar com certeza que o solo já recebeu fertilizantes fosfatados uma vez que os teores são mais elevados dos que os solos sob mata nativa. Por outro lado, houve um exaurimento do potássio, cujos valores naturais são maiores do que 100 mg dm^{-3} . Essas mesmas observações devem ser feitas para o solo coletado em Manoel Viana. As diferenças nos materiais de origem, a posição na paisagem e o grau de envelhecimento ficam marcados nos atributos do solo. Há relação estreita entre alguns atributos, como é o caso do teor de argila e teor de matéria orgânica; entre teor de argila mais matéria orgânica e acidez potencial. Através dessas observações locais, acrescidas das informações do nome do produtor e sua história local é possível elaborar uma boa hipótese sobre qual ou quais atributos do solo estão fora dos padrões e qual ou quais alternativas mais viáveis devem ser adotadas.

MUNICÍPIO	ARGILA	MO	CTC pH 7,0	pH EM ÁGUA	AL	SATURACÃO POR AL	ÍNDICE SMP	P	K
	----- % -----		$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$		$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	%		-- Mg dm^{-3} --	
Santo Ângelo	68	3,9	13,4	5,0	2,4	35	5,6	5,0	58
Manuel Viana	9	1,1	4,7	5,0	0,2	15	6,2	5,0	58

Tabela 25 – Resultado de análise de solos coletados em lavouras conduzidas sob sistema plantio direto desde 1995 nos municípios de Santo Ângelo e Manuel Viana.

Após a interpretação geral da região onde foi coletado o solo, parte-se para a interpretação dos resultados analíticos. Nesse sentido, os teores de argila enquadram os solos nas classes texturais I e IV para o solo coletado em Santo Ângelo e Manuel Viana, respectivamente. Isso terá implicações na interpretação do nível de disponibilidade de fósforo.

Os dados revelam inicialmente que ambos necessitam da aplicação de corretivo da acidez (ver Unidade B: acidez e calagem). A calagem deve anteceder qualquer adição de nutriente. Rapidamente, lembrando que a tomada de decisão quanto a se aplicar ou não calcário no sistema plantio direto consolidado é $\text{pH} < 5,5$ ou $V < 65\%$. A definição da dose é feita pelo índice SMP. A dose a ser aplicada é de apenas a metade da dose estimada pelo Índice SMP para pH 5,5 (Santo Ângelo = 1600 kg ha^{-1} ; Manuel Viana = 500 kg ha^{-1} , para PRNT 100%). O calcário deve ser aplicado a lanço na superfície do solo.

Combinando o teor de fósforo com o teor de argila, encontraremos a REAL disponibilidade de fósforo. No caso do solo de San-

to Ângelo, que apresenta 68% de argila (> 60% - classe textural I) que combinado com $5,0 \text{ mg P dm}^{-3}$, encontraremos a Classe de Disponibilidade MÉDIO. No outro solo, mesmo tendo os mesmos $5,0 \text{ mg P dm}^{-3}$ pelo fato de ter apenas 9% de argila (< 20% - classe textural IV), a sua disponibilidade é MUITO BAIXA.

Similarmente ao P, a REAL disponibilidade de potássio é obtida pela combinação do teor de potássio e o valor da capacidade de troca de cátions a pH 7,0. No solo de Santo Ângelo, por apresentar CTC pH 7,0 de $13,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ pertence à classe intermediária de CTC (5 a $15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) que combinado com 58 mg K dm^{-3} , encontraremos a Classe de Disponibilidade MÉDIO. Por outro lado, no solo oriundo de Manuel Viana, cuja CTC pH 7,0 é de apenas $4,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (muito arenoso e com pouca matéria orgânica), os 58 mg K dm^{-3} já enquadraram o solo como sendo de ALTA disponibilidade de potássio às plantas.

A disponibilidade REAL de nitrogênio do solo é praticamente impossível de se mensurar. Nada de novo, uma vez que vocês bem estudaram que a dinâmica desse nutriente no sistema solo – atmosfera – água – planta é totalmente dependente da atividade dos microrganismos. Assim, a recomendação de nitrogênio deve considerar o tipo de PLANTA a ser cultivada, a QUANTIDADE de produto desejado a ser obtida, o tipo e a quantidade da planta ANTECESSORA e o teor de MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO. Desse modo, o indicativo da oferta de nitrogênio via solo é o teor de matéria orgânica. Considera-se que a matéria orgânica tem em média 5% de nitrogênio e que a cada ano em média 2% do total da matéria orgânica é mineralizada. Como a matéria orgânica não é a única fonte de N para indicar a disponibilidade às plantas, devem-se considerar os outros três indicadores elencados acima. A CQFS-RS/SC (2004) separa todos os solos em apenas três classes: < 2,5 % é baixo; 2,5 - 5,0% é médio e > 5,0% é alto. Então, o solo coletado em Santo Ângelo tem teor MÉDIO e o coletado em Manuel Viana BAIXO de matéria orgânica.

CAPÍTULO 3 – RECOMENDAÇÃO DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO

INTRODUÇÃO

A avaliação da oferta ou disponibilidade de nutrientes no solo foi vista no capítulo anterior. Dessa forma, vocês estão aptos a tomarem DECISÕES quanto à DOSE, ÉPOCA e ao LOCAL de aplicação desses três nutrientes. Não há nenhuma possibilidade de que uma avaliação visual do solo, ou se utilizando de plantas indicadoras ou do histórico do produtor, possa quantificar com razoável precisão quanto desses três nutrientes estão à disposição da planta. Todas essas informações adicionais podem auxiliar na checagem do sistema de recomendação e permitem ajustar as doses recomendadas localmente. JAMAIS usar informações médias da região e NUNCA confiar nos vendedores de fertilizantes.

A partir da classificação da disponibilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica (nitrogênio), poderemos encontrar a quantidade a ser adicionada para as diferentes culturas. Faremos a seguir simulações para os cultivos de soja, trigo, milho e citros.

Primeiro cultivo: soja

Inicialmente, é necessário definir a produtividade de grãos de soja. A produtividade a ser atingida deve levar em consideração as condições de produção, a experiência do produtor, a localização geográfica, entre outros. Não é possível querer produzir 4.000 kg ha⁻¹ em um solo arenoso em Manuel Viana e também seria perda de potencial produzir menos do que 3.000 kg ha⁻¹ em Santo Ângelo. Consideraremos uma produtividade de 3.000 kg ha⁻¹ no solo de Santo Ângelo e 2.000 kg ha⁻¹ no solo em Manuel Viana. Vale a pena ressaltar aqui que o produtor de Manuel Viana não poderá fazer seguro agrícola, pois há um limite mínimo de teor de argila e profundidade do horizonte A para que ele possa ser segurado. Há grande probabilidade de perdas de produtividade ocasionada por estiagens.

Nitrogênio: independentemente do teor de nitrogênio e da produtividade a ser obtida, NÃO é necessária a adição de fertilizantes nitrogenados na soja. Recomenda-se fazer a inoculação com *Rhizobium/Bradirhizobium* específico e disponível no mercado.

Fósforo e Potássio no solo coletado em Santo Ângelo: Médio / Médio

Para a classe MÉDIA de disponibilidade de fósforo e no primeiro cultivo (após a análise do solo), a CQFS-RS/SC (2004) indica a dose de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ para a obtenção de 2.000 kg ha⁻¹ (Tabela 5). Para a produção de mais uma tonelada de grãos de soja por hectare é necessário a adição de mais 15 kg P₂O₅ ha⁻¹. Então, o agricultor deverá adicionar 75 kg P₂O₅ ha⁻¹ na linha de semeadura da soja.

Para a classe MÉDIA de disponibilidade de potássio e no primeiro cultivo, a CQFS-RS/SC (2004) indica a dose de 75 kg K₂O ha⁻¹ para a obtenção de 2.000 kg ha⁻¹ (Tabela 5). Para a produção de mais uma tonelada de grãos de soja por hectare é necessário a adição de mais 25 kg K₂O ha⁻¹. Então, o agricultor deverá adicionar 100 kg K₂O ha⁻¹ na linha de semeadura da soja.

Em conclusão, as quantidades de N – P₂O₅ – K₂O recomendadas para a produção de 3.000 kg soja ha⁻¹ são: 0 – 75 – 100 kg ha⁻¹.

INTERPRETAÇÃO DO TEOR DE P OU DE K SOLO	FÓSFORO POR CULTIVO		POTÁSSIO POR CULTIVO	
	1º	2º	1º	2º
	kg de P ₂ O ₅ ha ⁻¹		kg de K ₂ O ha ⁻¹	
Muito baixo	110	70	125	85
Baixo	70	50	85	65
Médio	60	30	75	45
Alto	30	30	45	45
Muito alto	0	≤30	0	≤45

Para a expectativa de rendimento maior do que 2 t ha⁻¹, acrescentar aos valores da tabela: 15 kg de P₂O₅ ha⁻¹ e 25 kg de K₂O ha⁻¹ por cada tonelada adicional de grãos a serem produzidos.

Tabela 26 – Doses de fósforo e potássio a serem adicionadas ao solo para o cultivo da soja.

Fósforo e Potássio no solo coletado em Manuel Viana: Muito Baixo / Alto

Para a classe MUITO BAIXA de disponibilidade de fósforo e no primeiro cultivo (após a análise do solo), a CQFS-RS/SC (2004) indica a dose de 110 kg P₂O₅ ha⁻¹ para a obtenção de 2.000 kg ha⁻¹ (Tabela 26). Então, o agricultor deverá adicionar 110 kg P₂O₅ ha⁻¹ na linha de semeadura da soja.

Para a classe ALTA de disponibilidade de potássio e no primeiro cultivo, a CQFS-RS/SC (2004) indica a dose de 45 kg K₂O ha⁻¹ para a obtenção de 2.000 kg ha⁻¹ (Tabela 5). Então, o agricultor deverá adicionar 45 kg K₂O ha⁻¹ na linha de semeadura da soja.

Em conclusão, as quantidades de N – P₂O₅ – K₂O recomendadas para a produção de 2.000 kg soja ha⁻¹ são: 0 – 110 – 45 kg ha⁻¹. Fica evidente que a fórmula usada por esse produtor diferirá consideravelmente daquela usada pelo proprietário do solo de Santo Ângelo.

Como o solo apresenta teor de fósforo Muito Baixo, pode-se adotar a filosofia da ADUBAÇÃO CORRETIVA antecedendo o cultivo. Para tal, a dose recomendada para elevar a disponibilidade para a classe ALTA (ideal agrônômica e ambientalmente) é de 120 kg P₂O₅ ha⁻¹ (Tabela 27). No momento da semeadura da soja, a disponibilidade já está alta e, portanto é necessário adicionar apenas 30 kg P₂O₅ ha⁻¹. Nesse caso, deve ser adicionados 0 – 150 – 45 kg ha⁻¹, de nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente.

INTERPRETAÇÃO DO TEOR DE P OU DE K NO SOLO	FÓSFORO	POTÁSSIO
	kg de P ₂ O ₅ ha ⁻¹	kg de K ₂ O ha ⁻¹
Muito baixo	120	120
Baixo	60	60

Tabela 27 – Doses de fósforo e potássio necessárias para a correção da deficiência do solo (elevar a disponibilidade à classe ALTA).

Segundo cultivo: trigo

A fim de facilitar os cálculos, consideraremos produtividade de apenas 2.000 kg ha⁻¹ em ambos os solos para um cultivo de trigo na sequência do cultivo de soja. Nesse caso, o trigo é considerado segundo cultivo adubado após a análise de solo.

Solo coletado em Santo Ângelo:

Nitrogênio: Matéria orgânica MÉDIA e para produtividade de 2.000 kg ha⁻¹ tendo uma leguminosa antecedendo (soja) deve-se usar 40 kg N ha⁻¹ (Tabela 28). Esse deve ser aplicado um pouco na semeadura (± 10 kg) e o restante em cobertura.

TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO	CULTURA ANTECEDENTE	
	LEGUMINOSA (SOJA)	GRAMÍNEA (MILHO)
%	----- kg ha ⁻¹ -----	
≤ 2,5	60	80
2,5 – 5,0	40	60
> 5,0	≥ 20	≥ 20

Para a expectativa de rendimento maior do que 4 t ha⁻¹, acrescentar aos valores da tabela: 20 kg de N ha⁻¹ se sobre leguminosa e 30 kg de N ha⁻¹ se sobre gramínea por cada tonelada adicional de grãos a serem produzidos.

Tabela 28 – Dose de nitrogênio a ser adicionada no cultivo do trigo considerando a cultura precedente e o teor de matéria orgânica.

Fósforo: Para a classe MÉDIA de disponibilidade de fósforo e no segundo cultivo (primeiro foi a soja), a CQFS-RS/SC (2004) indica a dose de 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ para a obtenção de 2.000 kg grãos de trigo ha⁻¹ (Tabela 29), que serão aplicados na linha de semeadura.

Potássio: Para a classe MÉDIA de disponibilidade de potássio e no segundo cultivo, a CQFS-RS/SC (2004) indica a dose de 20 kg K₂O ha⁻¹ para a obtenção de 2.000 kg grãos de trigo ha⁻¹, que serão aplicados na linha de semeadura.

Em conclusão, as quantidades de N – P₂O₅ – K₂O recomendadas para a produção de 2.000 kg trigo ha⁻¹ são: 40 – 30 – 20 kg ha⁻¹.

INTERPRETAÇÃO DO TEOR DE P OU DE K SOLO	FÓSFORO POR CULTIVO		POTÁSSIO POR CULTIVO	
	1º	2º	1º	2º
	kg de P ₂ O ₅ ha ⁻¹		kg de K ₂ O ha ⁻¹	
Muito baixo	110	70	100	60
Baixo	70	50	60	40
Médio	50	30	50	20
Alto	30	30	20	20
Muito alto	0	≤ 30	0	≤ 20

Para a expectativa de rendimento maior do que 2 t ha⁻¹, acrescentar aos valores da tabela: 15 kg de P₂O₅ ha⁻¹ e 10 kg de K₂O ha⁻¹ por cada tonelada adicional de grãos a serem produzidos.

Tabela 29 – Doses de fósforo e potássio a serem adicionadas ao solo para o cultivo do trigo.

Solo coletado em Manuel Viana:

Nitrogênio: Matéria orgânica BAIXA e para produtividade de 2.000 kg ha⁻¹ tendo uma leguminosa antecedendo (soja) deve-se usar 60 kg N ha⁻¹ (Tabela 28). Esse deve ser aplicado um pouco na semeadura (± 10 kg) e o restante em cobertura.

Fósforo: Para a classe MUITO BAIXA de disponibilidade de fósforo e no segundo cultivo (primeiro foi a soja), a CQFS-RS/SC (2004) indica a dose de 70 kg P₂O₅ ha⁻¹ para a obtenção de 2.000 kg grãos de trigo ha⁻¹ (Tabela 29), que serão aplicados na linha de semeadura.

Potássio: Para a classe ALTA de disponibilidade de potássio e no segundo cultivo, a CQFS-RS/SC (2004) indica a dose de 20 kg K₂O ha⁻¹ para a obtenção de 2.000 kg grãos de trigo ha⁻¹, que serão aplicados na linha de semeadura.

Em conclusão, as quantidades de N - P₂O₅ - K₂O recomendadas para a produção de 2.000 kg trigo ha⁻¹ são: 60 – 70 – 20 kg ha⁻¹.

Cabe ressaltar que, CASO o produtor do solo de Manuel Viana tenha optado pela CORREÇÃO total de deficiência de fósforo (adição de 120 kg P₂O₅ ha⁻¹ no cultivo da soja), o solo estará com ALTA disponibilidade de fósforo. Então, pela tabela 29 ele deverá usar somente 30 kg P₂O₅ ha⁻¹. A recomendação para a produção de trigo passa a ser: 60 – 30 – 20 kg ha⁻¹. A diferença é de 40 kg P₂O₅ ha⁻¹, justamente o que foi adicionado a mais no cultivo da soja (150 e não 110 kg P₂O₅ ha⁻¹).

Terceiro cultivo: milho

A primeira etapa a fim de obter as quantidades adequadas de nitrogênio, fósforo e potássio a serem adicionadas é a definição da produtividade desejada. Consideraremos que as produ-

tividades serão de 8.000 kg ha⁻¹ em Santo Ângelo e de apenas 5.000 kg ha⁻¹ em Manuel Viana.

A segunda etapa é a checagem da disponibilidade de nitrogênio, fósforo e potássio através de nova análise de solo, uma vez que o sistema de recomendação é feito para cada dois cultivos (já foram cultivados a soja e o trigo). Adotando-se as recomendações da CQFS-RS/SC (2004), após os dois cultivos os teores de fósforo e potássio deverão estar na classe ALTA. Isso porque as doses adicionadas nos dois primeiros cultivos objetivavam a máxima produtividade econômica e a elevação dos teores de disponibilidade do solo na faixa ideal agrônômica e ambientalmente. Os teores de matéria orgânica do solo não são alterados significativamente, mesmo no sistema plantio direto, durante apenas dois cultivos anuais.

Desse modo, a nova análise de solo deverá evidenciar que ambos os solos não necessitarão de correção da acidez (já foi feita a calagem há um ano – antes do cultivo da soja); os teores de matéria orgânica continuarão nas mesmas classes; as classes de disponibilidade de fósforo e potássio serão ALTAS. Caso isso não ocorra, pode-se iniciar o sistema para outros dois cultivos com uma nova dose de correção (provavelmente menor que a utilizada nos cultivos anteriores). Isso explica o porquê de se realizar a análise de solo a cada dois cultivos adubados.

Solo coletado em Santo Ângelo:

Nitrogênio: Matéria orgânica MÉDIA e para produtividade de 8.000 kg ha⁻¹ tendo uma gramínea antecedendo (trigo) deve-se usar 70 kg N ha⁻¹ (Tabela 30) para a produção de 4.000 kg ha⁻¹. Como para cada tonelada de grãos além das 4 toneladas devem ser adicionados 15 kg ha⁻¹, as outras 4 toneladas necessitarão de mais 60 kg ha⁻¹. Assim, a dose total será de 130 kg ha⁻¹. A dose na semeadura deve ser em torno de 30 kg ha⁻¹ e o restante em cobertura, preferencialmente em duas aplicações.

TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO	CULTURA ANTECEDENTE		
	LEGUMINOSA	CONSÓRCIO OU POUSIO	GRAMÍNEA
%	----- kg ha ⁻¹ -----		
≤ 2,5	70	80	90
2,5 – 5,0	50	60	70
> 5,0	≥ 30	≥ 40	≥ 50

Para a expectativa de rendimento maior do que 4 t ha⁻¹, acrescentar aos valores da tabela: 15 kg de N ha⁻¹ por cada tonelada adicional de grãos a serem produzidos.

Tabela 30 – Dose de nitrogênio a ser adicionada no cultivo do milho considerando a cultura antecedente e o teor de matéria orgânica.

As doses podem ser alteradas em até 20 kg de N ha⁻¹: para mais se tiver alta produção da gramínea ou para menos se tiver alta produção da leguminosa ou tiver predomínio de leguminosa no consórcio.

Fósforo: Para a classe ALTA de disponibilidade de fósforo e no primeiro cultivo (agora após novamente uma análise de solo), a CQFS-RS/SC (2004) indica a dose de 45 kg P₂O₅ ha⁻¹ para a obtenção de 4.000 kg grãos de milho ha⁻¹ (Tabela 10). Para cada tonelada de grãos a mais se deve adicionar 15 kg P₂O₅ ha⁻¹. Então a dose para os 8.000 kg de grãos ha⁻¹ será de 105 kg P₂O₅ ha⁻¹, que serão aplicados na linha de semeadura.

Potássio: Para a classe ALTA de disponibilidade de potássio e no primeiro cultivo, a CQFS-RS/SC (2004) indica a dose de 30 kg K₂O ha⁻¹ para a obtenção de 4.000 kg grãos de milho ha⁻¹. Para cada tonelada de grãos a mais se deve adicionar 10 kg K₂O ha⁻¹. Então a dose para os 8.000 kg de grãos de milho ha⁻¹ será de 70 kg K₂O ha⁻¹, que serão aplicados na linha de semeadura.

Em conclusão, as quantidades de N – P₂O₅ – K₂O recomendadas para a produção de 8.000 kg milho ha⁻¹ são: 130 – 105 – 70 kg ha⁻¹.

INTERPRETAÇÃO DO TEOR DE P OU DE K SOLO	FÓSFORO POR CULTIVO		POTÁSSIO POR CULTIVO	
	1º	2º	1º	2º
	kg de P ₂ O ₅ ha ⁻¹		kg de K ₂ O ha ⁻¹	
Muito baixo	125	85	100	70
Baixo	85	65	70	50
Médio	75	45	60	30
Alto	45	45	30	30
Muito alto	0	≤ 45	0	≤ 30

Para a expectativa de rendimento maior do que 4 t ha⁻¹, acrescentar aos valores da tabela: 15 kg de P₂O₅ ha⁻¹ e 10 kg de K₂O ha⁻¹ por cada tonelada adicional de grãos a serem produzidos.

Tabela 31 – Doses de fósforo e potássio a serem adicionadas ao solo para o cultivo do milho.

Solo coletado em Manuel Viana:

Nitrogênio: Matéria orgânica BAIXA e para produtividade de 5.000 kg ha⁻¹ tendo uma gramínea antecedendo (trigo) deve-se usar 90 kg N ha⁻¹ (Tabela 30) para a produção de 4.000 kg ha⁻¹. Como para cada tonelada de grãos além das 4 toneladas devem ser adicionados 15 kg ha⁻¹, a dose total será de 105 kg ha⁻¹. A dose na semeadura dever ser em torno de 30 kg ha⁻¹ e o restante em cobertura, obrigatoriamente em duas aplicações.

Fósforo: Para a classe ALTA de disponibilidade de fósforo e no primeiro cultivo (agora após novamente uma análise de solo), a CQFS-RS/SC (2004) indica a dose de 45 kg P₂O₅ ha⁻¹ para a obten-

ção de 4.000 kg grãos de milho ha⁻¹ (Tabela 31). Para cada tonelada de grãos a mais se deve adicionar 15 kg P₂O₅ ha⁻¹. Então a dose para os 5.000 kg de grãos ha⁻¹ será de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹, que serão aplicados na linha de semeadura.

Potássio: Para a classe ALTA de disponibilidade de potássio e no primeiro cultivo, a CQFS-RS/SC (2004) indica a dose de 30 kg K₂O ha⁻¹ para a obtenção de 4.000 kg grãos de milho ha⁻¹. Para cada tonelada de grãos a mais se deve adicionar 10 kg K₂O ha⁻¹. Então a dose para os 5.000 kg de grãos de milho ha⁻¹ será de 40 kg K₂O ha⁻¹, que serão aplicados na linha de semeadura.

Em conclusão, as quantidades de N – P₂O₅ – K₂O recomendadas para a produção de 5.000 kg milho ha⁻¹ são: 105 – 60 – 40 kg ha⁻¹.

Cultivo de citros:

O sistema de adubação usado em plantas perenes (semi-perenes) difere daquele usado nas culturas anuais. Há várias culturas de grande interesse econômico e social, em destaque para a macieira, a videira, os citros e a erva-mate. Para essas culturas, há recomendação de adubação de plantio, de formação e de produção. As duas primeiras formas de adubação são baseadas na análise de solo e na exigência da cultura e a terceira é dependente unicamente da quantidade de produto colhido e exportado da lavoura. A fim de exemplificação nós faremos a recomendação de fertilizantes para implantação de um hectare de pomar de laranja (umbigo e valência) no solo coletado em Manoel Viana. Para tal, teremos que considerar que os dados de análise do solo mostrados na Tabela 22 referem-se à camada 0-20 cm. A gleba de terra está localizada numa meia encosta com boa drenagem e o horizonte A tem em torno de um metro de profundidade.

Inicialmente, teremos que fazer a correção da acidez do solo. Os citros exigem solos sem alumínio trocável e por isso a CQFS-RS/SC (2004) recomenda a elevação do pH do solo a 6,0. Em função do grande espaço entre linhas abrem-se duas alternativas: calagem em área total ou calagem na faixa de plantio. Não é recomendada a calagem somente na cova. O mais recomendado é a correção da acidez em área total e com incorporação do calcário o mais profundo possível. Os produtores de maçã, por exemplo, lavram o solo sob campo nativo, fazem as correções de acidez e nutrientes (fósforo e às vezes potássio), cultivam o solo por alguns anos com culturas anuais (dois a três anos com soja, milho, trigo) e somente após é que introduzem os pomares. O importante disso é NUNCA implantar pomares já sabendo que o solo tem algum problema: pouca drenagem, pouca profundidade, presença de alumínio trocável em profundidade, deficiência de fósforo, locais sombreados, etc. Vale

a pena estudar os manuais específicos de cada espécie de fruta a produzir para bem escolher a área e as condições iniciais de solo.

Caso fossemos corrigir toda a massa de solo da camada 0-20 cm, teríamos que adicionar 5,4 toneladas por hectare de calcário dolomítico. No entanto, optaremos por fazer a correção do solo somente da faixa de plantio (3,0 m de largura). Assim, o agricultor deverá aplicar 2,7 toneladas no hectare, considerando um espaço entre linhas de 6 metros. Após a aplicação do calcário, aproveitar o momento para a correção da alta carência em fósforo do solo. *Aplicar o equivalente a 120 kg P_2O_5 ha^{-1} porque o solo tem disponibilidade MUITO BAIXA (ver tabela 28).* A distribuição do fosfato solúvel deve ser feita a lanço no solo da faixa de plantio. Em seguida, efetuar uma lavração profunda e uma gradagem. Imediatamente após, recomenda-se o cultivo de uma planta anual que cubra rapidamente o solo na faixa de plantio. Pode ser inclusive, uma planta de interesse comercial (aveia preta para produção de sementes, por exemplo). Na época adequada, fazer o plantio das mudas tomando cuidado de adquirir mudas sem problemas fitossanitários (cancro cítrico, larva minadora, etc.).

Adubação de plantio (pré-plantio):

A adubação de pré-plantio restringe-se à aplicação de fósforo. Mesmo que o solo seja deficiente em potássio (abaixo do teor crítico = classes Muito Baixo, Baixo e Médio) os citros não respondem à aplicação desse nutriente. Há apenas recomendação de adição de fertilizantes potássicos se o fruticultor optar por cultivos intercalares ou para acelerar o crescimento das espécies espontâneas nas entrelinhas. Mesmo assim, o solo já tem ALTA disponibilidade de potássio e a dose recomendada é ZERO. Na tabela 32, estão estabelecidas as doses de fósforo e potássio a serem adicionadas no pré-plantio. Como o solo onde estamos implantando o pomar de citros tinha MUITO BAIXA disponibilidade de fósforo, a dose recomendada pela tabela é de 180 kg de P_2O_5 ha^{-1} . Então há duas possibilidades: (a) a aplicação dessa dose juntamente com o calcário, como discutido anteriormente, ou, (b) a adoção da estratégia de aplicar 120 kg de P_2O_5 ha^{-1} incorporando-o na faixa de solo juntamente com o calcário para elevar a disponibilidade para a classe ALTA e o restante aplicar na cova de plantio. Essa tática parece ser a forma mais adequada. Sendo assim, haverá uma pequena diferença na dose. Isso porque, a tabela 29 indica que se deve aplicar 80 kg de P_2O_5 ha^{-1} quando a disponibilidade for ALTA, totalizando 200 kg de P_2O_5 ha^{-1} , ao invés dos 180 kg de P_2O_5 ha^{-1} . Uma diferença de 20 kg de P_2O_5 ha^{-1} é insignificante. Com isso, todo o solo da faixa ao longo da linha de plantio terá ALTA disponibilidade de fósforo e o solo da cova de plantio terá um reforço em fósforo garantindo rápido crescimento inicial das mudas de citros o que se reverterá em plantas que carregarão para sempre a formação de que as condições são favoráveis a altas produtividades.

INTERPRETAÇÃO DO TEOR DE P OU DE K SOLO	FÓSFORO kg de P ₂ O ₅ ha ⁻¹	POTÁSSIO kg de K ₂ O ha ⁻¹
Muito baixo	180	100
Baixo	120	70
Médio	80	40
Alto	80	0
Muito alto	0	0

A adubação potássica de pré-plantio não é necessária para os citros e sim se o fruticultor optar por cultivos intercalares.

Tabela 32 – Doses de fósforo e potássio a serem adicionadas ao solo para o cultivo de citrus.

Adubação de formação (crescimento):

A adubação de crescimento restringe-se à aplicação de nitrogênio e de potássio. Lembrando que o solo onde estamos implantando o pomar tem BAIXO teor de matéria orgânica, os gastos com fertilizantes nitrogenados serão elevados e exigem a adoção de práticas de manejo do solo que permitam a cobertura total do solo e a introdução de espécies com alta capacidade de fixação de nitrogênio. Desse modo, mesmo na faixa de plantio é recomendada a utilização de plantas de cobertura, tomando-se o cuidado de não haver competição por luz e água. Manter o solo das entrelinhas também constantemente coberto por plantas, de preferência que tenha a maior biodiversidade possível, o que ajudará no controle de pragas e doenças.

TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO	ANOS APÓS O PLANTIO			
	PRIMEIRO	SEGUNDO	TERCEIRO	QUARTO
%	----- kg N ha ⁻¹ -----			
≤ 2,5	45	75	110	155
2,5 – 3,5	35	60	90	130
3,5 – 4,5	30	45	60	90
> 4,5	0	0	0	0

Tabela 33 – Dose de nitrogênio a ser adicionada no solo em pomares de citros durante a fase de crescimento em função do teor de matéria orgânica do solo.

Em decorrência do baixo teor de matéria orgânica, apenas 1,1 %, recomenda-se a aplicação de 45, 75, 110 e 155 kg N ha⁻¹ no primeiro, segundo, terceiro e quarto ano após o plantio, respectivamente (Tabela 33).

Como o solo apresenta ALTA disponibilidade de potássio, somente é recomendada a aplicação de 20 kg K₂O ha⁻¹ no quarto anos após o plantio. Nos três primeiros anos, somente aplicar nitrogênio (Tabela 34).

O nitrogênio e o potássio devem ser aplicados na projeção da copa da planta. A partir do quarto ano, recomenda-se a aplicação numa faixa

de largura igual ao raio da projeção da copa no início da primavera. É recomendado que se faça um mínimo de incorporação dos fertilizantes, principalmente para evitar perdas de nitrogênio por volatilização pelo fato de que quase sempre o mais econômico é a forma de uréia.

As doses de nitrogênio e potássio devem ser fracionadas em três épocas. Nos primeiros três anos, a primeira aplicação deve ser feita no início da brotação (agosto/setembro) aplicando-se 20% da dose de N (20% de 45 kg); a segunda, em novembro/dezembro com 30% da dose; a terceira com 50% da dose e deve ser feita em fevereiro. No quarto ano e em todas as aplicações subsequentes, aplicar os 20 kg K₂O ha⁻¹ na primeira aplicação. Não vale a pena fracionar em três uma dose tão baixa de potássio. No quarto ano, as frações das doses de nitrogênio da primeira, segunda e terceira aplicações devem ser de 30, 30 e 40%. A partir do quinto ano, alterar a fração de nitrogênio para 40, 30 e 30%.

INTERPRETAÇÃO DO TEOR DE K DO SOLO	ANOS APÓS O PLANTIO			
	PRIMEIRO	SEGUNDO	TERCEIRO	QUARTO
	----- kg K ₂ O ha ⁻¹ -----			
Muito baixo	20	30	40	80
Baixo	10	15	30	60
Médio	0	0	20	40
Alto	0	0	0	20
Muito alto	0	0	0	0

No primeiro e segundo anos, só é necessário fazer adubações com potássio quando não tiver sido feita adubação de pré-plantio.

Tabela 34 – Dose de potássio a ser adicionada no solo em pomares de citros durante a fase de crescimento.

Adubação de produção (manutenção):

A adubação de manutenção consiste em repor os nutrientes exportados com a colheita das laranjas.

Nitrogênio: Aplicar anualmente a dose recomendada para o quarto ano (155 kg N ha⁻¹) para uma produção de 20 toneladas por hectare. Para cada 10 toneladas de incremento de produção de frutos deve-se acrescentar 40 kg N ha⁻¹. Há recomendação de checar a eficácia da adubação nitrogenada por meio de análise foliar, tendo como base um valor ideal de 2,5% de N nas folhas. Caso o teor ultrapasse 2,7% diminuir a dose em 20%; caso seja inferior a 2,3% aumentar a dose em 20%.

Fósforo: Não há necessidade de adição de fosfato durante o período de produção, salvo se as folhas contiverem menos do que 0,13% de fósforo. Pela estratégia adotada na implantação desse pomar certamente não haverá necessidade de reaplicação de fosfatos.

Potássio: Aplicar anualmente a dose recomendada para o quarto ano (20 kg K_2O ha^{-1}) para uma produção de 20 toneladas por hectares. Para cada 10 toneladas de incremento de produção de frutos deve-se acrescentar 60 kg K_2O ha^{-1} . Há recomendação de checar a eficácia da adubação potássica por meio de análise foliar, tendo como base um valor ideal de 1,35% de K nas folhas. Caso o teor ultrapasse 1,5% diminuir a dose em 20%; caso seja inferior a 1,0% aumentar a dose em 20%.

A partir dessa recomendação, ficam evidentes que, na implantação de um pomar, devem ser seguidas todas as recomendações de correção da acidez e das deficiências dos nutrientes do solo. Deve-se adotar sistema de manejo de solo no pomar para cobertura permanente do solo com plantas, incluindo leguminosas para a fixação de nitrogênio. Adotadas essas medidas, as adubações futuras se restringirão ao manejo do nitrogênio. Como o presente solo é muito arenoso e, portanto, tem baixo teor de matéria orgânica pode ser necessária a aplicação de enxofre e boro. Sempre que os teores nas folhas forem menores do que 0,2% de S e 36 mg B kg^{-1} recomenda-se a aplicação desses dois nutrientes. Há no mercado a oferta de gesso agrícola e de tetraborato de sódio. No entanto, a melhor alternativa é a aplicação de dejetos animais os quais são ricos nesses dois nutrientes e em todos os demais denominados micronutrientes.

Todos esses procedimentos descritos nesse capítulo são baseados no Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2004) cuja edição está esgotada, mas a Comissão de Química e Fertilidade do Solo está revisando as recomendações e em breve, será lançada uma nova edição.

CAPÍTULO 4 – ADUBAÇÃO ORGÂNICA

A reciclagem dos resíduos orgânicos (animais e vegetais) é fonte importante de nutrientes. A utilização de resíduos orgânicos no solo, como esterco de animais, é uma prática de uso milenar utilizada pelas populações agrícolas. Além do aproveitamento dos nutrientes presentes nestes materiais, a adubação orgânica propicia a reciclagem no sistema produtivo, evitando a contaminação ambiental.

Nos sistemas que utilizam o confinamento de animais, como nos casos das criações de aves, suínos e bovinos, são geradas grandes quantidades de dejetos orgânicos, com alto valor fertilizante, que devem ser adequadamente utilizados para minimizar seu impacto ambiental. A utilização dos resíduos que possuem baixo teor de umidade, como as camas de frangos de corte, é bastante facilitada. Dejetos de suínos e de bovinos, com teor mais alto de umidade, ou na forma fluída (< 10% de matéria seca), apresentam maiores dificuldades para

a aplicação no solo, pois requerem maior mão-de-obra e equipamentos adequados. Resíduos orgânicos de agroindústrias, como curtumes, abatedouros e processamento de alimentos também podem ser utilizados como fontes de nutrientes de plantas. O lodo de esgoto e o composto de lixo orgânico também podem ser empregados como fontes de nutrientes para as plantas, desde que sua aplicação no solo seja feita de acordo com as normas vigentes, visando a preservação da qualidade do solo e dos mananciais hídricos. Alguns podem ser repostos no solo diretamente, outros necessitam de tratamento prévio, como é o caso dos dejetos humanos.

Dessa forma, as propriedades familiares diminuem sua dependência dos insumos externos, garantindo níveis de produtividade satisfatórios. Entretanto, mesmo que eles sejam orgânicos é necessário utilizar esses materiais de forma racional, adequando as doses a aplicar em função dos níveis de nutrientes do solo e da demanda em nutrientes pelas culturas. A adição em excesso de materiais orgânicos pode fornecer excesso de algum elemento químico (geralmente N, P, Cu e Zn), os quais podem causar toxidez às plantas ou ainda ser transferidos aos recursos hídricos (arroyos, fontes, rios, açudes, etc), contaminando-os. Também, os dejetos orgânicos de origem animal podem conter patógenos, hormônios e metais pesados, os quais podem ser extremamente perigosos ao ambiente. Por outro lado, o uso de doses inferiores à necessidade de nutrientes das culturas poderá comprometer a produtividade das mesmas (ver capítulo de adubação orgânica).

4.1 – CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES EM RESÍDUOS ORGÂNICOS

Devido à baixa concentração de nutrientes dos resíduos orgânicos, é necessário aplicar volume maior de resíduos do que se fossem utilizados fertilizantes minerais, para suprir a mesma quantidade de nutrientes. Parte dos nutrientes está na forma orgânica, devendo estes serem mineralizados para se tornarem disponíveis às plantas. Além do fornecimento de nutrientes, os resíduos orgânicos, dependendo da quantidade usada, podem contribuir para a agregação do solo, melhorando a estrutura, a aeração, a drenagem e a capacidade de armazenamento de água.

Na Tabela 35, são apresentados os teores médios de carbono orgânico, de macronutrientes e de matéria seca em vários tipos de esterco e outros resíduos orgânicos utilizados na adubação das culturas. A concentração de nutrientes é expressa no material seco em estufa a 65° (os materiais orgânicos, mesmo aparentemente secos, ainda contêm água). Os resíduos orgânicos devem, sempre que possível, ser analisados previamente. Isso porque tanto a concentração de macro e micronutrientes como o teor de água podem variar muito,

conforme a origem do material, a espécie animal, a alimentação utilizada, a proporção entre os dejetos (fezes + urina), o material utilizado para cama e o manejo desses materiais orgânicos. Os valores das concentrações de nutrientes apresentados na Tabela 35 são indicados como referência, caso não se disponha da análise do material.

MATERIAL ORGÂNICO	C-org.	N ⁽²⁾	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	MATÉRIA SECA
----- % (m/m) -----							
Cama de frango (3-4 lotes) ⁽³⁾	30	3,2	3,5	2,5	4,0	0,8	75
Cama de frango (5-6 lotes)	28	3,5	3,8	3,0	4,2	0,9	75
Cama de frango (7-8 lotes)	25	3,8	4,0	3,5	4,5	1,0	75
Cama de peru (2 lotes)	23	5,0	4,0	4,0	3,7	0,8	75
Cama de poedeiras	30	1,6	4,9	1,9	14,4	0,9	72
Cama sobreposta de suínos	18	1,5	2,6	1,8	3,6	0,8	4,0
Esterco sólido de suínos	20	2,1	2,8	2,9	2,8	0,8	25
Esterco sólido de bovinos	30	1,5	1,4	1,5	0,8	0,5	20
Vermicomposto	17	1,5	1,3	1,7	1,4	0,5	50
Lodo de esgoto	30	3,2	3,7	0,5	3,2	1,2	5
Composto de lixo urbano	12	1,2	0,6	0,4	2,1	0,2	70
Cinza de casca de arroz	10	0,3	0,5	0,7	0,3	0,1	70
----- kg/m ³ -----							
Esterco líquido de suínos	9	2,8	2,4	1,5	2,0	0,8	
Esterco líquido de bovinos	13	1,4	0,8	1,4	1,2	0,4	
(1) Concentração calculada com base em material seco em estufa a 65°C. m/m = relação massa/massa. (2) A fração de N na forma amoniacal (N-NH ₃ e N-NH ₄ ⁺) é, em média, de 25% na cama de frangos, 15% na cama de poedeiras, 30% no lodo de esgoto, 25% no esterco líquido de bovinos e 50% no esterco líquido de suínos. (3) Indicações do número de lotes de animais que permanecem sobre a mesma cama.							

Tabela 35 – Concentrações médias de nutrientes e teor de matéria seca de alguns materiais orgânicos⁽¹⁾ (extraído de CQFS-RS/SC, 2004).

AGRICULTURA FAMILIAR E SUSTENTABILIDADE
FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

DENSIDADE ⁽²⁾	ESTERCO LÍQUIDO DE BOVINOS				ESTERCO LÍQUIDO DE SUÍNOS			
	MS	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MS	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	%(m/v)	-----kg/m ³ -----			%(m/v)	-----kg/m ³ -----		
1000	0,00	0,06	0,05	0,05	0,00	0,37	0,00	0,38
1001	0,00	0,13	0,09	0,12	0,10	0,52	0,11	0,51
1002	0,11	0,20	0,12	0,19	0,15	0,68	0,22	0,63
1003	0,34	0,26	0,16	0,25	0,20	0,83	0,37	0,69
1004	0,58	0,33	0,20	0,32	0,27	0,98	0,52	0,75
1005	0,81	0,40	0,24	0,38	0,50	1,13	0,67	0,81
1006	1,05	0,47	0,28	0,45	0,72	1,29	0,83	0,88
1007	1,28	0,54	0,31	0,51	0,94	1,44	0,98	0,94
1008	1,52	0,61	0,35	0,58	1,17	1,60	1,14	1,00
1009	1,75	0,68	0,39	0,64	1,39	1,75	1,29	1,06
1010	1,99	0,74	0,43	0,71	1,63	1,91	1,45	1,13
1011	2,22	0,81	0,46	0,77	1,85	2,06	1,60	1,19
1012	2,46	0,88	0,50	0,83	2,09	2,21	1,75	1,25
1013	2,69	0,95	0,54	0,90	2,32	2,37	1,90	1,31
1014	2,93	1,02	0,58	0,96	2,54	2,52	2,06	1,38
1015	3,16	1,09	0,61	1,03	2,76	2,67	2,21	1,44
1016	3,40	1,16	0,65	1,09	3,00	2,83	2,37	1,50
1017	3,63	1,22	0,69	1,16	3,23	2,98	2,52	1,56
1018	3,87	1,29	0,73	1,22	3,46	3,13	2,68	1,63
1019	4,10	1,36	0,77	1,29	3,68	3,28	2,85	1,69
1020	4,34	1,43	0,80	1,36	3,91	3,44	2,99	1,75
1021	4,57	1,50	0,84	1,42	4,14	3,60	3,14	1,81
1022	4,81	1,57	0,88	1,48	4,37	3,75	3,29	1,88
1023	5,04	1,63	0,92	1,54	4,60	3,90	3,44	1,94
1024	5,28	1,70	0,95	1,61	4,82	4,06	3,60	2,00
1025	5,51	1,77	0,99	1,67	5,05	4,21	3,75	2,06
1026	5,75	1,84	1,03	1,74	5,28	4,36	3,91	2,13
1027	5,98	1,90	1,07	1,80	5,51	4,51	4,06	2,19
1028	6,29	1,98	1,10	1,87	5,74	4,67	4,22	2,25
1029	6,45	2,05	1,14	1,93	5,96	4,82	4,37	2,31
1030	6,69	2,11	1,18	2,00	6,19	4,98	4,53	2,38
1031	6,92	2,18	1,22	2,06	6,41	5,13	4,68	2,44
1032	4,16	2,25	1,26	2,13	6,65	5,28	4,84	2,50
1033	7,39	2,32	1,29	2,19	6,87	5,43	4,99	2,56
1034	4,63	2,39	1,33	2,26	7,10	5,59	5,14	2,63
1035	7,86	2,46	1,37	2,32	7,32	5,74	5,29	2,69
1036	8,10	2,53	1,41	2,38	7,56	5,90	4,45	2,75
1037	8,33	2,59	1,44	2,45	7,78	6,05	5,60	2,81
1038	8,57	2,66	1,48	2,51	8,02	6,21	5,76	2,88
1039	8,80	2,73	1,52	2,58	8,24	6,36	5,91	2,94
1040	9,04	2,80	1,56	2,64	8,47	6,51	6,05	3,00
1041	9,27	2,87	1,59	2,71	8,69	6,66	6,20	3,06
1042	9,51	2,93	1,63	2,77	8,97	6,82	6,38	3,13
1043	9,74	3,00	1,67	2,84	9,18	6,97	6,53	3,19
1044	9,98	3,07	1,71	2,90	9,39	1,13	3,38	3,25
1045	10,21	3,14	1,71	2,97	9,61	7,28	6,83	3,32
1046	10,45	3,21	1,78	3,03	9,84	7,43	6,93	3,38
1047	10,68	3,28	1,82	3,09	10,06	7,58	7,12	3,44
1048	10,92	3,35	1,86	3,16	10,30	7,74	7,27	3,50
1049	11,15	3,42	1,90	3,22	10,52	7,89	7,42	3,56
1050	11,39	3,48	1,93	3,29	10,75	8,05	7,58	3,63

(1) Fonte: Barcellos (1992) e Scherer et al (1995^a,b).
(2) Densímetro INCOTREM com valores entre 1000 a 1100 kg/m³.

Tabela 36 – Relação entre a densidade e os valores de matéria seca (MS) e teores de nutrientes de esterco líquido de bovinos e suínos⁽¹⁾(extraído de CQFS-RS/SC, 2004).

Os dejetos de animais estabulados (suínos e bovinos de leite) são muitas vezes armazenados em esterqueiras, juntamente com água de lavagem, sendo retirados e transportados até as lavouras para serem aplicados por tanques espalhadores de esterco rebocados por trator. A quantidade de matéria seca e de nutrientes contidos nestas suspensões pode ser facilmente estimada pela densidade da mistura homogeneizada, com a utilização de um densímetro (Tabela 36). Quanto maior a densidade do material, maior o teor de sólidos e de nutrientes. As correções da leitura em função da temperatura são dadas na Tabela 37.

Para fazer a leitura dos valores de densidade, deve-se: a) homogeneizar completamente a biomassa na esterqueira; b) coletar o material em 4 ou 5 locais diferentes da superfície do líquido, colocando-o num recipiente com volume mínimo de 1.000 mL; c) homogeneizar a amostra com um bastão e posteriormente transferi-la para uma proveta de 500 mL, fazendo a leitura da densidade o mais rápido possível para evitar a sedimentação; d) corrigir o valor da densidade do esterco conforme a temperatura da biomassa no interior da proveta (Tabela 37); e) se a consistência da biomassa não permitir a leitura direta da densidade, diluir a metade do resíduo orgânico da proveta com igual volume de água e ler novamente a densidade. Utilizar a seguinte fórmula para o cálculo da densidade corrigida; $D = 1000 + (2 \times (\text{densidade} - 1.000))$, onde a densidade é a leitura do material já diluído na proveta.

TEMPERATURA(°C)	CORREÇÃO NO DENSÍMETRO
15,5 a 18,5	Diminuir 1 na escala
18,6 a 21,5	Não corrigir
21,6 a 24,5	Aumentar 1 na escala
24,6 a 27,0	Aumentar 2 na escala
27,1 a 29,5	Aumentar 3 na escala
29,6 a 32,0	Aumentar 4 na escala

Tabela 37 – Correção dos valores de densidade em função da temperatura de esterco líquido (extraído de CQFS-RS/SC, 2004).

4.2 – ÍNDICES DE EFICIÊNCIA DOS NUTRIENTES

Os resíduos orgânicos sólidos e líquidos apresentam concentrações e taxas de liberação de nutrientes no solo muito variáveis, as quais afetam a disponibilidade dos mesmos para as plantas. Em geral, os esterco sólidos e os resíduos orgânicos com altos teores de fibras e lignina apresentam maior relação C/N e menores quantidades de nutrientes na forma mineral, sendo decompostos mais lentamente no solo e liberando menores quantidades de nutrientes para as plantas. Entretanto, favorecem o acúmulo de matéria

orgânica no solo em relação aos esterco líquido que apresentam maior quantidade de nutrientes minerais prontamente disponíveis às plantas, considerando-se iguais adições de matéria seca.

Os índices de eficiência apresentados na Tabela 38 indicam a proporção da quantidade total dos nutrientes contidos nos resíduos orgânicos sólidos e líquidos, disponibilizada nos dois primeiros cultivos após a aplicação. A fração mineral do esterco e os elementos mineralizados no solo têm o mesmo efeito que os nutrientes contidos em fertilizantes minerais solúveis. Portanto, estão sujeitos às mesmas reações químicas dos íons já presentes no solo, tais como insolubilização de fósforo, lixiviação de nitrato, volatilização de amônia, nitrificação, imobilização microbiana, etc. Os índices de eficiência dos nutrientes (Tabela 38) mostram que os esterco de animais alimentados com rações concentradas apresentam maior disponibilidade inicial de nutrientes para as plantas do que os esterco de animais alimentados com volumosos e criados a pasto, ou com a presença de grandes quantidades de cama. O potássio de adubos orgânicos torna-se inteiramente disponível no primeiro cultivo, por não fazer parte de nenhum composto orgânico que necessite de mineralização microbiana.

RESÍDUO ORGÂNICO	NUTRIENTE ⁽¹⁾	ÍNDICE DE EFICIÊNCIA	
		1º CULTIVO	2º CULTIVO
Cama de frango	N	0,5	0,2
	P	0,8	0,2
	K	1,0	-
Esterco sólido de suínos	N	0,6	0,2
	P	0,8	0,2
	K	1,0	-
Esterco sólido de bovinos	N	0,3	0,2
	P	0,8	0,2
	K	1,0	-
Esterco líquido de suínos	N	0,8	-
	P	0,9	0,1
	K	1,0	-
Esterco líquido de bovinos	N	0,5	0,2
	P	0,8	0,2
	K	1,0	-
Outros resíduos orgânicos	N	0,5	0,2
	P	0,7	0,2
	K	1,0	-
Lodo de esgoto e composto de lixo	N	0,2	-

Tabela 38 – Índices de eficiência dos nutrientes no solo de diferentes tipos de esterco e resíduos orgânicos em cultivos sucessivos (valores médios para cada fonte) (extraído de CQFS-RS/SC, 2004).

4.3 – CÁLCULO DAS QUANTIDADES DE NUTRIENTES A APLICAR

Para os materiais listados na Tabela 35, à exceção dos esterco líquidos, as quantidades disponíveis (QD) de N, de P_2O_5 e de K_2O , em kg/ha, podem ser calculadas pela fórmula:

$$QD = A \times B/100 \times C/100 \times D$$

em que:

- **A** é a quantidade do material aplicado, em kg/ha;
- **B** é a porcentagem de matéria seca do material;
- **C** é a porcentagem do nutriente na matéria seca; e,
- **D** é o índice de eficiência de cada nutriente, indicado na Tabela 38, aplicável conforme o cultivo (1° ou 2°).

Usando o exemplo da aplicação de 3 toneladas de esterco de aves (3-4 lotes) cujos teores de N, P_2O_5 e K_2O são 3,2; 3,5 e 2,5% e tem 75% de matéria seca (Tabela 35) e um índice de eficiência para o primeiro cultivo de 0,5; 0,8 e 1,0, respectivamente (Tabela 38), tem-se:

- N (kg/ha) = $3000 \text{ kg/ha} \times 75/100 \times 3,2/100 \times 0,5 = 36$
- P_2O_5 (kg/ha) = $3000 \text{ kg/ha} \times 75/100 \times 3,5/100 \times 0,8 = 63$
- K_2O (kg/ha) = $3000 \text{ kg/ha} \times 75/100 \times 2,5/100 \times 1,0 = 56,2$

Para os esterco líquidos, as quantidades disponíveis (QD) de N, P_2O_5 e K_2O podem ser calculadas pela equação:

$$QD = A \times B \times D$$

em que:

- **A** é a quantidade do material aplicado, em m^3 /ha;
- **B** é a concentração do nutriente no produto, em kg/m^3 ; e,
- **D** é o índice de eficiência de cada nutriente, indicado na Tabela 38, aplicável conforme o cultivo (1° ou 2°).

Usando o exemplo da aplicação de $30 m^3$ de esterco líquido de suínos, cujas concentrações médias de N, P_2O_5 e K_2O são 2,8; 2,4 e $1,5 \text{ kg}/m^3$ (Tabela 35) e um índice de eficiência para o primeiro cultivo de 0,8; 0,9 e 1,0, respectivamente (Tabela 38), tem-se:

- N (kg/ha) = $30 m^3 \times 2,8 \text{ kg}/m^3 \times 0,8 = 67,2$
- P_2O_5 (kg/ha) = $30 m^3 \times 2,4 \text{ kg}/m^3 \times 0,8 = 64,8$
- K_2O (kg/ha) = $30 m^3 \times 1,5 \text{ kg}/m^3 \times 1,0 = 45$

4.4 – USO CONJUNTO DA ADUBAÇÃO ORGÂNICA E MINERAL

Em qualquer sistema de cultivo, a diferença entre a quantidade de cada nutriente exigida por uma planta e a quantidade disponibilizada pelo solo (às vezes a água e o ar) DIFICILMENTE será suprida de forma equilibrada com o uso exclusivo de materiais orgânicos, pois as relações das concentrações de N, de P_2O_5 e de K_2O nesses materiais diferem das relações das quantidades necessárias a serem adicionadas para suprir as exigências das plantas. Nesse sentido, dá para se considerar que os resíduos orgânicos são fontes desequilibradas de nutrientes. Isso não é um demérito dos resíduos, mas sim uma simples constatação científica e prática. Obviamente que é muito mais fácil suprir essa diferença (exigência da planta – oferta do ambiente) com fonte de apenas um nutriente. Por exemplo, se falta potássio é fácil de fornecer exatamente a quantidade com uma fonte que contenha somente potássio, como o cloreto de potássio. Faltando o potássio, é impossível repor somente ele com o uso de dejetos, pois dentro do dejetos há todos os nutrientes essenciais às plantas. Quando se adiciona excesso de um elemento químico pode ser que o solo não suporte essa carga e o transfira à água ou ao ar, uma vez que o solo é aberto, coloidal e frágil.

O manejo adequado do solo e o uso de rotação de culturas (cultivos consorciados é mais eficiente ainda) podem auxiliar no REEQUILÍBRIO da adubação orgânica. No entanto, pode também limitar o uso de dejetos orgânicos. Por exemplo: imagine adicionar esterco de peru peletizado (formato como ração) para produção de soja orgânica. O que acha dessa técnica? Está em desacordo com a recomendação agrônômica e ambiental. Por quê? Agronomicamente, a soja é uma leguminosa com domínio total do processo de fixação biológica do nitrogênio. Então não há necessidade de se adicionar nitrogênio. Há dados, inclusive, mostrando que adição de nitrogênio na semeadura da soja pode levar a decréscimo de produtividade pela limitação à colonização da bactéria no sistema radicular e faltará nitrogênio durante o crescimento da soja. Muitos pensam que por o esterco conter nitrogênio e ser orgânico, não prejudica o solo e as plantas. Isso não é verdade. Faz mal sim, tanto a planta, quanto ao solo. Ambientalmente, o excesso de nitrogênio aplicado transforma-se rapidamente em nitrato e contamina o lençol freático. É por isso que em regiões produtoras de suínos e aves praticamente não há mais água potável disponível (além do nitrato, há contaminação por coliformes, metais pesados, etc). Então quer dizer que não dá para plantar soja com dejetos? Dá sim, mas tem que se adotar outra estratégia. Por exemplo, adicionar o dejetos na cultura de inverno (aveia, trigo, cevada, etc) e semear a soja na sequência. Logicamente que deverão ser ajustados os teores dos outros nutrientes com fontes minerais, especialmente para fornecer fósforo e potássio.

Desse modo, o uso conjunto de resíduos orgânicos e fertilizantes minerais permite otimizar o fornecimento dos nutrientes, mas o uso conjunto de fertilizantes orgânicos e minerais requer o estabelecimento de um programa de adubação para otimizar a contribuição dos dois tipos de produtos no cálculo das doses indicadas para as culturas do sistema. Nesse caso, deverão ser consideradas as necessidades dos cultivos e as características referentes aos resíduos orgânicos. Para melhorar o aproveitamento dos resíduos orgânicos, recomenda-se ajustar a adubação pelo nutriente cuja quantidade seja suprida com a menor dose de resíduo orgânico. Para os outros nutrientes, calcula-se a contribuição referente à quantidade de adubo orgânico aplicado e suplementa-se o restante com fertilizantes minerais.

Como exemplo, considerando-se a recomendação de adubação apresentada na Tabela 39, consistindo das culturas de trigo (1º cultivo) e de milho (2º cultivo), a programação de adubação pode ser a seguinte:

CULTURA(2)	CAMA DE FRANGO	RECOMENDAÇÃO			NUTRIENTES SUPRIDOS PELA ADUBAÇÃO					
					ORGÂNICA			MINERAL		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	t/ha	----- kg/ha -----								
Trigo (1º cultivo)	2,7	60	70	60	35	62	60	25	8	0
Milho (2º cultivo)	2,2	90	65	50	14+29	15+50	50	47	0	0

Tabela 39 – Recomendações de adubação e quantidades de nutrientes supridos pela adubação orgânica (cama de frangos de 5 – 6 lotes) e complementações com fertilizantes minerais para uma sequência de dois cultivos⁽¹⁾ (extraído de CQFS-RS/SC, 2004).

- Supondo o uso de cama de frango (5 - 6 lotes), as quantidades de nutrientes podem ser calculadas pelos teores de N, de P₂O₅ e de K₂O apresentados na Tabela 35;
- Para calcular a quantidade de adubo orgânico necessário para o suprimento de nutrientes para as culturas de trigo e de milho, pode-se fixar, por exemplo, a recomendação de potássio, a ser totalmente suprido pela cama de frango. O cálculo da quantidade de adubo que deverá ser utilizado para os dois cultivos será:

Primeiro cultivo (trigo):

$$K_2O \text{ necessário} = A \times B/100 \times C/100 \times D$$

$$60 \text{ kg de } K_2O/ha = A \times 75/100 \times 3,0/100 \times 1,0$$

$$A = 2,7 \text{ t/ha de cama de frangos.}$$

Essa quantidade de adubo orgânico fornece no primeiro cultivo 35 kg de N e 62 kg de P₂O₅, ainda, 14 kg de N e 15 kg de P₂O₅ no segundo cultivo (milho).

Segundo cultivo (milho):

50 kg de K_2O /ha = $A \times 75/100 \times 3,0/100 \times 1,0$

$A = 2,2$ t/ha de cama de frango.

Essa quantidade de cama de frango fornece 29 kg de N e 50 kg de P_2O_5 e 50 kg de K_2O para o milho e mais 12 kg de N e 13 kg de P_2O_5 como efeito residual para a próxima cultura;

- c. Desta forma, obtêm-se os valores totais de 35 kg de N, 62 kg de P_2O_5 e 60 kg de K_2O , no primeiro cultivo; 43 kg de N, 65 kg de P_2O_5 e 50 kg de K_2O no segundo cultivo; supridos pela adubação orgânica;
- d. A adubação nitrogenada nas culturas de trigo e de milho pode ser completada pela aplicação de N em cobertura (25 kg/ha para o trigo e 47 kg/ha para o milho). Deve-se completar também a adubação fosfatada na cultura do trigo (8 kg de P_2O_5 /ha).

Outros resíduos orgânicos e compostos feitos com os mais diferentes materiais também podem ser utilizados na adubação. O cálculo das quantidades a aplicar apresenta três dificuldades:

- a. A composição química dos materiais é muito variável; o vermicomposto, por exemplo, pode apresentar um teor de N variável entre 0,6 e 2,5% (Departamento de Solos, UFRGS); a análise prévia do material neste caso é necessária; e,
- b. O índice de eficiência de liberação dos nutrientes no solo pode ser muito diferente daquele especificado na Tabela 38.
- c. Como a maioria dos resíduos orgânicos com alta relação C/N não supre as quantidades adequadas de N para o crescimento e a produção econômica de muitas culturas, normalmente há necessidade de utilizar fertilizantes nitrogenados minerais para complementar a necessidade das plantas.

4.5 – MANEJO DOS ADUBOS ORGÂNICOS

Os materiais orgânicos devem ser aplicados ao solo imediatamente antes da semeadura ou plantio, para possibilitar melhor aproveitamento dos nutrientes, minimizando as perdas por escoamento superficial (em áreas sem revolvimento de solo) e por lixiviação de nitrato. Para diminuir as perdas de nitrogênio por volatilização de amônia, os esterco devem ser aplicados em dias com temperatura baixa, ou antes, de uma chuva ou irrigação. A maior perda de amônia ocorre durante o transporte e a aplicação do produto.

Não se recomenda a utilização de resíduos orgânicos com alto teor de N na adubação de leguminosas que apresentam boa capacidade de fixar este nutriente simbioticamente, já que a aplicação de N mineral inibe o processo de fixação biológica de N. Em um

sistema de rotação de culturas, deve-se aplicar o adubo orgânico no cultivo de cereais e cultivar a leguminosa em sucessão, para aproveitamento do efeito residual.

O material orgânico sólido deve ser armazenado preferencialmente com baixo teor de umidade e em locais cobertos, para evitar perdas de amônia por volatilização e de nitrato e potássio, por lixiviação. Deve-se evitar a entrada da água de chuva nas esterqueiras e o excesso de água de lavagem dos estábulos, para não diluir excessivamente o material; o teor de matéria seca deve ser mantido entre 6% e 7% para o esterco líquido de suínos e entre 7% e 8% para o esterco líquido de bovinos.

A utilização continuada de adubos orgânicos pode melhorar as propriedades físicas do solo (porosidade, capacidade de retenção de água) e aumentar alguns atributos químicos (CTC, teor de P e de matéria orgânica, etc). Porém o uso excessivo de adubos orgânicos proporcionará os mesmos problemas que os decorrentes do uso excessivo de fertilizantes minerais, principalmente aqueles devidos à lixiviação de nitrato e o transporte de P para cursos d'água. Além disso, muitos adubos orgânicos, especialmente os derivados de animais alimentados com ração, apresentam teor elevado de alguns micronutrientes (Fe, Zn, Cu), que são acrescentados à ração na forma de sais. Por outro lado, os adubos derivados de lodo de esgoto ou de resíduos industriais podem apresentar metais pesados indesejáveis na cadeia alimentar. Ainda é importante lembrar que os resíduos orgânicos incompletamente compostados podem ser fonte de organismos patogênicos (fungos, bactérias, vírus, helmintos).

Nas proximidades de grandes cidades ou em criações de animais confinados, são disponibilizadas grandes quantidades de resíduos, como lodo de esgoto, composto de lixo, dejetos de suínos e outros. Todos esses produtos apresentam valor fertilizante, entretanto o transporte para áreas distantes é oneroso e, em consequência, muitas vezes são aplicadas quantidades excessivas ao solo das proximidades dos pontos de geração desses resíduos, podendo causar prejuízos ambientais. Os principais impactos ambientais negativos dessa prática são:

- a. Acúmulo de nitrato em águas superficiais e/ou subterrâneas;
- b. Aumento do teor de fósforo em águas superficiais, devido ao escoamento de material orgânico solúvel ou particulado, causado por enxurrada ou descarga direta nos cursos d'água, provocando eutrofização;
- c. Aumento da carga orgânica e da demanda biológica de oxigênio (DBO) nos corpos d'água, com prejuízo para a fauna aquática;
- d. Aumento excessivo do pH do solo, devido à aplicação de resíduo alcalino; e,
- e. Acúmulo de metais pesados no solo, tornando-o impróprio à produção de alimentos para consumo humano.

Para evitar a poluição ambiental, que pode ocorrer com a aplicação de grandes quantidades de resíduos orgânicos, deve-se:

- a. Deixar de aplicar os resíduos em áreas próximas a cursos d'água (permanentes ou vias de drenagem intermitente);
- b. Aplicar os resíduos subsuperficialmente (não é compatível com o plantio direto), deixando, de preferência, a superfície do solo irregular; outras práticas de controle à erosão são também essenciais (terraceamento, cordões vegetados, etc.);
- c. Deixar de aplicar quantidades que liberem 20% a mais do que o nitrogênio recomendado para a cultura, conforme cálculo exemplificado anteriormente. A dificuldade neste caso é a estimativa da taxa de decomposição;
- d. Deixar de aplicar quantidades que, cumulativamente, possam ultrapassar os limites de metais estabelecidos pela legislação; e,
- e. Manter a vegetação ripária (mata ciliar, próxima dos recursos hídricos).

A utilização de resíduos industriais em áreas florestadas é uma alternativa de descarte, tendo em vista o não aproveitamento dos produtos florestais na alimentação. O uso de resíduos em solos arenosos deve ser feito com cuidados adicionais, pois a fração biodisponível dos metais às plantas e aos micro-organismos pode ser maior do que em solos argilosos. No caso de aplicação de resíduos orgânicos em áreas de pastagem natural, devem ser introduzidas espécies forrageiras de maior potencial de produção de massa e aplicadas doses menores no período de inverno.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10. ed. Porto Alegre: **SBCS-Núcleo Regional Sul**, 2004. 400p.

Os solos de várzea apresentam drenagem deficiente e, em sua maioria, densidade naturalmente elevada, relação micro/macro poros muito alta, baixa capacidade de armazenamento de água (principalmente aqueles com horizonte A raso de textura franco arenosa) e consistência desfavorável (muito duros quando secos e plásticos e pegajosos quando úmidos), dificultando o cultivo de espécies de sequeiro. Alguns solos apresentam-se ainda com fertilidade baixa a média, principalmente os solos com baixos teores de matéria orgânica e de textura arenosa e franco arenosa. Parte dessas áreas são preferencialmente utilizadas para o cultivo de arroz irrigado por alagamento, tendo em vista que esta espécie apresenta estruturas (aerênquimas) capazes de propiciar a difusão do oxigênio desde a parte aérea até o sistema radicular, garantindo a atividade metabólica aeróbica mesmo na condição de solo saturado com água.

O Estado do Rio Grande do Sul ocupa anualmente uma área próxima de um milhão de hectares com a cultura do arroz irrigado, a qual apresenta produtividade média, na safra 2007/08, de cerca de 7.000 kg ha⁻¹. Além disso, sob um total aproximado de 8.000 agricultores no RS (IRGA, 2008), responsáveis por aproximadamente 61% da produção brasileira de arroz (Lavoura Arrozeira, 2008), 37% cultivam entre 1 e 25 ha (IRGA, 2008). Nesse mesmo levantamento, ao considerar uma área de até 75 ha, o número de produtores passa a representar 64% daqueles envolvidos com a produção orizícola no Estado. Essas informações ressaltam a forte importância regional da cultura do arroz irrigado e seus reflexos para a produção brasileira desse grão que é ingrediente básico da alimentação para a maioria da população.

O arroz pode ser cultivado em diferentes sistemas. O mais comum é o sistema convencional, onde o solo da área é mobilizado para a semeadura do arroz e o alagamento do solo ocorre após a emergência das plantas. Os sistemas de plantio direto ou de cultivo mínimo diferem um pouco do que conhecemos para os cultivos de sequeiro. Nesses casos, o solo é preparado no verão ou no inverno/primavera, respectivamente, permitindo o crescimento de culturas antecessoras ao arroz que é semeado diretamente sobre a resteva dessas culturas. O alagamento do solo ocorre após a emergência das plantas. O arroz também pode ser cultivado no sistema pré-germinado, no qual a semente é colocado com estágio iniciado de germinação sobre o solo com uma mínima lâmina de água. Após seu estabelecimento e crescimento, a lâmina de água é elevada. Também pode-se cultivar o solo através do transplante de mudas (muito comum em países asiáticos), o qual uma plântula é transplantada para a área já submetida ao alagamento. De modo geral, separa-se os sistemas naqueles que a semeadura ocorre em solo seco (convencional, plantio direto, cultivo mínimo) e em solo alagado (pré-germinado e transplante de mudas) (Figura 30).

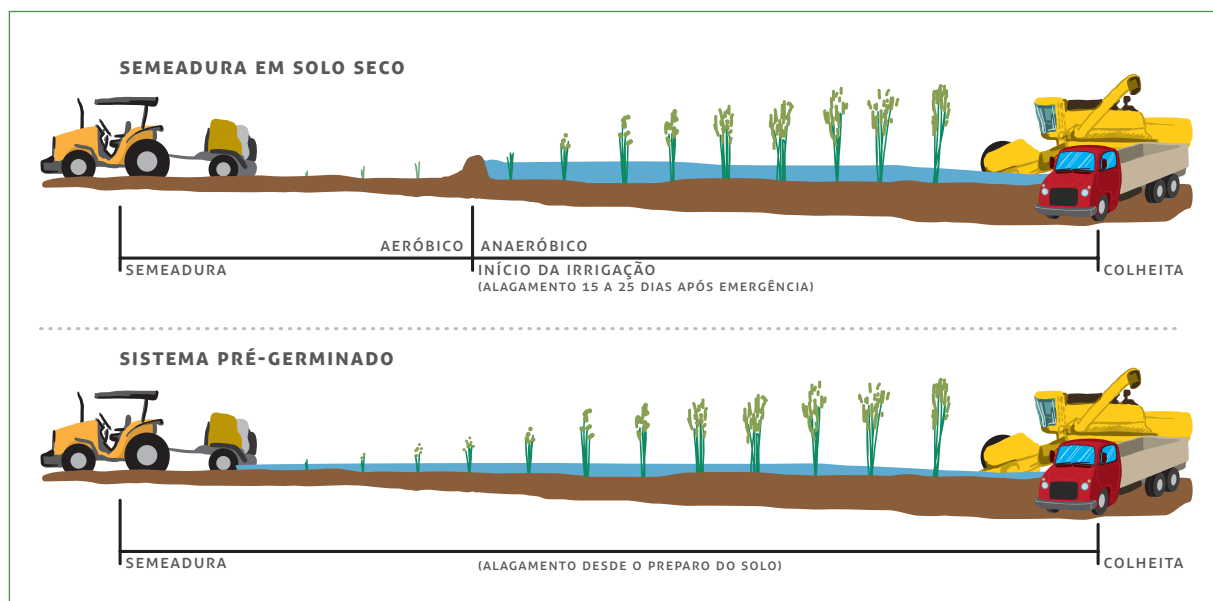


Figura 30 – Representação esquemática dos sistemas de cultivo de arroz e a condição de aerobiose.

O ambiente alagado é muito diferente do ambiente drenado, tornando as características do solo submetido ao alagamento diferentes daquelas em condições de sequeiro. A simples entrada da água na área de cultivo causa diversas alterações no solo, tanto de ordem física, como biológica e química, com reflexos diretos sobre a disponibilidade de nutrientes e sobre a dinâmica da MOS. Todos esses processos afetam a dinâmica dos nutrientes e inclusive na ocorrência de alguns distúrbios nutricionais específicos, com a toxidez por ácidos orgânicos e a toxidez por ferro.

CAPÍTULO 1 – ALTERAÇÕES NO SOLO PROVOCADAS PELO ALAGAMENTO

No solo submerso, uma das principais consequências da saturação dos espaços porosos com água é o rápido esgotamento do oxigênio elementar (O_2), já que ele é consumido pela respiração dos microrganismos e não se difunde facilmente do ar para a água. Em consequência, o metabolismo microbiano predominante no solo é alterado, passando do aeróbico para o anaeróbico, com reflexos nos ciclos biogeoquímicos do carbono e de vários outros elementos (Figura 31).



Figura 31 – Representação esquemática das alterações no solo provocadas pelo alagamento.

Assim, a disponibilidade de nutrientes e a transferência dos elementos para os sistemas aquáticos e atmosfera são diferenciados em relação aos solos não saturados. De outra forma, a presença abundante de água estabelece uma relação mais estreita entre o uso do solo e a contaminação da água, com especial destaque para a transferência de agrotóxicos dos solos agrícolas. A literatura internacional e nacional é farta em documentos que relatam as modificações em atributos químicos, físicos e biológicos relacionados aos ambientes anaeróbicos (Ponnanperuma, 1972; Yoshida, 1981; Patrick Jr., 1982; Savant & De Datta, 1982; Watanabe, 1984; Vahl, 1999; Vahl & Sousa, 2004; Sousa et al., 2006; Marchesan et al, 2008; Silva et al., 2008), sendo apresentados nesse texto as principais modificações.

ALTERAÇÕES FÍSICAS

Com a entrada de água durante a irrigação, esta ocupa todo o espaço poroso do solo e, em decorrência, há a expulsão do ar. Entretanto, parte do ar é comprimida, podendo causar a destruição dos agregados, afetando a estrutura do solo. Não há uma preocupação direta com a retenção de água e oxigênio porque o solo é mantido

com lâmina de água durante o cultivo de arroz e a demanda de oxigênio das raízes é suprida pelos aerênquimas das plantas.

Em termos de presença de oxigênio, os solos alagados existem duas camadas distintas: uma camada superficial oxidada de pouca espessura e uma camada reduzida ou anaeróbica (Figura 32). A espessura da camada de oxigênio depende da taxa de movimento do oxigênio através da camada de água e solo e da taxa de consumo deste oxigênio pelos microrganismos. O fornecimento de oxigênio ao solo alagado é realizado por dois caminhos: 1) transporte de oxigênio através da água e consumo na interface solo-água e 2) transporte de oxigênio através da parte aérea da planta até a rizosfera.

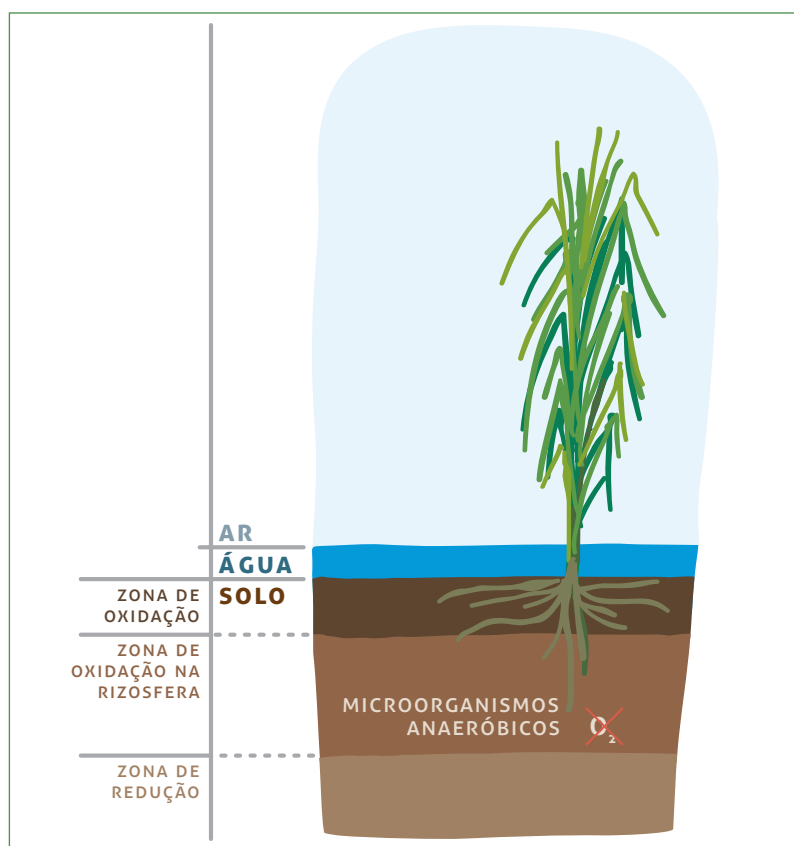


Figura 32 – Representação esquemática das características do solo alagado para cultivo de arroz.

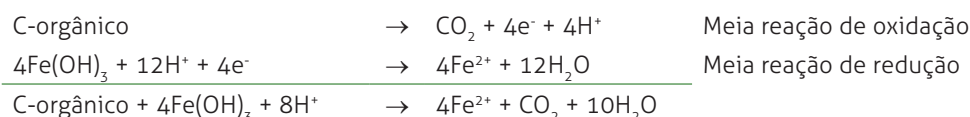
ALTERAÇÕES BIOLÓGICAS

Na presença de oxigênio molecular (O_2) os microrganismos presentes no solo apresentam metabolismo aeróbico, ou seja, utilizam a energia liberada da oxidação do carbono (C) orgânico a gás carbônico (CO_2), utilizando o O_2 como receptor final de elétrons, que é reduzido à água (H_2O). Com o alagamento induz o solo a uma condição de anaerobiose e, após a depleção do oxigênio que o solo possuía, os microrganismos aeróbicos morrem, permanecem inativos no solo ou

modificam seu metabolismo. Isso ocorre quando o volume de atmosfera de O_2 ficar inferior a 1%, neste meio sobrevivem e proliferam os organismos anaeróbicos, desenvolvendo essencialmente dois tipos de metabolismo energético: respiração anaeróbica e fermentação.

Assim, a oxidação dos compostos orgânicos e o metabolismo gerador de energia na condição de anaerobiose tornam-se possíveis pelas reações finais de transferência de elétrons de compostos inorgânicos do solo, como nitrato (NO_3^-), óxidos mangânicos (Mn^{3+}), óxidos férricos (Fe^{3+}) e sulfato (SO_4^{-2}). A partir desses compostos são gerados, respectivamente, óxidos de nitrogênio (N_2O e NO) e/ou nitrogênio molecular (N_2), compostos manganosos (Mn^{+2}), compostos ferrosos (Fe^{+2}), e sulfetos (compostos contendo S^{-2} , principalmente H_2S – gás sulfídrico ou sulfeto de hidrogênio – e com o ferro como o FeS – sulfeto de ferro). Essas reações já exemplificam a mudança de forma que os elementos podem sofrer como resultado do ambiente alagado.

O processo pode ser representado pela seguinte reação de oxirredução, tomando o $Fe(III)$ como exemplo:



No exemplo, o ferro foi reduzido, pois passou de valência $+3$ para valência $+2$, e provocou a oxidação do C orgânico que por sua vez foi o agente redutor do ferro. A mudança do estado de oxirredução dos elementos em um solo alagado altera o equilíbrio e a solubilidade dos compostos, o que afeta profundamente a distribuição destes no ambiente, com reflexos marcantes sobre as comunidades vegetais, onde se inclui o arroz irrigado. Esse efeito pode ser visualizado pelo aumento da concentração de ferro na solução com o alagamento do solo (Figura 33).

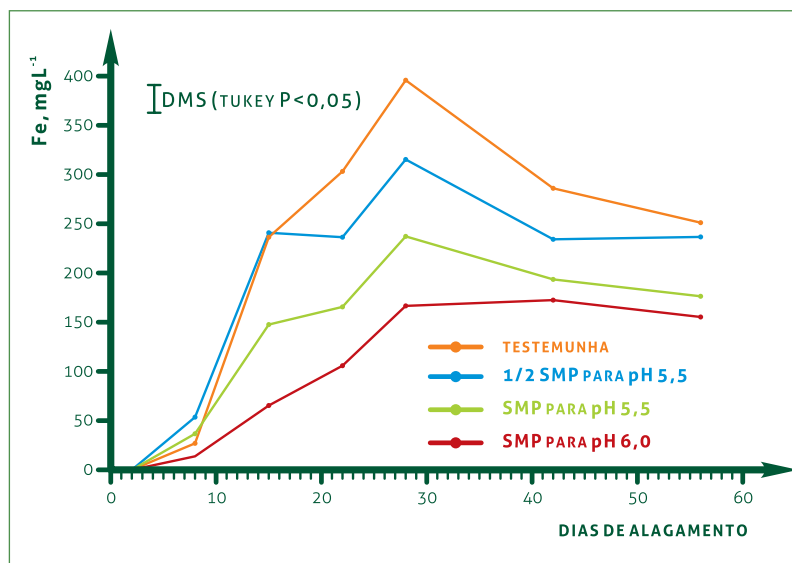


Figura 33 – Teores de ferro na solução do solo em função do tempo de alagamento e da aplicação de calcário.

Outro tipo de metabolismo possível em ambientes anaeróbicos é a fermentação, realizada por algumas bactérias e leveduras. Esse tipo de metabolismo produtor de energia faz uso de compostos orgânicos do meio ou subprodutos das rotas metabólicas como receptores de elétrons no processo de oxirredução. Caracteriza-se pela baixa produção de CO₂ e pela formação de compostos orgânicos reduzidos de cadeia curta. A fermentação, embora também degradativa, não envolve receptores externos de elétrons, à exceção da fermentação do acetato a CH₄. Todavia, o papel da fermentação é importante, pois promove a quebra de substratos orgânicos complexos, antes da oxidação, resultando em uma série de substâncias, muitas delas transitórias e não encontradas em solos oxidados.

Em solos alagados a decomposição anaeróbia da MOS ocorre de forma mais lenta do que em solos drenados porque um grupo menor e menos eficiente de bactérias realizam essa função nestas condições, favorecendo seu acúmulo neste ambiente. Isso explica o porquê dos maiores teores de MOS em áreas alagadas. Entretanto, com o cultivo dessas áreas e a ocorrência de ciclos de umedecimento e secagem, os teores de MOS em solos de várzea podem ser reduzidos para valores similares aos solos de sequeiro.

ALTERAÇÕES QUÍMICAS

As reações que ocorrem a partir das condições de solo saturado com água apresentam efeitos importantes sobre a disponibilidade de nutrientes, pois ocorrem modificações na composição da solução do solo. Um dos reflexos iniciais é a elevação natural do pH pelo consumo de H⁺ no curso das reações redox com conseqüente decréscimo

no potencial redox. Na sequência ocorre a desnitrificação do NO_3^- , que pode ser reduzido a N_2 ou N_2O , que são voláteis, resultando em perdas de N do sistema solo. Isso explica o porquê da não recomendação da aplicação de fontes de N sob a forma nítrica quando o solo está alagado. A ausência de O_2 também interrompe o processo de nitrificação, favorecendo o acúmulo de NH_4^+ no ambiente alagado, pois as bactérias nitrificadoras são aeróbicas obrigatórias. Desta forma, em ambientes alagados, o N tende a se acumular sob a forma de amônio. O NH_4^+ liberado pela mineralização da MOS mediante atividade microbiana anaeróbia pode ser retido na CTC do solo, absorvido pelas plantas, imobilizado na biomassa microbiana e, sofrer nitrificação em regiões aeróbicas, especialmente a rizosfera. Caso o NO_3^- gerado nestas zonas oxidadas difunda para regiões de anaerobiose, esta também pode ser perdida por denitrificação.

Também, ocorre a elevação das concentrações de Mn^{2+} e Fe^{2+} , graças a maior solubilidade desses elementos nas formas reduzidas (Figura 5). O principal reflexo é a possibilidade de ocorrência de toxidez por Fe^{2+} em cultivares sensíveis de arroz irrigado. Na sequência, pode haver diminuição dos teores de SO_4^{2-} , pela transformação para H_2S . Indiretamente, outros elementos como o P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , embora não envolvidos diretamente em reações redox, podem apresentar elevação nos teores da solução do solo como reflexo das alterações eletroquímicas já citadas anteriormente. No caso do P, a solubilização dos compostos de Fe^{3+} liberam o fosfato adsorvido, aumentando sua disponibilidade às plantas. De modo semelhante, a maior quantidade de Fe^{2+} e Mn^{2+} na solução do solo poderá deslocar outros cátions da CTC, aumentando a disponibilidade de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , por exemplo. Todas as alterações têm reflexo na nutrição da cultura do arroz, determinando também o sistema de recomendação de calagem e adubação para esta cultura.

CAPÍTULO 2 – O ALAGAMENTO E A OCORRÊNCIA DE COMPOSTOS TÓXICOS E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA

TOXIDEZ POR FERRO

Conforme abordado anteriormente, uma das reações de redução envolve a passagem do Fe^{3+} da estrutura dos óxidos para Fe^{2+} , que é solúvel (Figura 33). Embora o Fe^{2+} seja um nutriente essencial às plantas e esse aumento da solubilidade pudesse ser benéfico ao arroz, a quantidade de ferro na solução do solo pode atingir níveis tóxicos às plantas de arroz. A sintomatologia da toxidez de Fe^{2+} pode ocorrer de duas formas: o bronzeamento ou a toxidez direta ocorre quando o Fe^{2+} é absorvido em excesso, causando a morte das célu-

las onde ele é depositado, caracterizado por pontuações castanho-escuras nas folhas; e o alaranjamento ou a toxidez indireta, que ocorre devido a presença de Fe^{2+} em excesso na solução do solo que pode inibir o transporte e/ou a utilização de outros nutrientes, causando um desbalanceamento nutricional, caracterizado pela coloração alaranjada das folhas que evolui do ápice para a base.

No RS, não existiam informações a respeito da ocorrência de toxidez por Fe^{2+} até fins da década de 70, quando predominavam cultivares do tipo tradicional ou intermediário. Com o surgimento das cultivares modernas a partir da década de 80, os sintomas de toxidez por Fe^{2+} passaram a ser observados com maior frequência. Em levantamento feito na década de 80 para o Estado do RS, 95% dos municípios arrozeiros apresentaram cultivos com sintomas de toxidez por Fe^{2+} , com maior intensidade nas regiões da Campanha e Fronteira Oeste. Este cenário foi parcialmente transformado com o surgimento de cultivares tolerantes à toxidez por ferro a partir da década de 90, mas o problema ainda persiste com maior ou menor intensidade em todas as regiões.

É muito difícil estabelecer as condições necessárias para estabelecer a ocorrência de toxidez por Fe^{2+} , devido a outros fatores envolvidos no processo. De maneira geral, os níveis de Fe^{2+} na solução irão depender de fatores como teor de matéria orgânica, temperatura, características eletroquímicas de superfície, tempo de alagamento, a natureza, grau de cristalinidade e o teor dos óxidos de Fe e o pH inicial. Atualmente há uma indicação de proposta para diagnóstico da probabilidade de ocorrência de toxidez por Fe^{2+} na lavoura (SOSBAI 2007), baseado no teor de Fe extraído por oxalato de amônio pH 6,0 (Fe_o); no entanto, ainda sem uma consolidação por parte dos agricultores e técnicos. Entre as práticas de manejo recomendadas para as áreas com toxidez de ferro está a calagem do solo, com indicação de elevar o valor de pH até próximo de 6,0, de modo localizado nas áreas com maior probabilidade de ocorrência de toxidez por Fe^{2+} , como forma de minimizar seus sintomas (SOSBAI, 2007).

ÁCIDOS ORGÂNICOS

Outro fator de toxidez para o arroz é a produção de ácidos orgânicos. Na fermentação, os microrganismos usam o $NADH_2$ produzido pela glicólise para reduzir o piruvato à formação de vários ácidos orgânicos, tais como láctico, acético, propiônico, fórmico e butírico, ou álcoois tais como etanol e butanol. Os ácidos orgânicos de cadeia curta como fórmico, acético, propiônico e butírico são os principais ácidos formados, e entre eles o acético é o produzido em maior concentração, podendo atingir 60% do total de ácidos na solução do solo alagado. Esses ácidos orgânicos são inibidores do crescimento das plantas de arroz, pelos seus efeitos de redução da respiração aeróbica das raízes,

diminuindo a absorção de nutrientes. A toxidez por ácidos orgânicos em arroz irrigado se manifesta nas fases iniciais do desenvolvimento da planta, caracterizando-se por menor taxa de germinação, menor crescimento radicular e menor peso e altura de plantas. Em casos de toxidez mais severa, os prejuízos ao crescimento das plantas podem se refletir em outras fases, ocorrendo menos perfilhamento, menor absorção de nutrientes e menor rendimento de grãos.

Os ácidos orgânicos podem começar a acumular em solos alagados onde foram adicionados resíduos orgânicos a partir do primeiro dia de alagamento. Normalmente a concentração dos ácidos é baixa nos primeiros dias, atingindo concentração máxima entre duas a quatro semanas de alagamento. A seguir, a concentração diminui até atingir valores estáveis e baixos (Figura 34). O pico de liberação dos ácidos varia em função das características do solo, da temperatura, das características e da quantidade de resíduo e do tipo de ácido considerado, ocorrendo, normalmente, entre 3 e 28 dias de alagamento.

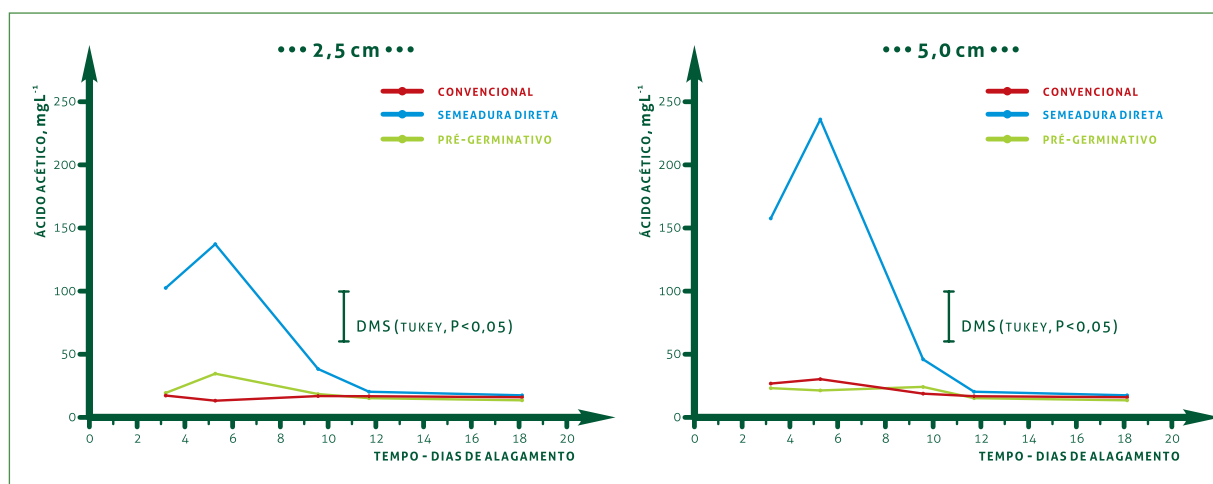


Figura 34 – Concentração de ácido acético na solução de um gleissolo, em duas profundidades e três sistemas de cultivo de arroz.

As maiores concentrações de ácidos orgânicos ocorrem em solos ricos em matéria orgânica ou quando são incorporados resíduos orgânicos próximos ao início do período de alagamento. A produção de ácidos orgânicos é diretamente proporcional à quantidade de resíduos adicionada e depende das características dos resíduos, como relação C:N e teor de lignina, lipídios e proteínas. Deste modo, a produção de ácidos orgânicos é maior quando resíduos de leguminosas são aplicados ao solo, com picos de liberação dos ácidos ocorrendo mais cedo. Estudos ainda precisam ser conduzidos no que se refere à quantidade máxima de resíduos que podem ser deixados em superfície no sistema plantio direto de arroz, ou ainda que procedimentos de manejo dos resíduos devam ser realizados para minimizar os efeitos tóxicos dos ácidos orgânicos.

SULFETO DE HIDROGÊNIO

Outro composto considerado tóxico para o arroz é o sulfeto de hidrogênio, que pode ser produzido tanto pela fermentação como pela respiração anaeróbica. A presença de concentrações elevadas de H_2S em solos do Japão está relacionada a uma desordem nutricional chamada de “akiochi”, que ocorre associada à deficiência de K, Mg e Si. Entretanto, muito pouca ênfase tem sido dada aos distúrbios relacionados com o S em solos do RS e SC. Cabe salientar a indicação de não utilização de fontes nitrogenadas e potássicas na adubação do arroz para evitar níveis de sulfato condicionantes à formação de elevadas concentrações de H_2S . Entretanto, recentemente o sistema de recomendação para a cultura do arroz passou a indicar aplicação de S nos casos de solos arenosos e de baixo teor de matéria orgânica da Depressão Central do RS, mas as doses indicadas são de até 20 kg ha^{-1} de S.

EMIÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA

A cultura do arroz tem sido apontada como uma importante fonte emissora de gases de efeito estufa, devido as emissão de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) provocadas pelo alagamento do solo. O CH_4 é o segundo gás em importância no efeito estufa do tipo antrópico com poder de absorção de radiação de 25 vezes ao CO_2 . O CH_4 é produzido na decomposição de compostos orgânicos em ambiente anaeróbico, utilizando materiais orgânicos existentes no solo, como a MOS, exsudação radicular das plantas, de tecidos da parte aérea, mortos e/ou senescentes, e de resíduos vegetais deixados após as colheitas.

A produção de metano em solos alagados ocorre por diferentes mecanismos, mas a clivagem do acetato ($CH_3COO^- + H^+ \rightarrow CH_4 + CO_2$) é a principal via de produção de metano em solos alagados, podendo responder por até 80% do total de metano produzido. O fluxo de metano para a atmosfera é dirigido pelo gradiente de concentração entre o solo alagado e a atmosfera, através de três mecanismos de transporte: pelo sistema vascular das plantas; por difusão através do solo e lâmina de água; e pela formação de bolhas de gás que escapam para a atmosfera. Em áreas alagadas vegetadas como nas lavouras de arroz irrigado, o fluxo de metano através da planta é o processo mais importante de emissão do gás (Figura 35).

A redução do NO_3^- durante em condições de anaerobiose provoca sua redução a N_2O , que também é um gás causador do efeito estufa, com poder de absorção da radiação de 250 vezes ao CO_2 . Por isso também não se recomenda a aplicação de fontes de N sob a forma nítrica quando o solo está alagado, pelas perdas de N no sistema como também favorecer o efeito estufa antrópico.

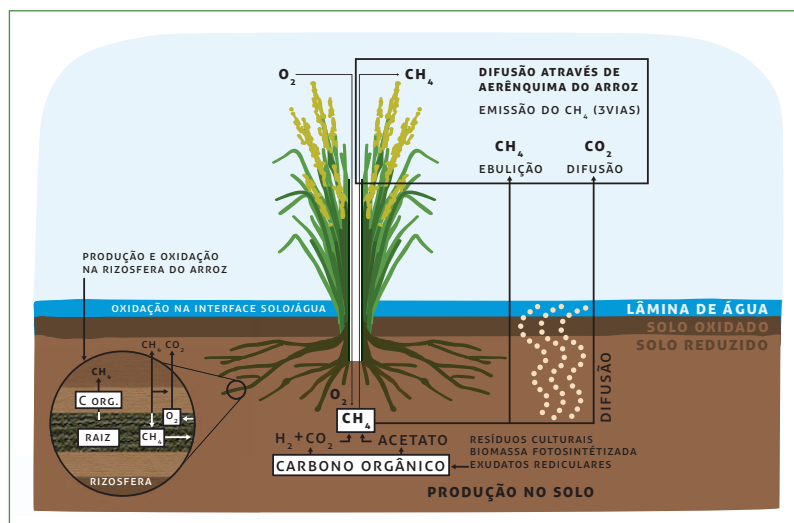


Figura 35 – Representação esquemática da produção e transferências de metano na produção de arroz irrigado por alagamento.

CAPÍTULO 3 – SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO PARA O ARROZ IRRIGADO

Em relação à adubação, existe o entendimento comum que o alagamento provoca um aumento geral na disponibilidade dos nutrientes, especialmente o fósforo. Assim, também se cria o senso comum que o arroz irrigado não responde ou responde pouco à adubação. Entretanto, talvez o maior problema esteja na baixa sensibilidade dos métodos de análise do solo para estimar a real disponibilidade de nutrientes, considerando que a amostra é analisada em condições de solo seco e o alagamento provoca efeitos diferenciados sobre a disponibilidade dos nutrientes devido a intensidade e curso das reações de redução. Outro fator importante a ser considerado é que a resposta à adubação no arroz está muito condicionada ao fato de que os demais fatores de produção também estejam em níveis considerados adequados para a cultura. Exemplo disso é a resposta muito menor do arroz à adubação quando semeado fora do período indicado pela pesquisa, em comparação com a semeadura em época recomendada. Também se pode destacar o decréscimo na produtividade com a falta de controle de plantas daninhas, em especial o arroz-vermelho, o que é agravado com a utilização da adubação nitrogenada.

As recomendações de adubação e de calagem para a cultura do arroz irrigado no RS e SC resultaram de vários trabalhos de pesquisa realizados por instituições que se dedicam a estudar a cultura do arroz nesses Estados. Seus resultados estão sumarizados na última edição do Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2004) e são continuamente atualizadas por ocasião das Reuniões Técnicas da Cultura do Arroz Irrigado (SOSBAI, 2007).

Deve-se ter em conta que as recomendações constituem-se numa ferramenta importante a ser utilizada por extensionistas e produtores, mas, por conterem indicações genéricas, devem ser utilizadas com cautela, sempre tendo em vista os demais fatores de produção e, essencialmente, a situação socioeconômica de cada caso.

Em função dos recentes avanços na difusão das recomendações de manejo da cultura do arroz irrigado no RS, a utilização do conjunto integrado de práticas adequadas pelos agricultores (uso de cultivares com alto potencial produtivo; época e densidade de semeadura adequadas para a região; manejo adequado da irrigação com relação à época e ao controle da lâmina de água; controle adequado de plantas daninhas, especialmente o arroz vermelho; e controle fitossanitário da lavoura) permitiu um aumento da expectativa de rendimento de grãos da cultura. Dessa forma, o próprio sistema de recomendação da adubação precisou se ajustar a esse novo cenário de produção.

Antes de 2004, as recomendações eram baseadas, além da análise de solo, no porte das cultivares utilizadas (alta, média e baixa ou tradicional, intermediário ou moderno, respectivamente), em função da resposta a adubação nitrogenada e as possibilidades de acamamento das plantas, e eram separadas para os Estados do RS e SC (em função do predomínio dos sistemas convencional e pré-germinado, respectivamente). Essa recomendação estava desatualizada em relação a realidade das lavouras. Após o ano de 2004, o sistema foi alterado para diferentes expectativas de produtividade da cultura (SOSBAI, 2005), separando as quantidades necessárias em função de faixas de rendimento de grãos (<6; 6-9 e >9 t/ha). Também foram indicadas para os sistemas de semeadura em solo seco e pré-germinado, pois este último se ampliou em algumas regiões do RS. Entretanto, as observações de campo indicaram à pesquisa que as regiões agroecológicas de cultivo no Sul do Brasil, com diferentes condições edafo-climáticas, determinam potenciais diferenciados de produtividade da cultura e de resposta à adubação, que podem ou não estar relacionados à aptidão de uso agrícola dos solos. Assim, em algumas regiões não era possível atingir as produtividades indicadas pelas faixas utilizadas, embora as respostas da cultura à adubação fossem consistentes em função das quantidades adicionadas.

Dessa forma, em 2007 o sistema foi alterado para diferentes expectativas de incremento de produtividade (SOSBAI, 2007), sendo então a quantidade aplicada uma função da faixa de incremento esperada (até 2; 3 e 4 t/ha a partir da produtividade obtida na área sem a aplicação de nutrientes). Como esta informação da produtividade sem aplicação de nutrientes não é conhecida por técnicos e produtores, o sistema podia causar dúvidas na sua aplicação, embora o princípio utilizado pudesse ser atrelado ao fato que as faixas de incremento estivessem relacionadas com as condições

de manejo da propriedade (maior incremento era esperado quando as condições de manejo fossem amplamente adequadas).

Assim, agora em 2010 o sistema deve ser novamente alterado (CTAR-I) para expectativas de resposta à adubação, sendo consideradas as respostas médias e altas uma função do nível de adequação de todos os fatores que influenciam o rendimento do arroz (condições climáticas, uso de cultivares com alto potencial produtivo; época e densidade de semeadura adequadas para a região; manejo adequado da irrigação com relação à época e ao controle da lâmina de água; controle adequado de plantas daninhas, especialmente o arroz vermelho; e controle fitossanitário da lavoura), elevando-se o nível de expectativa de incremento de produtividade proporcionalmente à sua adequação. Assim, alta resposta à adubação é esperada quando o arroz for cultivado em todas as condições favoráveis. Em outras situações onde alguns desses fatores não estão adequados, as respostas serão médias ou baixas, devendo-se ajustar as recomendações, diminuindo as doses de fertilizantes. Também foram unificadas as indicações das doses de N, P e K para qualquer sistema de produção de arroz, sendo as diferenças indicadas em relação ao modo e parcelamento da aplicação quando necessário. Embora em caráter preliminar, pois ainda é necessária sua aprovação final pela Comissão Técnica do Arroz Irrigado para a Região 1 (CTAR-I) que se reunirá em agosto do corrente ano, vamos apresentar o novo sistema de recomendação do arroz irrigado.

O sistema de recomendação baseia-se na análise de solo (a cada cultivo de arroz) e interpretação de seus resultados em função da expectativa de resposta do arroz a adubação para o sistema de cultivo contínuo de arroz irrigado eventualmente intercalado com pousio, pastejo extensivo ou plantas de cobertura no inverno.

CALAGEM

A elevação natural do pH do solo com o alagamento determina o processo conhecido como “autocalagem” pelo consumo de H^+ e a liberação de OH^- para a solução do solo durante o processo de redução do solo. Desta forma, a calagem não é indicada nos sistemas de produção de arroz que envolvem alagamento do solo desde o início do cultivo (pré-germinado e transplante de mudas), exceto quando os teores de Ca e Mg no solo forem considerados baixos, $<2,0$ e $0,5$ $cmolc\ dm^{-3}$, respectivamente. Nessas condições se recomenda aplicar 1 t/ha de calcário dolomítico com PRNT 100% para suprimento de Ca e Mg (SOSBAI, 2007).

Quando ocorre semeadura do arroz em solo seco e o alagamento ocorre no início do perfilhamento, há indicação de aplicação

de calcário quando o pH do solo é inferior a 5,5 (Tabela 40), com a justificativa de eliminar o Al enquanto o solo não sofre os efeitos de elevação do pH com o alagamento, embora os resultados de pesquisa nem sempre indicam resposta do arroz nessas condições. Com o advento da recomendação de irrigação precoce no arroz, é provável que as respostas à calagem sejam ainda mais escassas. Definida a necessidade de correção da acidez nesse sistema, a necessidade de calcário é determinada pelo índice SMP para elevar o pH até o valor de 5,5 (CQFS, 2004).

Levando em conta esse cenário, em áreas de produção de arroz irrigado cria-se um senso comum de não ou pouca resposta à aplicação de calcário na cultura, o que poderia comprometer os teores de Ca e Mg em alguns solos. No levantamento realizado com 17.665 amostras de solos de várzea cultivados com arroz irrigado (Anghinoni et al., 2004), aproximadamente 50% e 20% das amostras encontrava-se com teores considerados baixos para Ca e Mg, respectivamente. Além disso, em torno de 25% das amostras apresentaram valores de saturação por Al maiores que 30%, o que pode ser importante em sistemas de cultivo com semeadura em solo seco. Essas considerações indicam a necessidade de outros estudos que devem ser conduzidos com o objetivo de aprimorar o sistema de recomendação de calcário na produção de arroz irrigado.

SISTEMAS DE SEMEADURA	CRITÉRIOS DE DECISÃO	QUANTIDADE DE CALCÁRIO EQUIVALENTE
Semeadura em solo seco	pH < 5,5 e V < 65% ⁽¹⁾	1 SMP para pH _{água} 5,5 Incorporado
Pré-germinado ou com transplante de mudas	Ca ≤ 2,0 cmol _c /dm ³ e/ou Mg ≤ 0,5 cmol _c /dm ³ .	1 t/ha (PRNT100%) ⁽²⁾ Incorporado
⁽¹⁾ Quando um dos critérios for atendido, não aplicar calcário;		
⁽²⁾ Calcário dolomítico para suprir Ca e Mg.		

Tabela 40 – Critérios para definição de necessidade, quantidades de corretivos da acidez e procedimentos associados.

ADUBAÇÃO

As recomendações de adubação para o arroz irrigado foram estabelecidas com base nos teores de matéria orgânica (para nitrogênio) e de fósforo e de potássio extraíveis no solo, de acordo com as classes de interpretação (Tabelas 41 e 42).

INTERPRETAÇÃO DO TEOR DE P NO SOLO	P EXTRAÍDO POR MEHLICH-1
	mg/dm ³
Baixo	≤3
Médio	3 a 6
Alto	6,1 a 12
Muito Alto	>12

Tabela 41 – Interpretação da análise de fósforo para fins de recomendação de adubação fosfatada para o arroz irrigado.

INTERPRETAÇÃO DE K NO SOLO	CTC _{PH 7,0} – cmol _c /dm ³		
	< 5	5 – 15	> 15
	----- K Mehlich-1- mg/dm ³ -----		
Baixo	≤ 30	≤ 40	≤ 60
Médio	31 a 45	41 a 60	61 a 90
Alto	46 a 90	61 a 120	91 a 180
Muito Alto	> 90	> 120	> 180

Tabela 42 – Interpretação da análise de potássio para fins de recomendação de adubação potássica para o arroz irrigado

As indicações de adubação nitrogenada (Tabela 32), fosfatada (Tabela 33) e potássica (Tabela 34) para o arroz irrigado são ajustadas para o objetivo de retornos econômicos em curto prazo (por cultivo), tendo como base o sistema de produção de cada lavoura, levando-se em consideração as condições edafo-climáticas, o potencial produtivo de cultivares e os níveis de manejo, de tecnologia e de comprometimento de recursos financeiros por parte do produtor. A aplicação das doses de nutrientes, indicadas nas tabelas, não necessariamente assegura a obtenção das respostas à adubação esperadas. O conjunto de fatores que afetam a produção é que determina o nível de resposta à adubação.

a. NITROGÊNIO

TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO	EXPECTATIVA DE RESPOSTA À ADUBAÇÃO	
	MÉDIA	ALTA
% kg de N/ha	
≤2,5	90	120
2,6 - 5,0	80	110
> 5,0	≤70	≤100

⁽¹⁾As doses de nitrogênio indicadas na tabela, poderão ser reduzidas ou acrescidas em até 30 kg de N/ha, levando-se em consideração, para reduzir: o histórico da lavoura com baixa resposta ao nitrogênio; cultivos antecedentes com leguminosas, elevado desenvolvimento vegetativo da lavoura e as expectativas de condições climáticas com baixas temperaturas e luminosidade, especialmente no período próximo a floração e nível inadequado de manejo do solo e da cultura. Por outro lado, para aumentar (até 30 kg de N/ha), em condições excepcionais, com variedades de alto potencial produtivo, que propiciam uma resposta muito alta ao nitrogênio e uma expectativa de excelente condição climática no ano de cultivo.

Tabela 43 - Recomendação de adubação nitrogenada⁽¹⁾ para o arroz irrigado, considerando a expectativa de resposta à adubação

Para os sistemas de semeadura em solo seco (convencional, cultivo mínimo e plantio direto), recomenda-se aplicar na semeadura entre 10 e 20 kg N/ha (dependendo da dose a aplicar e da produção e do tipo de resíduo da cultura anterior) e o restante, em cobertura. Nesta, deve-se aplicar em torno de 50% da dose restante no início do perfilhamento (a partir da emissão da quarta folha – V3/V4) e o restante no início do desenvolvimento da panícula (IDP). No caso de doses próximas ou acima de 100 kg de N/ha em cobertura, pode-se aumentar a proporção da dose da primeira aplicação, desde que se mantenha uma aplicação em torno de 40 kg de N/ha na segunda cobertura. Nesse sistema de semeadura, a primeira adubação de cobertura com nitrogênio deve ser realizada preferencialmente em solo seco, desde que a inundação da lavoura se estabeleça o mais rápido possível (indica-se um tempo máximo entre a aplicação de N e a inundação da lavoura de três dias). As demais aplicações de cobertura com nitrogênio após o início da inundação devem ser realizadas sobre a lâmina de água e interrompida a circulação da água por no mínimo três dias.

Para o sistema pré-germinado não é recomendada a adubação com N na base, devido aos riscos de perdas por desnitrificação. Para as cultivares de ciclo curto (até 120 dias) e médio (entre 120 e 135 dias), recomenda-se aplicar 50% do N no início do perfilhamento e o restante no início do desenvolvimento da panícula. No caso de doses próximas ou acima de 100 kg de N/ha em cobertura, pode-se também aumentar a proporção da dose da primeira aplicação, desde que se mantenha uma aplicação em torno de 40 kg de N/ha na segunda cobertura. Para as cultivares de ciclo longo (mais de 135 dias), a cobertura pode ser fracionada em três aplicações, 1/3 no início do perfilhamento, 1/3 no perfilhamento pleno e, se necessário, completada com 1/3 no início do desenvolvimento da panícula.

Para ambos os sistemas, as doses de nitrogênio em cobertura poderão ser ajustadas, para mais ou para menos, dependendo em cada caso, do desenvolvimento da cultura em função das condições climáticas (temperatura, chuvas, nebulosidade, ventos, etc) e de outros fatores de estresse (fitotoxidez por herbicidas e danos por pragas e doenças, etc) durante o cultivo (Tabela 4).

b. FÓSFORO

INTERPRETAÇÃO DO TEOR DE P	EXPECTATIVA DE RESPOSTA À ADUBAÇÃO	
	MÉDIA	ALTA
 kg de P ₂ O ₅ /ha	
Baixo	50	60
Médio	40	50
Alto	30	40
Muito Alto	≤30	≤40

⁽¹⁾As doses de P₂O₅ indicadas na tabela, poderão ser reduzidas ou acrescidas em até 10 kg de P₂O₅/ha, levando-se em consideração, respectivamente, a expectativa de resposta baixa ou muito alta à adubação.

Tabela 44 – Recomendação de adubação fosfatada⁽¹⁾ para o arroz irrigado, considerando a expectativa de resposta à adubação

No sistema de semeadura em solo seco, os fertilizantes fosfatados (junto com os potássicos) devem ser aplicados e incorporados por ocasião da semeadura. No sistema pré-germinado, esses fertilizantes podem ser aplicados e incorporados com enxada rotativa ou grade na formação da lama ou após o nivelamento da área, antes da semeadura. A antecipação da adubação fosfatada nesse sistema de semeadura pode estimular o desenvolvimento de algas.

3. POTÁSSIO

INTERPRETAÇÃO DO TEOR DE K	EXPECTATIVA DE RESPOSTA À ADUBAÇÃO	
	MÉDIA	ALTA
	----- kg de K ₂ O/ha -----	
Baixo	75	90
Médio	55	70
Alto	35	50
Muito Alto	≤35	≤50

⁽¹⁾Para solos de elevada CTC_{pH 7,0} (acima de 15,0 cmol_c/dm³), acrescentar aos valores indicados na tabela, 20 kg de K₂O/ha;
⁽²⁾As doses de K₂O indicadas na tabela, poderão ser reduzidas ou acrescidas em até 15 kg de K₂O/ha, levando-se em consideração, respectivamente, a expectativa de resposta baixa ou muito alta à adubação.

Tabela 45 – Recomendação de adubação potássica^(1,2) para o arroz irrigado, considerando a expectativa de resposta à adubação

d. ENXOFRE

Solos afastados de regiões industriais, com baixos teores de matéria orgânica e de argila, intensivamente cultivados com arroz irrigado, como os localizados no baixo Jacui, são potencialmente suscetíveis à deficiência de enxofre. Nestas condições, ocorre resposta no rendimento dessa cultura quando o teor de enxofre (S) no solo (pelo extrator fosfato de cálcio, 500 mg/L) for menor que 10 mg/dm^3 (teor crítico). A resposta da cultura limita-se à aplicação de 20 kg de S/ha, que pode ser suprida pelos seguintes adubos: sulfato de amônio (22 a 24% de S), sulfato de potássio (15 a 17% de S), superfosfato simples (10 a 12% de S) e sulfato de cálcio – gesso (13% de S). Uma maneira prática de suprir essa demanda é se utilizar de fórmulas NPK contendo superfosfato simples na sua composição ou substituir um saco de uréia/ha por dois de sulfato de amônio/ha, na primeira adubação nitrogenada em cobertura, e/ou o a fonte que for mais econômica.

e. CÁLCIO, MAGNÉSIO E MICRONUTRIENTES

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} são controlados por ocasião do manejo da calagem. Solos em que a calagem foi considerada desnecessária, ou se foi indicada a aplicação de calcário (utilizando-se preferencialmente o do tipo dolomítico), deverão conter conteúdos adequados desses nutrientes.

Não tem sido obtida, nas pesquisas realizadas até o momento, resposta com a aplicação de micronutrientes no solo ou via foliar e na semente na cultura de arroz irrigado. Isto tem sido atribuído pelo seu adequado suprimento tanto pelo solo, como também pelos adubos e corretivos de acidez, que contém micronutrientes em sua composição. As diferenças eventualmente encontradas em alguns experimentos ou ensaios com produtores, com rendimentos para mais ou para menos, não são consistentes e nem sempre se diferenciam por critérios objetivos (análise estatística).

DESORDENS NUTRICIONAIS

a. Toxidez por ferro

Na Tabela 46 é apresentada uma interpretação da probabilidade de ocorrência de toxidez por Fe^{2+} na lavoura, baseado no teor de Fe extraído por oxalato de amônio com ajuste do pH para 6,0 (essa não é uma análise de rotina em laboratórios de solos). Os teores de Fe^{+2} trocável são estimados pela equação 1 e a sua saturação da CTC com Fe^{+2} (PSFe^{+2}) é calculada pela equação 2.

$$\text{Fe}^{+2} \text{ trocável (cmol}_\ell\text{/dm}^3\text{)} = 0,322 + 17,92 \text{ Feo (g/100cm}^3\text{)} \quad \text{Equação (1)}$$

$$\text{PSFe}^{+2} \text{ (\%)} = 100 \times \text{Fe}^{+2} / \text{CTC}_{\text{pH}7,0} \quad \text{Equação (2)}$$

PSFe ²⁺	RISCO DE TOXIDEX POR FERRO
%	
<20	Baixo
21 a 40	Médio
>40	Alto

Tabela 46 – Interpretação do risco de ocorrência de toxidez por ferro em função da porcentagem de saturação da CTC (PSFe²⁺)

A utilização de cultivares tolerantes é a forma mais econômica e eficiente de contornar o problema. A calagem prévia do solo para elevar o valor de pH a 6,0 também poderá minimizá-lo (e pode ser feita de maneira localizada). A irrigação intermitente, em casos muito específicos, com o objetivo de evitar acúmulo de Fe²⁺, pode ser recomendada com muito critério, pois existem períodos críticos no ciclo da cultura (fase reprodutiva) em que a manutenção de uma lâmina d'água no solo é fundamental. Esta prática também pode acarretar em maior consumo de água, perdas de nutrientes e reinfestação da lavoura com plantas daninhas.

b. Toxidez por ácidos orgânicos

A produção de ácidos orgânicos em solos alagados é diretamente proporcional à disponibilidade de carbono facilmente decomponível. Assim, solos ricos em matéria orgânica ou naqueles em que forem adicionados resíduos orgânicos (resteva) próximos ao período de alagamento apresentam maior produção de ácidos orgânicos e são mais propensos a apresentar toxidez às plantas. A incorporação dos resíduos vegetais, como a que ocorre no sistema convencional, acelera a decomposição do material orgânico, favorecendo a decomposição aeróbica de parte do carbono antes do estabelecimento da lâmina de água. No sistema plantio direto, em que a palha fica acumulada na superfície do solo, ocorre maior produção de ácidos orgânicos na parte mais superficial do solo, justamente onde se concentra o sistema radicular do arroz, o que pode acarretar maiores efeitos tóxicos ao arroz.

Além do uso de calcário para correção do pH a 6,0, que pode minimizar o efeito da toxidez por ácidos orgânicos, pode-se manejar os resíduos vegetais com antecedência ao início do alagamento (por exemplo 30 dias antes), principalmente quando a quantidade de resíduos forem superiores a 4 t/ha.

3. Toxidez por salinidade

A salinidade é definida pela presença de excessivas quantidades de sais solúveis no solo. A salinidade do solo pode ser de origem genética e/ou decorrente do uso de água salina na irrigação. O uso correto da água de irrigação deve, então, levar em conta o seu grau de salinidade (expresso pelo teor de Na) e o grau de salinidade existente no solo (expresso pela saturação por Na na troca). A sensibilidade do arroz à salinidade varia conforme o estágio de desenvolvimento da cultura, sendo críticas as fases de plântula e florescimento. Quando em níveis acima do tolerável, a salinidade ocasiona perdas no estande, diminuição do perfilhamento, clorose e morte de folhas, diminuição da estatura de plantas e aumento da esterilidade das espiguetas e do número de perfilhos não produtivos.

Nos casos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, o sódio é o sal predominante nas áreas afetadas (região litorânea), sendo que a valores de PST (percentagem de sódio na troca) de 15 a 20% já representam riscos à cultura do arroz. O cálculo da PST do solo é feito pela Equação 3:

$$\text{PST (\%)} = 100 \times [\text{Na}^+(\text{cmol}_c/\text{dm}^3)/\text{CTC}_{\text{pH}7,0}] \quad \text{Equação (3)}$$

Outro atributo utilizado no diagnóstico da salinidade é a condutividade elétrica (CE), tanto do solo como da solução do solo. O nível crítico da CE do solo, em pasta saturada, é de 2,0 dS/m e o nível crítico da CE da solução do solo, denominada de CE efetiva (CEe), medida na zona de maior atividade radicular (0-10 cm) é também de 2,0 dS/m, para as condições de cultivo de arroz irrigado no RS .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10. ed. Porto Alegre: **SBCS-Núcleo Regional Sul**, 2004. 400p.

CTAR-I. Parte do texto é retirado das informações que estão sendo trabalhadas pela Sub-Comissão de Manejo da Cultura e dos Recursos Naturais da Comissão Técnica do Arroz Irrigado para a Região 1 (CTAR-I) e que serão encaminhadas para plenária em agosto desse ano e poderão fazer parte do boletim: Arroz Irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil em 2010.

IRGA. Censo da lavoura arrozeira. Acesso em 21/09/2008. Disponível em: http://www.irga.rs.gov.br/index.php?action=pub_censo

Lavoura Arrozeira. Acessada em 23/09/2008. Disponível eletronicamente em <http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20080909083439.pdf>

MARCHESAN, E.; SILVA, L.S.; SOUSA, R.O.; GOMES, A.S.; MARCOLIN, E.; NOLDIN, J.A.. Conflitos e oportunidades no uso do solo e da água em várzeas In: VII Reunião Sul Brasileira de Ciência do Solo, 2008, Santa Maria. **Anais**. Santa Maria: SBCS – Núcleo Regional Sul, 2008.

PINTO, L.F.S.; LAUS NETO, L.A.; PAULETTO, E.A. Solos de várzea do sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. da S.; MARGALHÃES Jr., A.M. Arroz Irrigado no sul do Brasil. Brasília: Embrapa Informação tecnológica, 2004. p.75-95.

SOSBAI, Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. Arroz Irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4.; XXVI REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26., **Anais...**Pelotas, 2005. cap. 4, p. 51 -69.

SOSBAI, Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. Arroz Irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 5.; XXVII REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 27., **Anais...**Pelotas, 2007. cap. 4, p. 49-68.