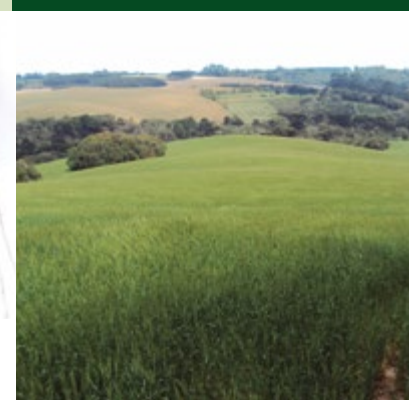
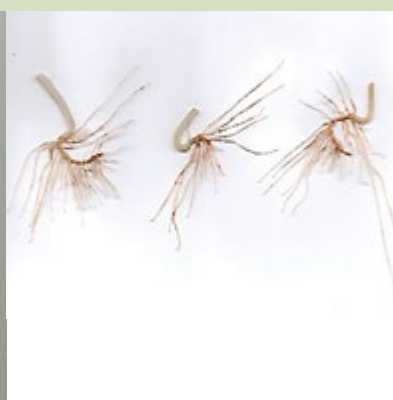


FERTILIDADE DO SOLO



CORREÇÃO E ADUBAÇÃO

SISTEMA FAEP



SENAR - ADMINISTRAÇÃO REGIONAL DO ESTADO DO PARANÁ

CONSELHO ADMINISTRATIVO

Presidente: Ágide Meneguette

Membros Titulares

Rosanne Curi Zarattini
Nelson Costa
Darci Piana
Marcos Junior Brambilla

Membros Suplentes

Livaldo Gemin
Robson Mafioletti
Ari Faria Bittencourt
José Amauri Denck

CONSELHO FISCAL

Membros Titulares

Sebastião Olímpio Santaroza
Paulo José Buso Júnior
Carlos Alberto Gabiatto

Membros Suplentes

Ana Thereza da Costa Ribeiro
Ciro Tadeu Alcântara
Aparecido Callegari

Superintendente

Carlos Augusto C.Albuquerque

CARLA FERNANDA FERREIRA

**FERTILIDADE DO SOLO:
CORREÇÃO E ADUBAÇÃO**



2016

Depósito legal na CENAGRI, conforme Portaria Interministerial n. 164, datada de 22 de julho de 1994, e junto a Fundação Biblioteca Nacional e Senar-PR.

Autora: Carla Fernanda Ferreira

Coordenação técnica: Leandro Alegransi CREA PR - 125189/D

Coordenação metodológica: Patrícia Lupion Torres

Normalização: Rita de Cássia Teixeira Gusso – CRB 9. /647

Coordenação gráfica: Adilson Kussem

Fotografias: Carla Fernanda Ferreira

Ilustrações: Sincronia Design

Diagramação: Sincronia Design

Capa: Adilson Kussem

Catálogo no Centro de Editoração, Documentação
e Informação Técnica do SENAR-PR.

Ferreira, Carla Fernanda.

Fertilidade do solo : correção e adubação / Carla Fernanda Ferreira. – Curitiba :
SENAR - Pr., 2016. – 1 v.

ISBN 978-85-7565-137-7

1. Agricultura. 2. Agricultura-Paraná. 3. Solos. 4. Adubação. 5. Fertilidade do solo.
6. Calagem. I. Título.

CDU631.4
CDD633

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, por qualquer meio,
sem a autorização do editor.

IMPRESSO NO BRASIL – DISTRIBUIÇÃO GRATUITA



APRESENTAÇÃO

O SENAR Nacional – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural – é uma instituição prevista na Constituição Federal e criada pela Lei n. 8.315, de 23/12/1991. Tem como objetivo a formação profissional e a promoção social do homem do campo para que ele melhore o resultado do seu trabalho e, com isso, aumente sua renda e a sua condição social.

No Paraná, o SENAR é administrado pela Federação da Agricultura do Estado do Paraná – FAEP – e vem respondendo por amplo e diversificado programa de treinamento.

Todos os cursos ministrados por intermédio do SENAR são coordenados pelos Sindicatos Rurais e contam com a colaboração de outras instituições governamentais e particulares, prefeituras municipais, cooperativas e empresas privadas.

O material didático de cada curso levado pelo SENAR é preparado de forma criteriosa e exclusiva para seu público-alvo, a exemplo deste manual. O intuito é assegurar que os benefícios dos treinamentos se consolidem e se estendam. Afinal, quanto maior o número de trabalhadores e produtores rurais qualificados, melhor será o resultado para a economia e para a sociedade em geral.



SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	7
1 IMPORTÂNCIA DAS CORREÇÕES DE SOLOS AGRÍCOLAS E FORNECIMENTO DE NUTRIENTES PARA AS CULTURAS COMERCIAIS.....	9
2 EFICIÊNCIA DAS FORMAS DE ADUBAÇÃO.....	11
2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS PRODUÇÕES AGRÍCOLAS QUANTO AO MÉTODO DE APLICAÇÃO DOS FERTILIZANTES.....	13
2.1.1 Natureza química dos fertilizantes comerciais	13
2.1.2 Propriedades físicas dos solos.....	15
2.1.3 Propriedades químicas dos solos.....	20
2.1.4 Fatores de ordem climática.....	28
2.1.5 Ganhos e perdas dos nutrientes em sistemas agrícolas.....	28
2.2 FORMAS DE INCORPORAÇÃO DE ADUBO AO SOLO	29
2.2.1 Adubações de base no plantio.....	30
2.2.2 Adubações de cobertura.....	31
2.2.3 Adubações foliares e tratamento de sementes	32
3 AMOSTRAGEM E ANÁLISE DE SOLO.....	35
3.1 AMOSTRAGEM DO SOLO PARA IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS QUÍMICOS E FÍSICOS.....	35
3.1.1 Critérios para realização de amostragem de solo para avaliação da fertilidade.....	36
3.1.2 Frequência e época de amostragem de solos.....	37
3.1.3 Subdivisão da área e local de amostragem	38
3.2 ANÁLISE PARA DIAGNÓSTICO DA FERTILIDADE DO SOLO	39
3.2.1 Caracterização da acidez do solo.....	39
3.2.2 Capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação das bases trocáveis (V%).....	40
3.2.3 Matéria orgânica e carbono no solo	41
3.2.4 Micronutrientes no solo.....	42
3.2.5 Valores de referência	42
3.2.6 Conversões e unidades de medida	43
4 PRINCÍPIOS DE CORREÇÃO DA ACIDEZ DOS SOLOS	45
4.1 CONCEITOS DE ACIDEZ ATIVA E ACIDEZ POTENCIAL DOS SOLOS.....	45
4.2 MÉTODOS DE RECOMENDAÇÃO DE APLICAÇÃO DE CALAGEM	46
4.2.1 Necessidade de calagem pelo método da correção do alumínio.....	46
4.2.2 Necessidade de calagem pelo método da saturação das bases (V%).....	46
4.2.3 Necessidade de calagem pelo índice SMP	47
4.3 PRINCIPAIS CORRETIVOS AGRÍCOLAS.....	47
4.3.1 Carbonatos.....	48
4.3.2 Hidróxidos.....	50
4.3.3 Óxidos	50
4.4 USO DO GESSO AGRÍCOLA	51

5	QUALIDADE DOS INSUMOS AGRÍCOLAS APLICADOS AO SOLO	53
5.1	CALAGEM.....	53
5.1.1	Características físicas e químicas dos calcários.....	53
5.2	FERTILIZANTES	54
5.2.1	Concentração dos elementos requeridos	54
6	PRINCIPAIS ELEMENTOS ENVOLVIDOS NA NUTRIÇÃO MINERAL DE PLANTAS	57
6.1	CRITÉRIOS DE ESSENCIALIDADE.....	58
6.2	PRINCIPAIS FUNÇÕES AGRÍCOLAS DOS ELEMENTOS.....	60
6.3	SINTOMAS DE DEFICIÊNCIA E TOXICIDADE.....	61
	REFERÊNCIAS.....	67



INTRODUÇÃO

Solos são corpos tridimensionais constituídos de partículas minerais e compostos orgânicos, cuja proporção altera-se ao longo da paisagem. Sua formação está condicionada aos processos de degradação dos minerais e rochas, em função da ação dos agentes intempéricos ao longo de anos em escala geológica, e da adição de material orgânico, em função da composição florística e da atividade microbiana do solo. Dessa forma, apresenta características bem distintas ao longo da paisagem do globo terrestre, variando suas propriedades químicas e físicas, tanto na retenção de nutrientes e parâmetros eletroquímicos quanto ao acúmulo de água e material orgânico.

Apesar de compor grande parte do globo terrestre, trata-se de um corpo findável, em razão de sua lenta taxa de formação, devendo ser respeitados seus limites de uso, observando-se suas características quanto a: acúmulo e taxa de infiltração de água, diferentes tipos e proporção de textura, profundidade e afloramento de rochas, entre outras. Todas estas particularidades definem o grau de erodibilidade e capacidade de perdas de nutrientes.

O estudo desses elementos que compõem a formação dos solos auxilia na tomada de decisões em importância agrícola como escolha do sistema de manejo do solo, observação da permeabilidade e capacidade de drenagem de água, suscetibilidade a erosão e formação de camada compactada, implantação de sistemas de irrigação e capacidade de suporte do maquinário agrícola.

Sistemas agrícolas são caracterizados pelo uso indiscriminado do solo, salvo exceções, como a hidroponia, desde a retirada da biodiversidade ecológica da composição florística para a transformação em monocultura, processo que altera toda a composição nutricional do solo.

Todas essas informações são importantes para o manejo racional desse recurso natural. Dessa forma, o uso consciente e a preservação do solo devem ser levados em consideração em sistemas agrícolas, com a adoção de práticas que minimizam os impactos ao meio ambiente, de acordo com a estruturação de partículas e características intrínsecas de cada solo ao longo da paisagem.

Objetivando definir conceitos relacionados com as ciências dos solos, principalmente aspectos envolvidos ao manejo da fertilidade do solo em sistemas agrícolas, este material traz informações necessárias aos profissionais do campo para uma melhor otimização dos fertilizantes e corretivos agrícolas, proporcionando maior sustentabilidade às suas áreas de produção.

1 IMPORTÂNCIA DAS CORREÇÕES DE SOLOS AGRÍCOLAS E FORNECIMENTO DE NUTRIENTES PARA AS CULTURAS COMERCIAIS

Expectativas relacionadas ao aumento dos índices produtivos das culturas comerciais incluem a adoção de tecnologias, como a introdução de híbridos, variedades ou cultivares de alto potencial produtivo e com baixa rusticidade, capazes de obterem uma melhor eficiência na conversão de nutrientes absorvidos, permitindo uma melhor eficácia no uso dos fertilizantes, controle mais efetivo de plantas daninhas, avanços no manejo das culturas e aumento da população de plantas.

Entretanto, todo esse ganho tecnológico somente irá expressar seu potencial quando as condições ambientais forem propícias ao desenvolvimento vegetal, incluindo as condições de fertilidade e acidez dos solos. Associado a esses fatores, o correto manejo do solo irá propiciar melhorias ao desenvolvimento radicular e melhor captação dos nutrientes fornecidos pelas fertilizações.

As explorações agrícolas utilizam os solos como um recurso de sustentação para o desenvolvimento radicular e captação de água e nutrientes, devendo ser manejado corretamente para evitar as perdas desses elementos essenciais ao desenvolvimento das plantas. Além disso, a utilização de adubos e corretivos agrícolas deve estar correlacionada com as exigências nutricionais da cultura e as condições em que o solo se encontra, descritas nas análises de solos de rotina.

Análise de rotina de solo é um conjunto de parâmetros químicos e físicos que determinam as condições nutricionais, tais como: quantidade de elementos requeridos à nutrição mineral de plantas; teores de material orgânico; características texturais de classes de areia, silte e argila, ocasionalmente presentes em análises de rotina; e as condições de acidez do solo, como potencial hidrogeniônico (pH) e teor de alumínio tóxico (Al^{+3}).

Com a determinação desses fatores, é possível identificar os parâmetros que se encontram em desacordo as condições exigidas pelas culturas comerciais, podendo ser corrigidos com a utilização de fertilizantes minerais simples ou mistos e o uso de condicionantes do solo, temas que serão abordados nos capítulos posteriores.

2 EFICIÊNCIA DAS FORMAS DE ADUBAÇÃO

O uso de adubos químicos minerais, orgânicos ou a utilização de resíduos com potencial fertilizador está relacionado com a quantidade de nutriente fornecido e com sua solubilidade, ou seja, capacidade e velocidade de dissociação da sua composição para o fornecimento dos nutrientes.

O fornecimento do nutriente aplicado não está relacionado somente às características dos fertilizantes, também depende das características climáticas durante sua aplicação e em períodos posteriores, além das condições físicas e químicas dos solos.

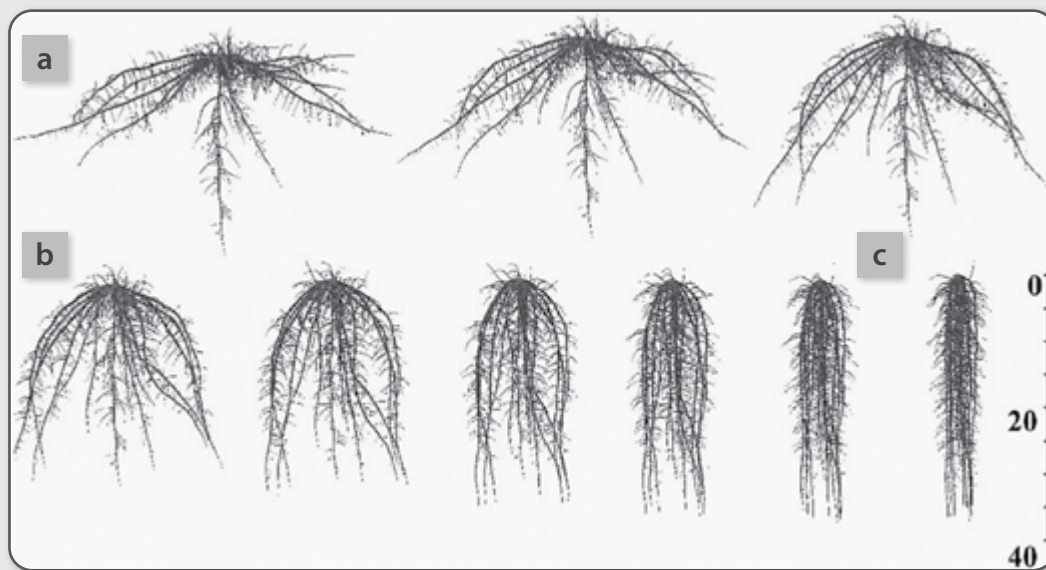
As variações da concentração de nutrientes nas plantas são reflexos da disponibilidade de nutrientes no solo, da capacidade de absorção pelas plantas (variável entre as culturas), das alterações climáticas durante o período de desenvolvimento das culturas e do ganho tecnológico adotado entre diferentes híbridos, variedades e cultivares.

Todos esses fatores interferem diretamente sobre a capacidade produtiva e resposta no crescimento de plantas. Quanto melhor a concentração dos nutrientes na planta, ou seja, uma concentração balanceada em níveis adequados, melhores foram as condições do ambiente para obter tal resultado, tanto fatores de solo inerentes à própria planta como fatores ambientais.

Entre as condições de solo, aspectos relacionados às características físicas das camadas superficiais afetam o desenvolvimento de raízes e a produtividade das culturas. A adubação localizada pode disponibilizar uma grande quantidade dos elementos químicos em um pequeno volume de solo requerido para o desenvolvimento das plantas, melhorando a distribuição do sistema radicular e a captação de nutrientes. Entretanto, pode propiciar salinidade no volume aplicado, diminuindo a distribuição de raízes e, portanto, dificultam o aproveitamento dos nutrientes pelas plantas.

Uma resposta evidente quanto à fertilização de solos é o modo como as raízes se distribuem. Por exemplo, o elemento fósforo apresenta como característica uma baixa mobilidade. Isso significa que as raízes das plantas precisam ir ao encontro desse elemento para poderem se nutrir. Dessa forma, a distribuição do sistema radicular será influenciada pela posição do fertilizante fosfatado. Se a aplicação for a lanço, o elemento ficará concentrado na superfície e distribuído mais uniformemente na área, porém com menor concentração, conforme apresenta a Figura 1a. Entretanto, se a aplicação for ao sulco, com elevada concentração e em camadas mais profundas do solo, irá gerar um sistema radicular conforme apresentado na Figura 1c. Diante de todo esse exposto, podemos concluir que a melhor distribuição do sistema radicular está apresentada na Figura 1b, em que a distribuição é homogênea, observando tanto no aspecto lateral e em profundidade, raízes mais equidistantes, uma vez que nesse solo o fósforo está homogêneo devido à inserção do material orgânico em sistema plantio direto e a fertilização fosfatada foi realizada no sulco, promovendo o crescimento em profundidade.

Figura 1 – Arquitetura de raízes do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) em função da disponibilidade de fósforo.



Fonte: Ho et al, 2004.

O manejo correto do solo também é um fator primordial à retenção e o fornecimento de nutrientes para as culturas. As tomadas de decisões quanto ao manejo do solo devem levar em consideração todas as características relacionadas à retenção dos nutrientes, como a textura do solo, declividade e tamanho de rampa e a profundidade do solo. O manejo incorreto, principalmente com textura arenosa, declividade acentuada e manejo do maquinário agrícola no sentido da declividade, conforme a Figura 2, acarreta em perdas de nutrientes e sedimentos.

Figura 2 – Preparo convencional em solos com características de textura arenosa, elevada taxa de infiltração de água e declividade acentuada (a) e manchas de solo devido ao manejo incorreto em sistema de semeadura direta sobre a palha (b).



Fonte: A autora.

2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS PRODUÇÕES AGRÍCOLAS QUANTO AO MÉTODO DE APLICAÇÃO DOS FERTILIZANTES

2.1.1 Natureza química dos fertilizantes comerciais

Fertilizantes minerais são formulados químicos que fornecem os nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, proporcionam maior rendimento e produtividade nas culturas com exploração comercial. São essenciais aos sistemas de produções agrícolas, principalmente quando utilizamos sementes ou mudas com material genético com alta produtividade, pois são mais exigentes em nutrientes ao longo do seu desenvolvimento.

Os fertilizantes comerciais podem ser classificados como simples, mistos ou complexos. A diferença existente entre esses fertilizantes está relacionada com a quantidade de elementos em sua composição ou com mistura de dois ou mais fertilizantes simples. Essa mistura pode ser resultante de natureza física, no caso de fertilizantes minerais mistos, ou de reações de natureza química entre seus componentes, no caso de fertilizantes minerais complexos.

Um exemplo de fertilizantes minerais mistos são os adubos formulados NPK. Esses fertilizantes apresentam três elementos básicos na sua formulação: o nitrogênio, o fósforo e o potássio. Existem alguns princípios básicos para a formulação dos fertilizantes, conforme abordaremos em capítulos posteriores, porém essas misturas devem apresentar uma compatibilidade.

Isso significa que algumas misturas não irão apresentar nenhuma reação entre seus componentes, como é o caso da mistura entre a ureia e o cloreto de potássio, são as chamadas misturas compatíveis. A Figura 3 apresenta a compatibilidade entre os fertilizantes e corretivos para formulação de adubos formulados mistos.

Figura 3 – Compatibilidade entre os fertilizantes e corretivos para formulação de adubos formulados mistos .

Adubos orgânicos														
C														Nitrato de sódio
C	C													Nitrato de potássio
C	C	C												Nitrocálcio
C	C	C	C											Nitrato de amônio
C	C	C	C	C										Sulfato de amônio
C	C	C	C	C	C									Ureia
C	C	C	C	C	C	C								Farinha de ossos
C	C	C	C	C	C	C	C							Fosfatos naturais
C	C	C	C	C	C	C	C	C						Superfosfato simples
C	C	C	C	C	C	C	C	C	C					Superfosfato triplo
C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C				MAP
C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			DAP
I	C	CI	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	Escórias
I	C	CI	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	Termofosfato
C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	CI	Cloreto de potássio
C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	CI	Sulfato de potássio
C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	I	Sulfato de potássio e magnésio
I	C	CI	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	Cal virgem, hidratada, calcários calcinados
I	C	CI	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	Calcários

C COMPATÍVEIS: podem ser misturados

CI COMPATIBILIDADE LIMIDATA: devem ser misturados pouco antes da aplicação

I INCOMPATÍVEIS: não podem ser misturados

Fonte: Silva; Lopes, 2011.

Algumas misturas podem ser feitas, entretanto sua aplicação no solo deve ser imediata devido às reações que podem ocorrer ao longo do tempo, como é o caso de uma mistura entre ureia e superfosfatos em geral, chamada de misturas semicompatíveis. E existem as misturas incompatíveis, que limitam a eficiência dos fertilizantes quando misturadas, como é o caso da ureia e do termofosfato. Outros exemplos que podem ser citados nessa relação são o cálcio e fertilizantes sulfatados, ureia e nitrato de amônio, e a mistura entre os fertilizantes nitrato de cálcio, cloreto de potássio, fosfatos monoamônio (MAP) e diamônio (DAP).

Existem diferentes formas de comercialização dos fertilizantes minerais. Geralmente, são comercializados em forma granulada ou em mistura de grânulos, mas ainda existem fórmulas comercializadas em pó, líquidas e fertilizantes em gás. Essas formas físicas de comercialização apresentam distintas formas de incorporação no solo, podendo até ser aplicadas em cobertura ou pulverização foliar. A Figura 4 apresenta a incorporação de fertilizante orgânico sólido em área de sistema convencional utilizada para horticultura.

Figura 4 – Incorporação de fertilizante orgânico sólido (dejeito de bovinos) em área de sistema de preparo convencional do solo para plantio de hortaliças, utilizando enxada rotativa.



Fonte: A autora.

Embora a propriedade física seja importante para determinar a forma de aplicação do fertilizante, a característica mais importante dos fertilizantes está relacionada com a sua solubilidade. As solubilidades dos fertilizantes nitrogenados e potássicos são avaliadas em água, já as dos fertilizantes fosfatados são avaliadas em ácido cítrico ou citrato de amônio neutro.

Trata-se de um parâmetro que indica a quantidade de fertilizantes que será dissolvida em 100 ml de água ou as diferentes soluções no caso dos fosfatados. Por exemplo, os fertilizantes nitrogenados, como a ureia, apresentam solubilidade cerca de 60 vezes maior que o cloreto de potássio e cerca de 97 vezes maior que o super simples ou super triplo.

Outro parâmetro importante na avaliação da qualidade dos fertilizantes é a higroscopicidade, ou seja, a capacidade que o fertilizante apresenta em absorver água da atmosfera. Trata-se de um valor expresso pela umidade relativa crítica, ou seja, umidade relativa atmosférica, que determina a umidade máxima em que um fertilizante é submetido sem que haja absorção de água. A melhor forma de minimizar a alta higroscopicidade é a granulação. Porém, existem outras alternativas, que incluem a proteção com polímeros, enxofre, parafina, formaldeído, entre outros produtos.

Os fertilizantes minerais apresentam índice de salinidade, que caracteriza a pressão osmótica nas células vegetais quando os produtos fertilizantes entram em contato com o solo e sua umidade. Parte da água disponível leva o fertilizante a se solubilizar, ou seja, dissolver-se na água que o solo contém. Dessa forma, cria-se um ambiente hipertônico, onde a concentração do soluto, nesse caso do fertilizante, é maior, necessitando de uma maior concentração de água para dissolver-se. Assim, as células vegetais, principalmente as células que compõem os tecidos das sementes e/ou das raízes que se desenvolvem inicialmente sofrem com a redução dessa água disponível, deixando as células em estado de plasmólise, ou seja, com menor quantidade de água no seu interior.

Essa pressão é responsável por injúrias nas sementes reduzindo a germinação e o *stand* final de plantas. Os produtos que apresentam maior índice de salinidade são o cloreto de potássio (KCl), o nitrato de amônio (NH_4NO_3) e o nitrato de sódio (NaNO_3).

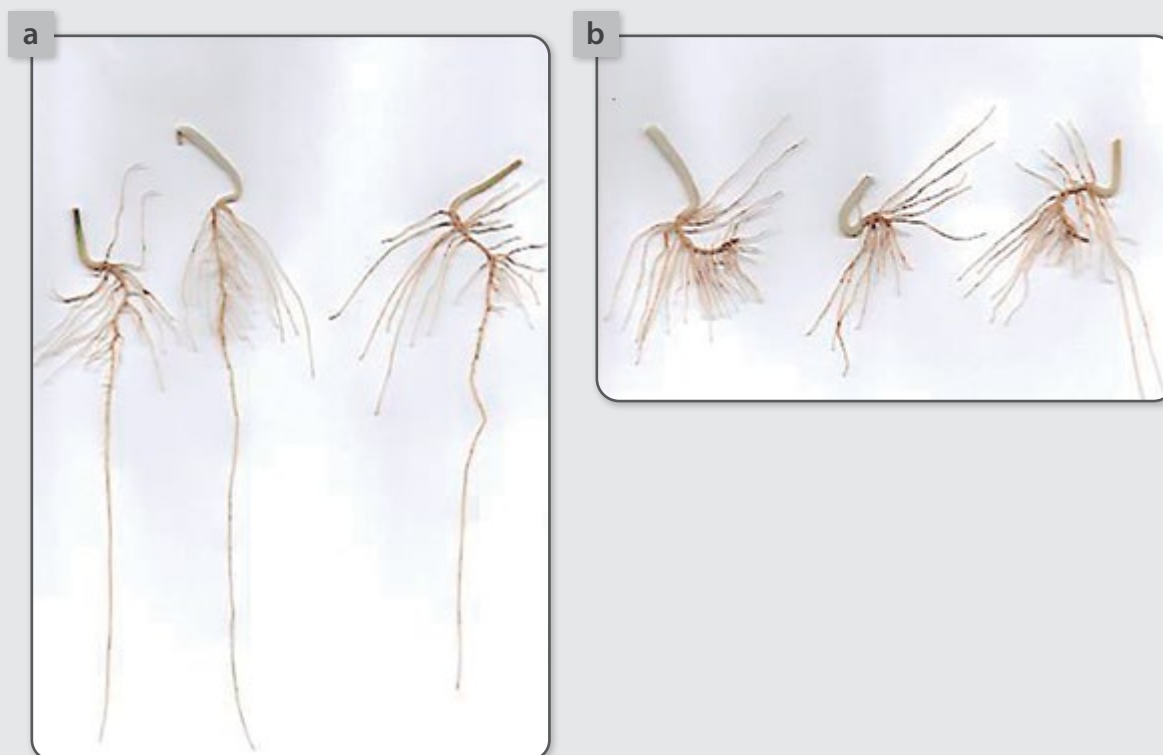
A salinidade é característica em produções agrícolas com fertirrigação com isolamento de chuvas, como é o caso de culturas olerícolas cultivadas em estufas. Obviamente, os problemas de salinidade se agravam quando as dosagens de fertilizantes aplicados estão em níveis incorretos e excessivos.

2.1.2 Propriedades físicas dos solos

A densidade do solo é um fator físico identificado pela massa que o solo apresenta em um determinado volume, afetando o crescimento radicular de plântulas de soja desenvolvidas em rizotrons, conforme Figura 5. Esses equipamentos são vasos com volumes variados que possuem uma parede de vidro, facilitando observar o crescimento do sistema radicular. É uma metodologia bem simples, porém muito eficiente para observar o comportamento das raízes frente às alterações do solo.

Quando o solo apresenta densidades muito elevadas, em camadas superficiais, caracteriza-se uma compactação do solo. A compactação é um efeito do uso incorreto do maquinário agrícola, com peso excessivo e alta umidade no solo durante os processos de preparo do solo, semeadura, pulverizações para controle preventivo e curativo de pragas, doenças e plantas daninhas e processos de colheita. A textura do solo também influencia para intensificar esse processo, principalmente quanto maior for o teor de argila no solo. Dessa forma, densidades superiores a $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ para solos argilosos e densidade superior a $1,7 \text{ g cm}^{-3}$ para solos arenosos indicam a formação de compactação no solo.

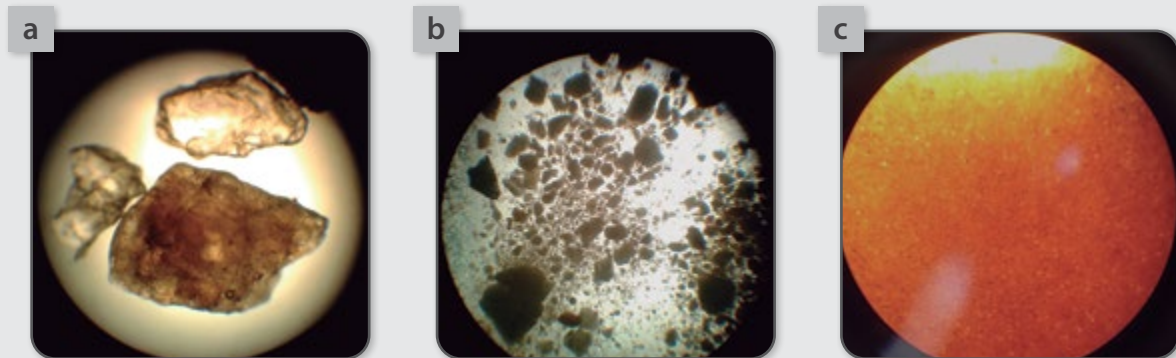
Figura 5 – Digitalização do sistema radicular de soja desenvolvido em rizotrons durante cinco dias, sob diferentes densidades do solo como $0,95 \text{ g cm}^{-3}$ (a) e $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ (b).



Fonte: A autora.

Quanto à textura, é uma propriedade física que indica os teores das frações granulométricas da areia, silte e argila, conforme observado na Figura 6, nem sempre esses parâmetros estão descritos nas análises de rotina. A textura pode ser avaliada através do tato pelos parâmetros: sensação de aspereza, que indica uma maior concentração de areia; sedosidade, indicando uma maior concentração de silte; e, por fim, plasticidade e pegajosidade, indicando uma maior concentração de argila.

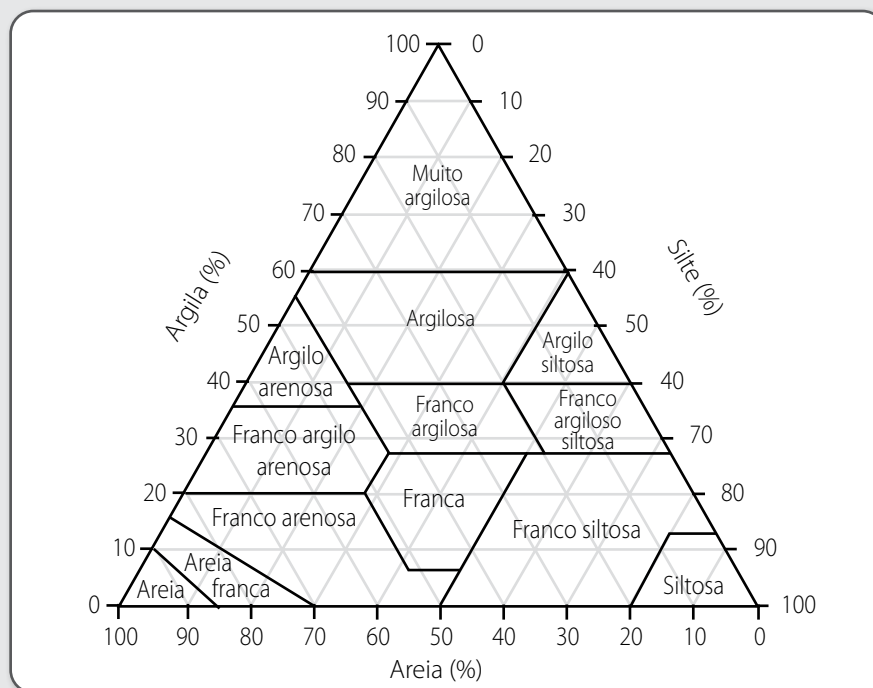
Figura 6 – Amostras de areia (a) observadas em microscópio óptico em aumento 100 vezes, silte (b) e argila (c) em aumento de 40 vezes.



Fonte: A autora.

A proporção dessas partículas define a textura do solo, avaliada através da porcentagem, existindo diferentes combinações. Para facilitar o processo de identificação, o sistema gráfico do triângulo textural é a representação gráfica para identificação dessas classes, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Triângulo de classificação textural de solos.



Fonte: Lemos; Santos, 1984.

Outra propriedade física do solo que interfere no desenvolvimento radicular envolve os processos de gênese da estrutura dos solos. A estrutura do solo caracteriza o estado de agregação das partículas podendo ser: granular, em blocos, em lâminas, colunar ou prismática. A estruturação envolve dois processos: a forma de aproximação das partículas e a estabilização dos agregados através do processo de cimentação.

Nesse processo de agregação, ocorre a interação entre os componentes do solo como a quantidade, grau de floclulação e o tipo de argila, capacidade de adsorção de cátions trocáveis, pressão causada pelas raízes e exsudatos radiculares, e a presença da microbiota do solo e alguns organismos com maior tamanho, interagem sobre a agregação. Além disso, em todo este processo de estabilização existe a ação da matéria orgânica que, ao longo do processo de decomposição, favorece a agregação de todos esses componentes.

A Figura 8 mostra dois solos bem distintos quanto à sua agregação. A primeira imagem (Figura 8a) é um perfil de solo com estrutura em blocos nas camadas superficiais e estrutura granular nas camadas mais profundas. Esse tipo de estrutura facilita a percolação de água e nutrientes ao longo do perfil, porém garante que a matéria orgânica permaneça na superfície até os 40 cm; dessa forma, sua presença garante uma maior fertilidade ao solo. Já o segundo perfil de solo (Figura 8b) apresenta um tipo de estrutura maciça, ou seja, não existe uma estrutura bem definida. Nesse solo, a água permanece acumulada por um período maior de tempo, a matéria orgânica acaba percolando para camadas mais profundas, evidenciado pela camada mais escura perto dos 40 cm de profundidade, alterando as condições de fertilidade desse solo e inviabilizando seu uso agrícola.

Figura 8 – Perfis de solo com estruturas distintas quanto ao uso agrícola.



Fonte: A autora.

Dessa forma, podemos definir que um solo com um estado ideal de agregação e estrutura apresenta um número de poros que proporcione a entrada e manutenção de ar e água no solo, drenagem eficiente, resistência aos processos erosivos e permita o crescimento radicular que explore um volume de solo para captação de água e nutrientes.

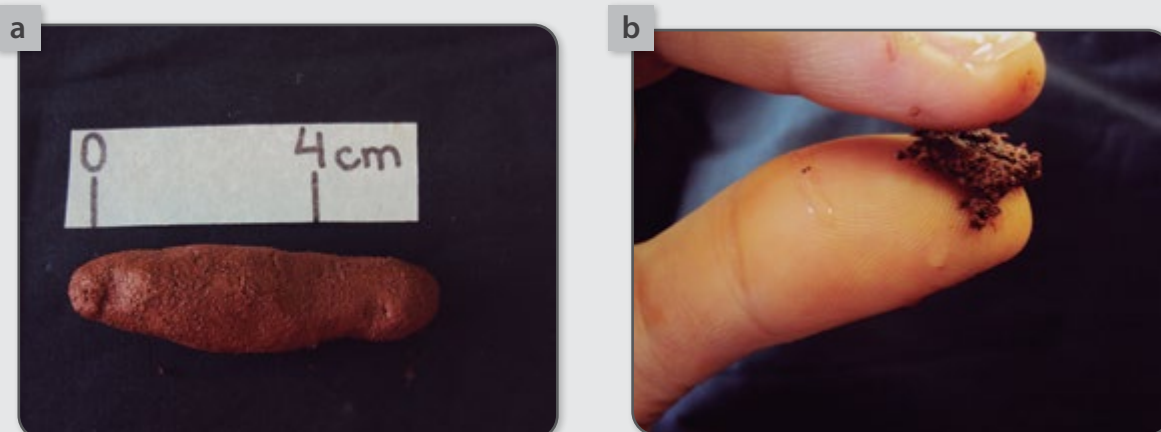
Por fim, outro parâmetro físico que interfere não somente no desenvolvimento das plantas, mas também nos procedimentos de mecanização agrícola, é a consistência do solo. Trata-se do diagnóstico referente às forças de pressão e manipulação em diferentes umidades, devido à influência da água nas forças de adesão e coesão das partículas minerais do solo.

A consistência deve ser avaliada em três condições de umidade: amostras secas em estufa de fluxo contínuo de ar a 60 °C durante 24 horas, amostras em umidade de capacidade de campo e saturadas em água. Os diferentes teores de umidade indicam diferentes respostas quanto à capacidade de quebra e à força que podemos exercer sobre o solo. Dessa forma, podemos classificar as diferentes amostras nas seguintes condições: amostras secas são avaliadas como soltas, macias e duras; amostras na umidade de campo são avaliadas como friáveis e firmes; e amostras saturadas em água são avaliadas quanto à pegajosidade e a plasticidade, conforme a Figura 9.

Essa característica do solo é extremamente importante para tomada de decisões quanto ao uso do maquinário agrícola. Com a adoção do sistema plantio direto, as máquinas agrícolas precisam exercer uma força sobre o solo para serem eficientes quanto ao corte da palhada. Obviamente, essa força é obtida pelo peso desse maquinário e dos seus implementos. O diferente grau de umidade do solo irá alterar sua consistência e, por sua vez, a resposta quanto à capacidade de moldagem desse solo sob a ação do peso das máquinas.

A identificação da consistência do solo reduz a formação de camadas compactadas com a entrada do maquinário agrícola em condições de umidade correta, assim, não é necessário reduzir o peso das máquinas, não perdendo sua eficiência de corte de palhada e, evidentemente, respeitando os limites de cada solo.

Figura 9 – Avaliação de plasticidade (a) e pegajosidade (b) de amostras de solos coletadas no horizonte A.



Fonte: A autora.

Sistema de manejo do solo afetam as forças de coesão do solo, rompendo sua estrutura e interagindo diretamente com a consistência, uma vez que atua sobre sua compressibilidade, indicada pela capacidade de suporte de forças em função da umidade em capacidade de campo.

2.1.3 Propriedades químicas dos solos

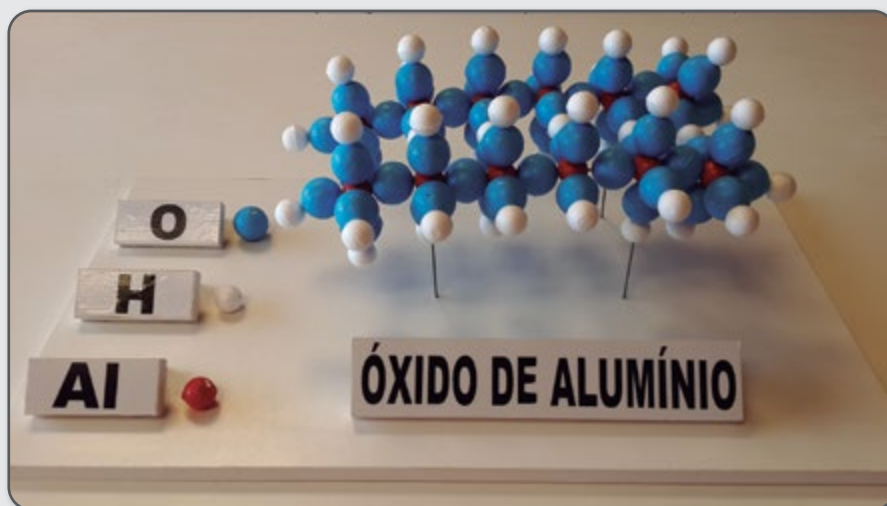
Os fatores de natureza química podem influenciar, positiva ou negativamente, o crescimento das plantas. Porém, é difícil classificá-los ou separá-los, pois em muitos casos, estão intimamente relacionados e interagem entre si, sendo os principais a composição mineralógica, disponibilidade de nutrientes, presença de elementos tóxicos, presença de metais pesados, teor de matéria orgânica, redução e oxidação e salinidade.

A composição mineralógica dos solos afeta a capacidade de troca de cátions e ânions, indicada pelo grau de intemperismo e tempo geológico para formação do solo. Solos altamente intemperizados, característicos de regiões tropicais, sofrem com a incidência de precipitações e elevada percolação de água acarretando no transporte do silício, elemento sempre presente nas argilas silicatadas.

As argilas silicatadas compõem a estrutura química dos solos. São resultado do processo de intemperismo de minerais e rochas, e constituem os principais componentes do solo. Apresentam características distintas de acordo com o tipo de argila formada, pelo processo de intemperismo que a gerou e pela qualidade química do seu material de origem, mas, de uma forma geral, gerem os processos de troca de cátions e ânions no solo, parâmetro importante para definir a fertilidade natural do solo e a capacidade de retenção dos nutrientes fertilizados.

À medida que os processos de intemperismo vão ocorrendo nos solos, a estrutura molecular vai se rompendo, ocorrendo substituições de elementos por outros ou falhas químicas que proporcionam o aparecimento de cargas elétricas. Essas cargas elétricas, nas condições de solos tropicais, são geralmente negativas, portanto atraem cargas positivas, interferindo na capacidade de troca de cátions (CTC) dos solos. Quanto maior o grau de intemperismo, menor será o teor de silício nas argilas, reduzindo a CTC dos solos até que haja um ponto em que todo o silício é perdido da estrutura, transformando as argilas silicatadas em óxidos ou hidróxidos, principalmente de ferro e alumínio, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Representação da estrutura molecular do óxido de alumínio, demonstrando a formação de cargas pela saída do hidrogênio nas bordas no mineral.



Fonte: A autora.

As relações de troca entre os minerais de argila ou os óxidos e hidróxidos definem o complexo químico do solo, em conjunto com o material orgânico. A capacidade de retenção dos minerais nutrientes é maior quanto maior for o conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS). Por isso, sistemas de manejo que degradam a matéria orgânica de maneira mais lenta e gradual tendem a apresentar uma maior CTC e fertilidade, como é o caso do sistema plantio direto. Já sistemas que revolvem mais o solo, o processo de decomposição do material orgânico é muito mais rápido, perdendo parte da capacidade de fornecimento dos nutrientes. Outro fator relevante é que, nesse tipo de sistema de manejo, a desagregação e a exposição ao sol alteram a atividade da biota do solo e facilitam a lixiviação e perdas de nutrientes.

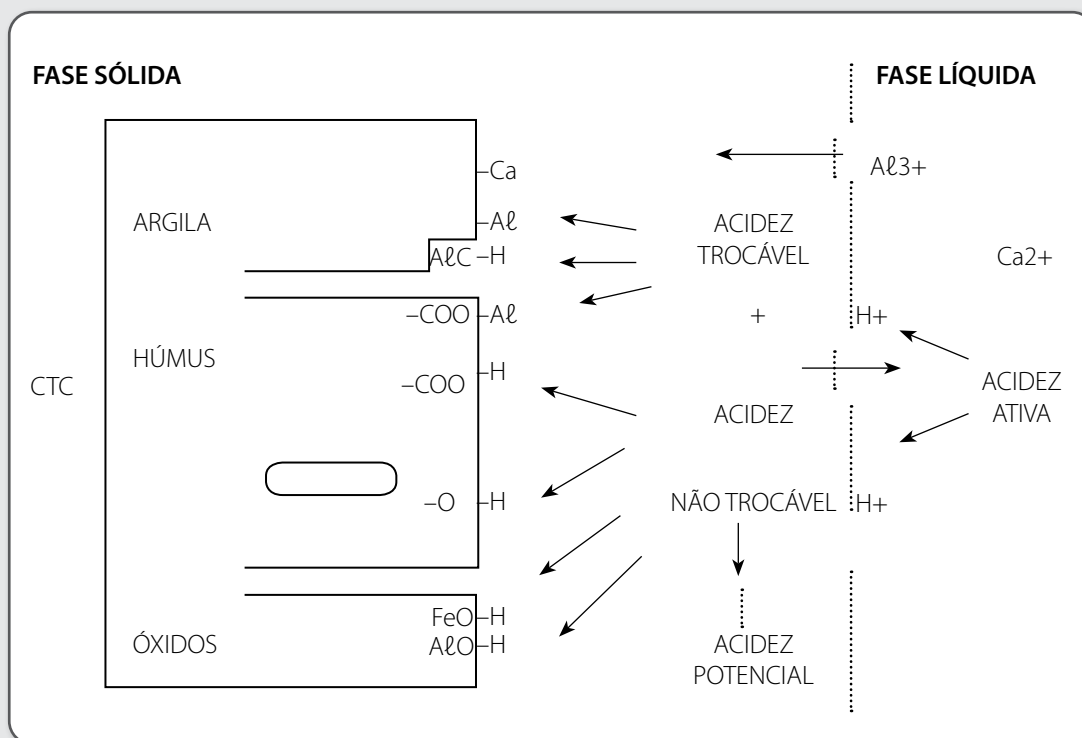
Dessa forma, a composição mineralógica em conjunto com a matéria orgânica do solo define a disponibilidade dos nutrientes. Todos os nutrientes que estão dissolvidos na solução do solo tornam-se prontamente disponíveis para as plantas. Existe uma força de atração das cargas elétricas do solo, que pode ser interna ou nas extremidades. Quando a força de atração é interna, dizemos que o nutriente está fixado, tornando indisponível para as plantas, inclusive a longo prazo. Entretanto, quando a força de atração ocorre nas bordas do argilomineral ou do material orgânico, essa força pode ser rompida ou por um agente intempérico ou pela ação das raízes. Dessa forma, o nutriente que estava adsorvido eletrostaticamente passa a fazer parte da solução do solo, podendo ser absorvido pelas plantas. Um dos elementos que mais sofre o processo de fixação é o fósforo (P); sua eletronegatividade caracteriza essa fixação em solos, principalmente nos mais intemperizados, característicos de regiões tropicais como o Brasil.

Apesar disso, nem sempre todas as características químicas estejam favoráveis ao desenvolvimento das plantas. A presença de alguns elementos tóxicos pode inibir o crescimento do sistema radicular. O alumínio (Al^{+3}), quando presente na solução do solo, afeta as células do meristema apical, cessando a divisão celular. Esse efeito sobre as células paralisa o crescimento e induz a formação de raízes secundárias, que possuem menor poder de absorção e menor área para captação de nutrientes quando comparadas às raízes primárias. Outro elemento que quando presente em solução do solo interfere sobre a disponibilidade dos outros é o hidrogênio (H^+), embora não seja considerado um elemento tóxico em si. A fração de íons H^+ no solo é muito reduzida, porém extremamente ativa, dessa forma avaliamos o potencial com que o hidrogênio atua sobre o solo, indicado pelo pH do solo (potencial hidrogeniônico).

O pH do solo não afeta diretamente o crescimento radicular ou qualquer outro aspecto inerente as plantas. Seus efeitos afetam a disponibilidade de nutrientes à medida que se alteram os valores do pH. De uma maneira geral, podemos caracterizar que a maioria dos micronutrientes estão mais disponíveis em pH mais ácido, abaixo de 3,0 (exceção do molibdênio, cloro e boro); enquanto que os macronutrientes se tornam mais disponíveis em pH ainda ácidos, porém mais altos, entre 6,0 e 7,0. Além disso, a concentração de alumínio é alta em pH abaixo de 5,0; a partir deste valor passa a decrescer substancialmente.

Ambos os elementos indicam fatores que interferem na acidez do solo, ora acidez ativa determinada pelas variações do H^+ em solução, representada pelo pH do solo, ora acidez potencial sugerida pela relação existente entre as frações de H^+ e Al^{+3} .

Figura 11 – Representação esquemática da interação entre as argilas do solo e a complexação do alumínio e alterações do pH, indicada pela presença do H^+ .



Fonte: Lopes; Silva; Guilherme, 1991.

Outros elementos que afetam o crescimento das plantas é a presença de metais pesados. Alguns elementos como cádmio, chumbo, níquel e até mesmo o zinco quando em níveis muito elevados. A principal característica dos metais pesados é apresentar uma massa específica, uma massa atômica e um número atômico todos estes índices expressos de maneira muito elevada. Para a massa específica, os valores de referência para os metais pesados estão entre 3,5 e 7,0 g cm⁻³; quanto à massa atômica, utilizamos o sódio como referência, o qual apresenta massa atômica igual a 23; e quanto ao número atômico, utilizamos o cálcio como referência, com número atômico igual a 20.

As principais fontes dos metais pesados no solo é a contaminação com escórias industriais, resíduos urbanos, mineração, queimas de combustíveis fósseis e material orgânico sem prévio preparo de curtimento. Quando essas fontes são manejadas incorretamente no solo, a contaminação eleva os níveis dos metais pesados, excedendo a capacidade de tolerância das plantas, afetando seu desenvolvimento e produtividade, conforme Figura 12.

Figura 12 – Efeitos do excesso de manganês em folhas de ornamental, provocados pelo excesso de calagem no substrato.



Fonte: A autora.

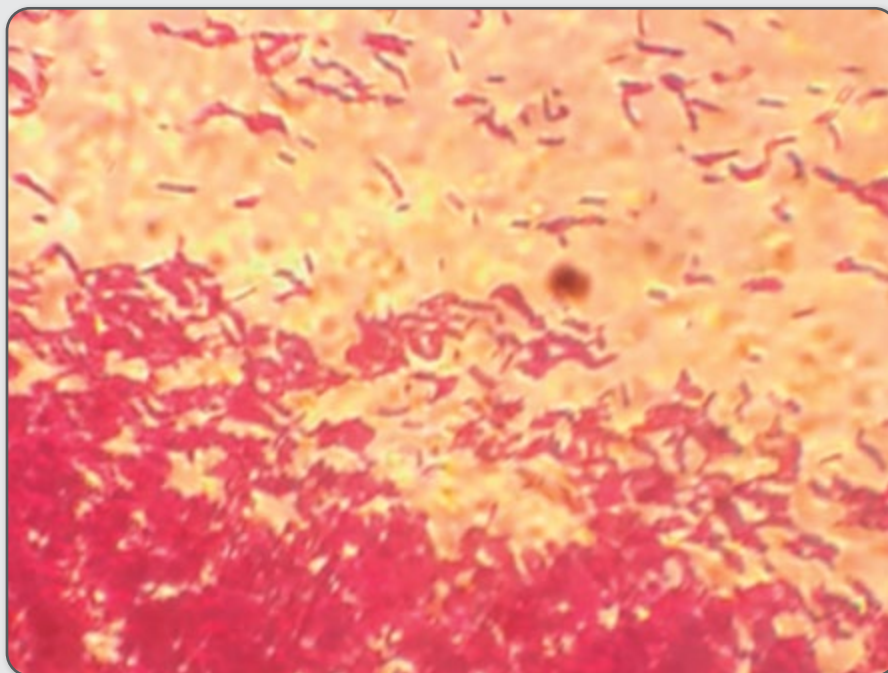
Todo metal pesado apresenta, por característica química, contaminação de cadeia trófica, permanecendo nos indivíduos por várias gerações e ao longo da cadeia alimentar. Além disso, seu alto peso atômico torna-os viáveis à percolação quando dispersos em meio aquoso, acumulando-se nos solos e nos mananciais de água.

Para informações quanto à contaminação ambiental e humana, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama) propõe a Resolução n. 420, de dezembro de 2009, que estabelece os valores de referência máximos para os possíveis contaminantes de água e solo, observados sob uma ótica agrícola, residencial e industrial. Por exemplo, elementos como o cádmio, o chumbo e o níquel apresentam como valores de referência máximos para solos agrícolas: 3 mg kg^{-1} , 180 mg kg^{-1} e 70 mg kg^{-1} de solo.

Porém, entre todas as características químicas dos solos, a presença de matéria orgânica tem grande destaque. Trata-se de todo material de origem orgânica, com presença de carbono em sua estrutura e em diferentes graus de decomposição. Toda decomposição de material orgânico estimula a atividade microbiana do solo (Figura 13), liberando os elementos constituintes desse material para a solução do solo.

Dessa forma, existe uma correlação positiva entre todos os elementos: as raízes vegetais de beneficiam dos elementos liberados do material orgânico em decomposição e liberam exsudatos, compostos nutritivos que atraem a atividade biológica; por sua vez, a atividade biológica atua na decomposição da matéria orgânica próxima das raízes, pois é o local onde se encontra a maior concentração de nutrientes devido aos exsudatos; por fim, a solução do solo fica enriquecida de elementos químicos liberados do material orgânico decomposto. Todos os três elementos, raízes das plantas, microbiota e solução do solo, interagem entre si promovendo a manutenção do sistema.

Figura 13 – Microbiota do solo visualizada em microscópio óptico com aproximação de 60x, composta por bactérias gram-negativas do tipo bastonetes.



Fonte: A autora.

Outro benefício notável do material orgânico do solo é a estabilização dos agregados do solo. A agregação depende muito da velocidade de decomposição do material orgânico, podendo ser variável pela constituição química dos tecidos vegetais, indicado pela relação C/N. Quanto maior a relação entre quantidade de carbono existente, quando comparado ao nitrogênio, maior será o tempo em que esse material irá ser decomposto. Por essa razão, as leguminosas apresentam velocidade de decomposição mais rápida, uma vez que a fixação biológica aumenta o conteúdo de nitrogênio absorvido, que será translocado para os tecidos vegetais.

Uma relação pouco explorada, mas com grande informação agrícola, principalmente por se tratar de um elemento com processos diferenciados no solo, é a relação C/P. As relações entre esse elemento e o solo são bem particulares, apresentando baixo conteúdo em solos naturais,

principalmente pelo material de origem formador de solo que libere pequenas quantidades desse elemento. Além disso, os processos geoquímicos e biológicos transformam o fósforo oriundo dos fosfatos naturais no solo em formas estáveis, combinando com outros elementos, como cálcio, ferro ou alumínio, e formando compostos não assimiláveis pelas plantas.

Dessa forma, a fixação de fósforo no solo pode ser atenuada em sistemas de manejo com maior aporte de material orgânico, como a semeadura direta sobre a palha. Entretanto, apesar de o fósforo orgânico ser uma forma bastante solúvel, esse elemento encontra-se imobilizado, portanto em uma forma não assimilável para as plantas. Somente através da mineralização desse material orgânico, parte do elemento será liberado e, em seguida, preso ao complexo coloidal do solo, tornando-se disponível por meio de trocas com as raízes, e outra parte será assimilável quando diluído na solução do solo, sendo facilmente absorvido pelas plantas.

Uma das soluções prática para a correção da deficiência de fósforo é a fertilização com fontes orgânicas (Figura 14). Essas fontes apresentam melhor fixação do fósforo pelo solo, uma vez que são facilmente diluídas apesar de apresentarem menor concentração dos nutrientes.

Figura 14 – Sintoma de deficiência de fósforo em aveia preta e fertilização de solo com uma fonte orgânica com cinza leve de biomassa.



Fonte: A autora.

Essas relações, tanto C/N quanto C/P podem ser diferentes tanto entre espécies vegetais, partes da planta e potencial genético. Ferreira et al, 2014 observando diferentes cultivares de milho com níveis tecnológicos que variaram entre híbridos simples, triplos, duplos, variedades melhoradas e regionais quantificou a relação C/P nas folhas e nos colmos, conforme Quadro 1.

Quadro 1 – Relação carbono/fósforo (C/P) em folhas e colmos em cultivares de milho com diferentes níveis tecnológicos genéticos.

Cultivares de milho com diferentes níveis tecnológicos genéticos	Relação C/P	
	Folhas	Colmo
Híbridos simples	592	661
Híbridos triplos	404	628
Híbridos duplos	407	537
Variedades melhoradas	374	414
Variedades regionais	362	343

Fonte: Ferreira et al, 2009.

Esses autores puderam observar que as cultivares com maior ganho tecnológico apresentam cadeias químicas com maior constituição de carbono e, conseqüentemente, maiores relações C/P. Dessa forma, o material orgânico fornecido por híbridos tendem a decompor-se mais lentamente e ter um fornecimento de fósforo orgânico de maneira mais lenta e gradual.

Alguns solos apresentam condições especiais que alteram toda a composição química, como é o caso de solos que apresentam excesso de água ou excesso de sais.

No caso de solo hidromórficos, ou seja, com excesso de água, conforme Figura 15, o processo de hidromorfia confere algumas características peculiares, como arejamento deficiente, decomposição mais lenta de matéria orgânica, menor atividade microbiana e reações de redução e oxidação de elementos, como o ferro e o manganês.

Figura 15 – Solos com presença constante de excesso de água, caracterizado pela coloração escura e acúmulo de material orgânico.



Fonte: A autora.

Esses processos de redução e oxidação, em conjunto com o acúmulo de material orgânico, conferem aos solos hidromórficos uma coloração escura acinzentada, podendo apresentar variações de preto, azul e verde, além de propiciar riscos de toxidez às plantas. São solos localizados em regiões mais baixas do relevo, não indicados para uso de agricultura, devendo ser respeitados como área de preservação permanente.

Já solos que apresentam elevadas concentrações de sais também conferem algumas características peculiares. Quando ocorre acúmulo natural de sal (Figura 16), os solos estão localizados em regiões com baixa precipitação pluviométrica e relevos de baixada, que propiciam seu acúmulo. Sais são elementos floclulantes em solo, portanto aumentam a macroporosidade e as reações dispersivas entre as partículas do solo.

Figura 16 – Solos afetados por excesso natural de sais, principalmente cloreto de sódio (NaCl) na superfície.

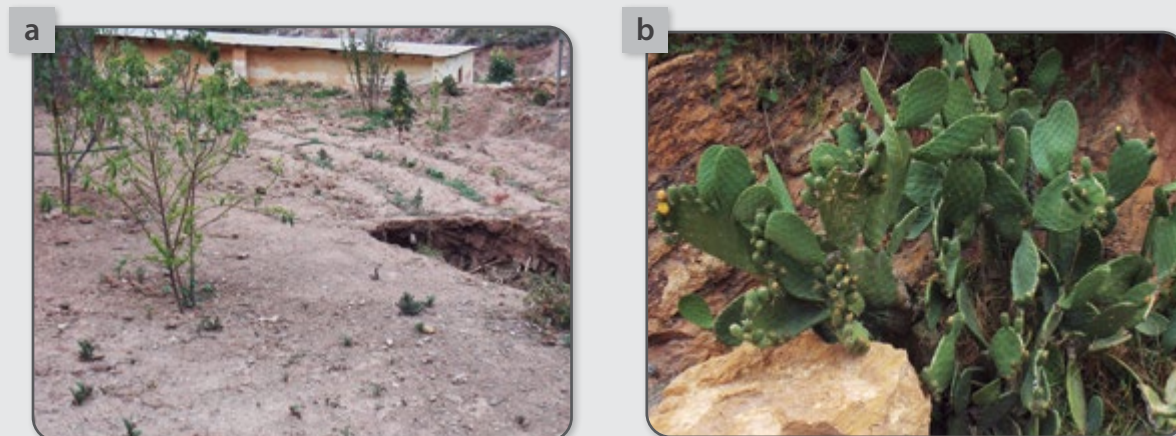


Fonte: A autora.

Solos afetados por sais apresentam altas concentrações da maioria dos elementos químicos, justamente por seu acúmulo estar relacionado com os baixos índices de precipitação e depressões no relevo, proporcionando o acúmulo desses elementos. Dessa forma, quando o acúmulo de sal está relacionado ao manejo incorreto de fertilizantes agrícolas principalmente fornecidos através de sistemas de fertirrigação a produtividade das culturas decai, onerando os produtores. Esses casos de acúmulo de sais são muito comuns em sistemas de cultivo de hortaliças e flores em estufas com sistema de irrigação por gotejamento, mas também ocorre em sistemas agrícolas com grandes culturas principalmente devido à posição do fertilizante em relação à colocação da semente.

Poucas plantas toleram o excesso de sais nos solos. Além disso, por se caracterizarem em regiões com baixos índices pluviométricos, a vegetação característica é xerófita quando existentes em tais condições, conforme a Figura 17.

Figura 17 – Vegetação característica de regiões com solos afetados por sais (a) e características da superfície do solo (b).



Fonte: A autora.

2.1.4 Fatores de ordem climática

Morfogênese significa o desenvolvimento da forma. Para as áreas da pedologia, definimos os aspectos de morfogênese do relevo e dos solos. Através desses conceitos, podemos realizar a classificação dos solos e sua aptidão de uso.

Dessa forma, os fatores climáticos são responsáveis pela formação da morfogênese de relevo e do solo, caracterizando as propriedades intrínsecas de cada solo, principalmente precipitação, seja na quantidade ou distribuição ao longo de um período, oscilações térmicas, incidência de ventos variando na velocidade e presença de geadas.

Todos esses fatores interferem diretamente no desenvolvimento das plantas e sobre os componentes do solo, inclusive sobre o desenvolvimento do sistema radicular, dependente dessas condições de clima e solo. A correlação existente entre os fatores de ordem climática e os solos não deve ser somente observada sob a ótica de formação do solo, mas também sobre as transformações e reações químicas durante o desenvolvimento de plantas, inclusive de ciclo curto.

2.1.5 Ganhos e perdas dos nutrientes em sistemas agrícolas

Os processos de perdas e ganhos de elementos químicos nos solos estão relacionados aos sistemas de manejo, desde fertilizações, correções quanto à acidez, formas de incorporação de material orgânico, método de revolvimento ou ausência total de inversão de camadas, entre outras características. Quanto melhor for o manejo do solo, maior será a adição e manutenção das características químicas que propiciam a retenção dos nutrientes. É claro que as condições climáticas também afetam os processos de perdas e ganhos dos nutrientes, principalmente

precipitação e percolação de água no solo. Entretanto, quanto melhor o manejo, maior será o suporte dos nutrientes no sistema, independentemente de as condições climáticas serem mais adversas. No caso de solos malmanejados, os processos de carreamento de nutrientes estão associados às perdas de partículas minerais através dos processos erosivos, conforme a Figura 18.

Figura 18 – Área com processo de erosão entre sulcos.



Fonte: A autora.

O melhor manejo de solo é aquele que propicia que cada nutriente perdido por lixiviação ou por extração pelas plantas deve ser repostado ao sistema solo para manter o equilíbrio das concentrações dos nutrientes em solução. Essa afirmação segue uma das leis da fertilidade do solo: a Lei da Restituição, proposta por Voisin. Essa lei baseia-se na necessidade de restituir ao solo os nutrientes absorvidos pelas culturas comerciais e exportados com as colheitas, considerando o esgotamento dos solos em decorrência de cultivos sucessivos, como uma das origens da redução da produtividade.

Porém, essa lei apresenta algumas limitações quando estamos cultivando em solos com baixa fertilidade natural ou apresentam problemas relacionados à acidez ou salinidade.

2.2 FORMAS DE INCORPORAÇÃO DE ADUBO AO SOLO

Fertilizações de solo são essenciais para os sistemas agrícolas, elevem os teores de nutrientes para as plantas, estabilizam as reações de sorção e dessorção dos elementos no solo, beneficiam por ação sinérgica o fornecimento de outros elementos não fertilizados, além de aumentar a capacidade absorptiva das raízes, o desenvolvimento da biota do solo e, conseqüentemente, acarretam em ganhos na produtividade das culturas.

Entretanto, para que todos esses benefícios sejam atingidos, é indispensável incorporar os fertilizantes ao solo adequando sua dosagem conforme a necessidade do solo e as exigências da cultura comercial. Esses dois fatores devem estar relacionados com a forma de incorporação dos fertilizantes, levando-se em consideração aspectos como a mobilidade e a forma de absorção dos elementos pelas plantas.

2.2.1 Adubações de base no plantio

As adubações de base são realizadas juntamente aos processos de semeadura. Trata-se de uma forma de adubação corretiva visando suprir as necessidades iniciais das culturas comerciais, em função das carências nutricionais dos solos.

O princípio básico da adubação de base é observar o efeito residual dos elementos que são aplicados ao solo. O efeito residual depende de cada elemento e da capacidade absorviva do solo. Além disso, a mobilidade do elemento também deve ser levada em consideração. Elementos muito móveis tendem a ser mais facilmente lixiviados, por isso são aplicados em doses mais elevadas.

Uma vez que se elevam as doses aplicadas do fertilizante, pode ocorrer um efeito negativo ao desenvolvimento inicial das sementes, havendo a necessidade de parcelamento na aplicação do fertilizante em cobertura.

Os principais fertilizantes aplicados na base de plantio são o nitrogênio, o fósforo e o potássio. Entre esses três nutrientes, o fósforo fica restrito somente à base de plantio, uma vez que apresenta uma baixa mobilidade, alta capacidade de fixação e, ainda, é necessário aumentar sua concentração para que as plantas possam absorver mais rapidamente.

O cálcio e o magnésio, geralmente, são fornecidos através do processo de calagem, mas também são elementos fornecidos na base através de fertilizantes, principalmente em culturas específicas, como citros, maçã e algodão.

Outro elemento comumente aplicado na base do plantio é o boro. Trata-se de um elemento fornecido por fertilizantes granulados ou em pó, como o ácido bórico, bórax ou ulexita, requerido pelas plantas na fixação das flores e, conseqüentemente, aumenta a produtividade pela retenção de vagens em leguminosas em geral, com respostas frequentes em feijão.

Uma das características da aplicação na base do plantio é a uniformidade na distribuição do adubo. Obviamente, o maquinário agrícola deve estar em ordem, bem regulado e o fertilizante deve estar em boas condições para a sua aplicação. Caso contrário, a resposta das plantas para a desuniformidade de aplicação é nítida, conforme demonstra a Figura 19, em que o fertilizante orgânico foi incorporado ao solo pela enxada rotativa de maneira desuniforme, observando claramente as diferenças quanto ao crescimento na cultura do brócolis (*Brassica oleracea*).

Figura 19 – Desuniformidade na aplicação de fertilizante orgânico com reflexo no desenvolvimento da cultura do brócolis.



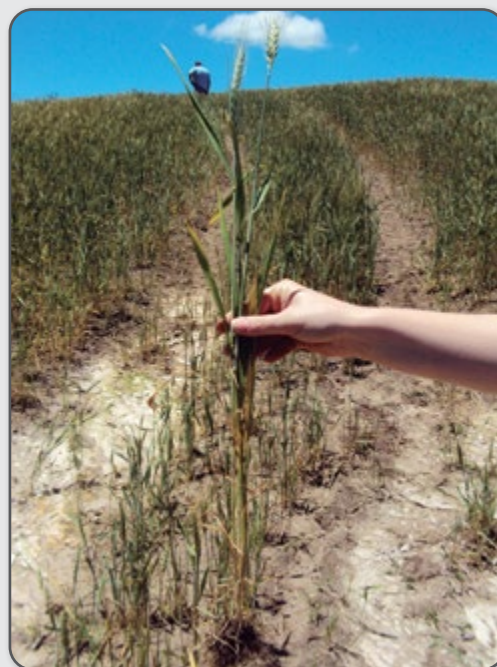
Fonte: A autora.

2.2.2 Adubações de cobertura

As adubações em cobertura são complementares às adubações de base. Trata-se da disposição do fertilizante em estágios mais avançados do desenvolvimento da cultura. Dessa forma, não somente como complemento à adubação de base, a fertilização em cobertura pode ser preventiva ou de segurança aos sintomas de deficiência que as culturas apresentarem ao longo do seu desenvolvimento.

As plantas são responsivas aos elementos do solo, por exemplo, plantas de trigo receberam na adubação de base todo o nitrogênio necessário conforme sua exigência em relação às deficiências que o solo apresentou. Entretanto, as condições do solo foram desfavoráveis à retenção da ureia aplicada em base, havendo uma necessidade de reposição desse nutriente em cobertura, conforme a Figura 20.

Figura 20 – Planta de trigo com sintomas de deficiência de nitrogênio, baixa estatura e espigas de tamanho pequeno.



Fonte: A autora.

Os fertilizantes mais aplicados em cobertura nos sistemas agrícolas são o nitrogênio e o potássio. Ambos os nutrientes são aplicados em cobertura como forma de minimizar o impacto de elevadas doses de fertilizante sobre a germinação das sementes, como o efeito salino discutido anteriormente.

No caso do nitrogênio, cuja principal fonte é o fertilizante ureia, apresenta inúmeros produtos com uma estabilização melhor para evitar a volatilização do nutriente, principalmente quando aplicado em cobertura no solo. Essa ureia, que chamamos de polimerizada, deve ser utilizada nos casos de necessidade de aplicação em cobertura. Já o potássio é aplicado em cobertura devido a seu efeito salino.

2.2.3 Adubações foliares e tratamento de sementes

As adubações foliares baseiam-se no princípio de absorção dos nutrientes em tecidos que compõem a parte aérea das plantas. Nesse sentido, as folhas, por apresentarem os estômatos (Figura 21), que são orifícios que realizam trocas gasosas e controlam a transpiração da planta, são veículos eficientes em absorção, quando comparados aos ramos, galhos e troncos, que são estruturas mais rígidas pelo alto conteúdo de lignina.

Figura 21 – Observação do limbo foliar com a presença dos estômatos em lente de aumento 60x.



Fonte: A autora.

O nutriente que é aplicado através da adubação foliar, não precisa passar por processos e reações como os componentes que são absorvidos via solo. Para que um nutriente possa ser aproveitado, ele precisa passar por alguns processos que o transformam em um componente estrutural de uma substância que participa do metabolismo. Uma vez que o nutriente foi absorvido pelas folhas, parte desse processo é reduzido e sua eficiência está condicionada em qual papel ele atua em tal processo.

A aplicação foliar deve ser realizada em doses baixas e com a presença de água, na forma de pulverizações, uma vez que pode acarretar em fitotoxidez, provocando a queima do tecido. A Figura 22 apresenta queima do tecido foliar de beterraba devido ao excesso de aplicação foliar de cálcio e enxofre.

Para alguns elementos não existe nenhuma restrição nesse processo e o tempo de absorção reduz. Entretanto, sua eficiência é mais vinculada aos micronutrientes, cuja maioria é pouco móvel nos tecidos vegetais. Dessa forma, sua eficiência é maior quando a aplicação atinge partes da planta que a deficiência é notada, atingindo os tecidos em que o sintoma de deficiência é evidente. A principal restrição da adubação foliar está caracterizada pela idade da planta. Como deve ser tratada de uma forma mais curativa do que preventiva, a planta já está em estágio de desenvolvimento avançado, no qual o metabolismo já é mais lento e os resultados não ficam evidentes, principalmente quanto ao aumento em produtividade. Outra dificuldade da aplicação foliar, também relacionada com a idade da planta, é que o período de maior exigência nutricional são as fases iniciais do desenvolvimento.

Figura 22 – Queima dos tecidos foliares de beterraba (*Beta vulgaris*) devido à aplicação foliar com excesso de cálcio e enxofre.



Fonte: A autora.

Outra forma de aplicação de fertilizantes é através do tratamento de sementes. A aplicação de micronutrientes é eficiente na forma de pulverizações foliares. Entretanto, alguns micronutrientes têm dosagens muito baixas recomendadas, o que dificulta a homogeneização e distribuição desse nutriente. Assim, a aplicação do fertilizante via semente é muito mais eficiente e disponibiliza o elemento desde a primeira formação das radículas (Figura 23), ou seja, os primeiros tecidos emitidos pelas sementes que possuem capacidade de absorção de nutrientes, entretanto, ainda não apresentam todos os sistemas plenamente desenvolvidos, como os vasos condutores, para serem chamados de raízes.

Quando aplicadas diretamente nas sementes, os micronutrientes apresentam um efeito positivo, embora muitas vezes não acarrete em ganho produtivo. Sementes imersas em solução enriquecida com zinco (concentração de 0,0175g de óxido de zinco (ZnO) em 250mL de água destilada), durante 6 horas em sementes de soja, apresentaram melhor desenvolvimento radicular observados em rizotrons, conforme Figura 24.

Figura 23 – Radicelas de trigo com aplicação de inoculante.



Fonte: A autora.

Figura 24 – Desenvolvimento do sistema radicular de plântulas de soja no rizotron, com sementes imersas durante 6 horas somente em água destilada (a) e em solução enriquecida com zinco, após cinco dias da semeadura (b).



Fonte: A autora.

3 AMOSTRAGEM E ANÁLISE DE SOLO

A recomendação adequada de fertilizantes e corretivos agrícolas exige desde uma boa técnica de aplicação até a utilização de melhores fontes de nutrientes. Existem diversas técnicas que os produtores rurais adequam para uma recomendação de insumos agrícolas, mas sem dúvida a melhor delas é o diagnóstico do solo através da análise de solo.

Uma análise de solo relaciona os parâmetros do solo, mas por trás dessa análise laboratorial, muitos outros fatores estão envolvidos e devem ser relacionados, como: o histórico de utilização da área; tipo de solo e condições climáticas do local; o padrão tecnológico adotado pelo produtor; a cultura a ser implantada, diferenciando entre as culturas anuais, frutícolas, olerícolas, florestais, pastagens ou até mesmo sistemas que integram várias explorações agrícolas, como sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, conforme a Figura 25.

Figura 25 – Sistema agrícola de integração lavoura-pecuária-floresta, com formação de pastagens durante o inverno e culturais anuais no verão na entre linha do sistema florestal.



Fonte: A autora.

3.1 AMOSTRAGEM DO SOLO PARA IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS QUÍMICOS E FÍSICOS

Para que uma amostragem de solo tenha resultados confiáveis e que representem todas as condições do solo ao longo da área amostrada, é necessário que se realize uma amostragem correta, representativa e com processos rigorosos, independentemente de a quantidade de solo

coletada ser muito pequena quando comparada à quantidade de solo existente, ainda mais quando consideramos a profundidade efetiva do solo.

Todos os processos na aplicação de fertilizantes e corretivos agrícolas estão sujeitos a falhas, entretanto uma amostragem malconduzida é o erro mais significativo, uma vez que as análises laboratoriais e os processos de aplicação dos insumos agrícolas não corrigem essas falhas.

3.1.1 Critérios para realização de amostragem de solo para avaliação da fertilidade

Os critérios a serem avaliados para a realização de uma amostragem de solo são as características da cultura que será implantada, a topografia (declividade), sentido do escoamento da água e o tipo de solo, observando a taxa de infiltração de água, formação de camadas compactadas, profundidade e espaços porosos indicados pela classe textural.

O processo de amostragem consiste na retirada de amostra de solo em profundidades conhecidas, principalmente onde o sistema radicular atua com maior captação de nutrientes. De uma maneira geral, podemos relacionar que a profundidade efetiva do sistema radicular se assemelha ao tamanho da parte aérea. Entretanto, essa correlação é mais notável quando comparamos o volume ocupado, uma vez que alguns fatores podem interferir no desenvolvimento em profundidade, relação observada na Figura 26.

Para que seja realizada uma análise química, são necessários 10 g de solo. Isso significa que 10 g devem representar a quantidade de solo existente em grandes áreas. Se a avaliação representa uma área de 2 ha na camada de 0 a 0,20 m, considerando-se a densidade deste solo em 1 g cm^{-3} , a amostra corresponde a 1 bilionésimo da área amostrada. Por essa razão, a amostragem de solos deve ser realizada de maneira minuciosa para melhor representar a área total.

Alguns equipamentos auxiliam nas amostragens de solo, principalmente quando a coleta deve ser realizada em profundidades elevadas, conforme observamos o trado holandês na Figura 27. Além deste, outros equipamentos são utilizados para amostragem de solo, como trado calador, trado de rosca, cortadeira e pá reta, enxada e baldes.

Figura 26 – Volume ocupado pela parte aérea quando comparada ao volume ocupado pelo sistema radicular.



Fonte: A autora.

Figura 27 – Trado holandês para coleta de solo atingindo até 1 m de profundidade.



Fonte: A autora.

3.1.2 Frequência e época de amostragem de solos

A frequência de análise de solo varia em intervalos entre um a quatro anos, dependendo do número de aplicações de corretivos agrícolas e/ou das sucessões de culturas que serão implantadas na área. A frequência de amostragens de solo deve ser muito maior em culturas anuais e olerícolas quando comparadas às culturas frutícolas e florestais.

A amostragem deve ser realizada em um intervalo entre 3 a 8 meses antes do plantio. Esse período deve ser respeitado principalmente quando devem ser realizadas práticas corretivas de acidez com a aplicação de calagem e gessagem, por exemplo. Outro procedimento é evitar realizar coletas em um período logo após a aplicação de adubações, em um intervalo mínimo de 8 semanas quando a fonte fertilizadora for orgânica (Figura 28) ou entre 4 a 6 semanas quando a fonte fertilizadora for mineral. A imagem nos mostra a importância de aguardar o tempo de decomposição e incorporação do material orgânico, uma vez que, mesmo após a incorporação através do implemento subsolador, é possível verificar a presença do dejetos sólido em superfície.

Figura 28 – Aplicação de dejetos de ovino sólidos incorporados com o subsolador.



Fonte: A autora.

A profundidade de amostragem está relacionada com a diversidade de sistemas de manejo e cultivo, em relação à cultura a ser implantada. De uma maneira geral, para culturas anuais recomenda-se a coleta de amostras desde a camada superficial até atingir 0,20 m de profundidade; para culturas perenes recomenda-se amostrar até atingir uma profundidade de 0,60 m, porém estratificando as amostras a cada 0,20 m; e para pastagens recomenda-se a coleta de solos até 0,10 m quando conservadas e 0,20 m quando degradadas.

3.1.3 Subdivisão da área e local de amostragem

Para a separação das glebas a serem amostradas, deve elaborar um croqui da área, indicando a posição das glebas, as características que separaram essas áreas, considerando o tipo de solo e a cobertura vegetal existente. Quando possível, deve-se incluir informações como presença de processos erosivos, compactação ou má drenagem, curvas de nível e presença de terraços.

A variabilidade espacial existente confere a heterogeneidade das características químicas nos solos amostrados. Por isso, quanto maior for o número de pontos coletados para compor uma amostra composta, menor será o erro, assim como à medida que se aumenta o número de amostras simples dentro de uma mesma área. Para uma análise com menor erro, sugere-se que, em áreas menores ou iguais a 3 ha, o número de amostras compostas deve ser de aproximadamente 15 e de aproximadamente 20 para áreas entre 5 a 10 ha. Quando a área for superior a 10 ha, o número de mostras simples para formas uma composta não deve ser inferior a 20.

Outra maneira de seccionar a amostragem de solo é em relação à profundidade para alguns casos específicos, conforme a Figura 29.

Figura 29 – Perfil de solo (a) com camada superficial de textura arenosa e após os 0,15 m a textura altera-se para muito argilosa (b).



Fonte: A autora.

Uma aplicabilidade prática desse perfil está relacionada com a aplicação de calcário. A percolação de água nesse tipo de solo está condicionada a esse gradiente textural. Dessa forma, a diferença ocorrendo dentro dos primeiros 0,20 m de profundidade, pode mascarar os resultados não somente da textura do solo, mas também do comportamento dos nutrientes e dos componentes relacionados com a acidez. Assim, é necessário seccionar a amostragem em duas diferentes profundidades, para não incorporar calcário em uma quantidade insuficiente para a correção dessa camada arenosa.

3.2 ANÁLISE PARA DIAGNÓSTICO DA FERTILIDADE DO SOLO

As análises de rotina de solos devem ser interpretadas de maneira criteriosa para identificar todas as potencialidades e deficiências do solo a ser cultivado. Devem ser observados alguns critérios para uma melhor interpretação dos dados.

O primeiro critério a ser observado são as unidades de medida, devendo estar atualizadas para serem comparadas com os valores absolutos de referência existentes em cada região e órgão de pesquisa. Um segundo critério refere-se à caracterização entre os elementos indicados na própria análise. Por exemplo: A qual elemento específico a soma das bases está indicando um parâmetro elevado ou muito baixo? Qual elemento está responsável pela acidez do solo, o pH baixo ou o elevado teor de alumínio trocável? Qual a relação existente entre o teor de matéria orgânica e a saturação das bases? Qual a relação existente entre as condições químicas e físicas do solo? Essas questões podem ser respondidas pela própria análise e já inferem algumas situações em que a química e a física do solo se encontram.

Por fim, um terceiro critério é a correlação entre os parâmetros indicados na análise e a resposta produtiva das plantas e seus sintomas de deficiência ou toxidez de nutrientes, que serão discutidos no capítulo 6. A cada análise de solo realizada na área agrícola deverá ser arquivada para a realização de um histórico com as informações contidas nas análises de rotina e aplicações de fertilizantes e corretivos com suas respectivas dosagens e fontes.

A seguir, serão abordados todos os componentes que constituem uma análise de rotina.

3.2.1 Caracterização da acidez do solo

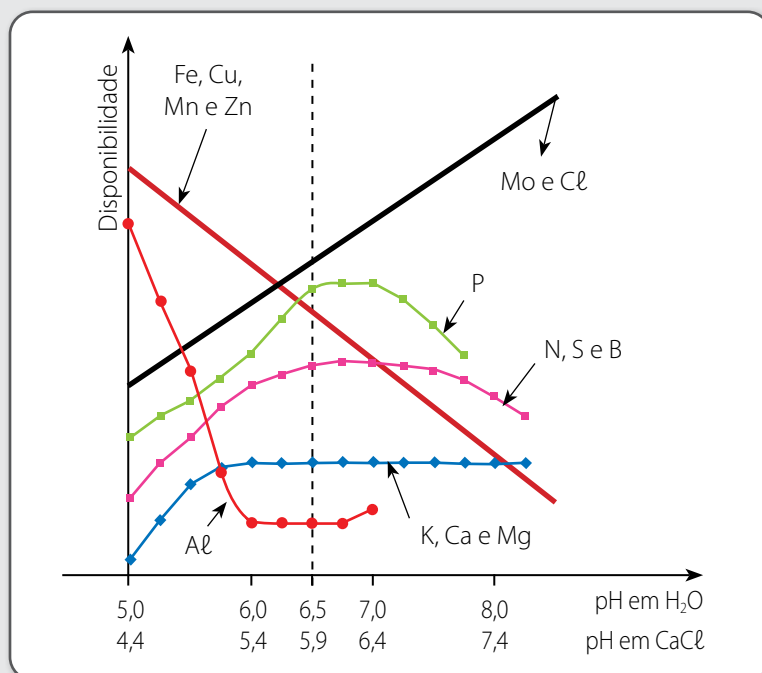
A acidez do solo é um parâmetro indicado através de dois elementos presentes em solução do solo: H^+ e Al^{+3} .

Com relação ao elemento H^+ , avaliado através do pH do solo, Tomé Jr. (1997) define que a maioria dos solos apresenta aumento do pH à medida que se aprofundam as coletas. Trata-se de uma regra bem estável para solos ácidos nas camadas mais baixas em comparação com as superiores. O pH do solo é importante para dispor nutrientes a cultura economicamente cultivada, conforme adaptado de Malavolta (1974) propõe a disponibilidade dos nutrientes em função da variação do pH do solo analisado em água e cloreto de cálcio ($CaCl_2$), de acordo com a Figura 30. Outro fator que caracteriza a acidez do solo é a acidez potencial é também conhecida pela equação

de ($H^+ + Al^{3+}$). Esse parâmetro indica a quantidade de íons trocáveis ou não trocáveis existentes no solo dos elementos hidrogênio e alumínio.

Para reduzir os problemas ocasionados pelo excesso de acidez nos solos, é a calagem que busca neutralizar o alumínio ionizável. Antes da escolha do corretivo agrícola e da dosagem a ser utilizada para este procedimento, deve-se fazer análises químicas para poder realizar os cálculos e obter resultados para que a calagem surta efeitos positivos.

Figura 30 – Relação entre a disponibilidade de grupos de nutrientes em função da variação do pH do solo avaliado em água e $CaCl_2$.



Fonte: Adaptado de Malavolta (1974).

O pH do solo é uma relação existente entre o potencial de hidrogênio na solução do solo e, por isso, é um fator adimensional. Pode ser avaliado em extratores água destilada (pH em H₂O), extrator cloreto de cálcio (pH em CaCl₂), extrator cloreto de potássio (pH em KCl) ou pH em índice SMP, lembrando que este último índice não é o padrão utilizado em nosso estado. O índice SMP, comumente utilizado no Rio Grande do Sul é um método baseado na correção da acidez do solo em função do poder tampão, portanto, exige que as análises sejam padronizadas durante um longo período de tempo para que haja confiabilidade nos seus resultados.

3.2.2 Capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação das bases trocáveis (V%)

A capacidade de troca de cátions do solo refere-se à proporção de cargas positivas que ocupam os complexos de troca de carga químicas com os minerais de argila. Podemos verificar dois cálculos referentes a CTC do solo. No cálculo da CTC efetiva, consideramos os valores da soma

das bases trocáveis cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{+2}), potássio (K^+) e sódio quando presente (Na^+) e somamos a esse cálculo a cargas do alumínio (Al^{+3}):

$$\text{CTC efetiva} = \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Al}^{+3} \text{ (cmol}_c \text{ dm}^{-3}) \quad \text{Eq. 1}$$

Em contrapartida, no cálculo da CTC a pH 7,0 (T), inserimos todas as cargas positivas que possuem capacidade de troca no complexo coloidal do solo. Dessa forma, consideramos os valores da soma das bases trocáveis cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{+2}), potássio (K^+) e sódio quando presente (Na^+) e somamos a esse cálculo a cargas do hidrogênio somadas ao alumínio ($\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$):

$$\text{CTC pH 7,0 (T)} = \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + (\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}) \text{ (cmol}_c \text{ dm}^{-3}) \quad \text{Eq. 2}$$

A partir da determinação dos valores da capacidade de troca de cátions do solo, podemos verificar a porcentagem das cargas positivas que participam da nutrição mineral de plantas em relação à todas as cargas que participam do complexo de troca com as partículas minerais. Determinamos desta forma a saturação das bases trocáveis (V%):

$$V\% = \frac{(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^+ + \text{Na}^+) \times 100 \text{ (\%)}}{\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + (\text{H}^+ + \text{Al}^{+3})} \quad \text{Eq. 3}$$

3.2.3 Matéria orgânica e carbono no solo

Em análises de solo, ora estão representados os valores do material orgânico no solo (MOS), ora encontramos os valores do carbono orgânico (C_{org}). Para obtenção dos valores da matéria orgânica, podemos considerar que todo componente orgânico no solo possui cerca de 58% de carbono orgânico. É claro que nem todo material orgânico possui essa porcentagem, tudo depende de qual parte da planta está relacionado, qual é o estágio de decomposição atingido e qual espécie vegetal está sendo decomposta. Portanto, esse valor é obtido através de determinações médias laboratoriais. Assim, se dividirmos 100, referente à porcentagem total, pelo valor 58, referente à participação do carbono, obtemos o fator de conversão 1,72:

$$\text{MOS} = \text{C}_{\text{org}} \times 1,72 \text{ (g kg}^{-1} \text{ ou g dm}^{-3}) \quad \text{Eq. 4}$$

Se dividirmos o valor obtido por 10, a unidade de medida avaliada poderá ser porcentagem, facilitando as recomendações de adubação e fertilizações:

$$\text{MOS} = \frac{\text{C}_{\text{org}} \times 1,72 \text{ (\%)}}{10} \quad \text{Eq. 5}$$

3.2.4 Micronutrientes no solo

Algumas análises de solo apresentam, quando solicitada, a concentração dos micronutrientes. Essa determinação é extremamente importante para algumas culturas, como é o caso das frutícolas, cujo hábito perene exige mais cuidados quanto ao fornecimento desses elementos.

Os principais micronutrientes determinados em análise de solos são o zinco, o cobre, o ferro e o manganês. No caso desses elementos, o IAC (1997) propõe alguns valores de referência para quantificar e interpretar os níveis desses elementos no solo, conforme proposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros para interpretação da disponibilidade de micronutrientes no solo.

Elemento	Teor do nutriente		
	Baixo	Médio	Alto
	mg dm ⁻³		
Zinco	0 a 0,5	0,6 a 1,2	> 12
Cobre	0 a 0,2	0,3 a 0,8	> 0,8
Ferro	0 a 4	5 a 12	> 12
Manganês	0 a 1,2	1,3 a 5,0	> 5,0

Fonte: IAC, 1997.

3.2.5 Valores de referência

Os valores de referência são utilizados para interpretar as análises de solo, indicando quantitativamente as características desse solo. Cada região possui o seu valor de referência, conforme proposto pela CQFRS/SC (1994) para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina; Pavan e Miyazawa (1996) e Emater-PR (1998) propõem para o estado do Paraná e IAC (1997) para o estado de São Paulo.

Utilizando essas referências, Serrat, Krieger e Motta (2006) propõem uma sugestão de parâmetros médios gerais para interpretação dos resultados obtidos em análises de solo, conforme descreve a Tabela 2.

Tabela 2 – Sugestão de parâmetros médios gerais para interpretação dos resultados obtidos em análises de solo.

NÍVEIS NO SOLO	DETERMINAÇÕES						
	pH em CaCl ₂	pH SMP	Cátions trocáveis				
			Aℓ ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	T
			(cmol _c /dm ³)				
Muito baixo	< 5,0	< 5,5	< 0,3	< 1	< 0,3	< 0,10	–
Baixo	5,0-5,4	5,5-6,0	0,3-0,5	1-2	0,3-0,4	0,10-0,15	< 5
Médio	5,4-5,8	6,0-6,5	0,5-1,0	2-4	0,4-0,8	0,15-0,30	5-10
Alto	5,8-6,2	6,5-7,0	> 1,0	4-6	0,8-1,0	0,30-0,40	10-15
Muito alto	> 6,2	> 7,0	-	> 6	> 1,0	> 0,40	> 15

NÍVEIS NO SOLO	DETERMINAÇÕES				Al	V
	P Mehlich			P Resina		
	Argila > 40%	Argila 40 a 25%	Argila < 25%			
	(mg/dm³)					
Muito baixo	< 3	< 4	< 6	< 8	< 5	–
Baixo	3-6	4-8	6-12	8-15	5-10	< 40
Médio	6-9	8-12	12-18	15-40	10-20	40-70
Alto	9-12	12-18	18-24	40-60	> 20	> 70
Muito alto	> 12	> 18	> 24	> 60	–	–

Fonte: Serrat; Krieger; Motta (2006)

3.2.6 Conversões e unidades de medida

As unidades de medida utilizadas em análises de solo devem seguir o padrão proposto pelo sistema internacional de unidades de medida. As principais unidades de medida que são utilizadas em análises de solos são o $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; mg dm^{-3} ; g dm^{-3} ; g k^{-1} ; e ppm.

A unidade de medida $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ refere-se à contagem de átomos, expressa pela massa molar em gramas. Para somar os cátions trocáveis no solo, a conversão para essa unidade de medida deve considerar a massa molar obtida na tabela periódica pelo número de átomos que compõem a última camada eletrostática (carga de valência). Por exemplo, para convertermos um valor de cálcio determinado em 42 mg dm^{-3} em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, sabemos que a massa molar do cálcio é igual a 40 g. Dividindo esse valor pela valência (⁺2), obtemos:

$$40 \text{ g}/2 = 20 \text{ g, portanto } 1 \text{ mol}_c = 20 \text{ g}$$

Esse princípio pode ser utilizado para qualquer elemento químico, como o magnésio, o potássio e assim por diante. Agora, somente é necessário transformar a unidade mol_c em cmol_c , ou seja:

$$1 \text{ mol}_c = 0,01 \text{ cmol}_c, \text{ portanto}$$

$$1 \text{ mol}_c = 20 \text{ g; tem-se que } 1 \text{ cmol}_c = 0,02 \text{ g}$$

Agora que as unidades de medida estão convertidas, podemos transformar por regra de três as 42 mg de cálcio obtidas na análise de solos. Lembrando que sempre devemos trabalhar com a mesma unidade de medida; convertemos 0,02 g em mg, obtendo o valor de 20 mg, assim:

$$\begin{array}{rcl} 1 \text{ cmol}_c & \text{_____} & 20 \text{ mg} \\ x & \text{_____} & 42 \text{ mg} \end{array}$$

Através dessa regra, convertemos então as 42 mg de cálcio em 2,1 cmol_c de cálcio.

4 PRINCÍPIOS DE CORREÇÃO DA ACIDEZ DOS SOLOS

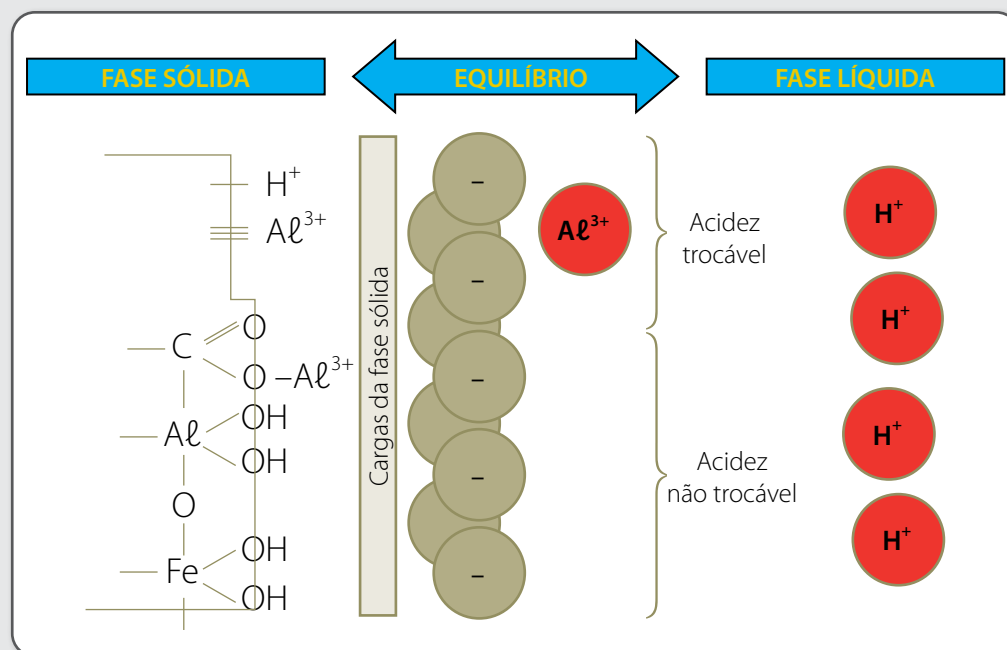
4.1 CONCEITOS DE ACIDEZ ATIVA E ACIDEZ POTENCIAL DOS SOLOS

A fase sólida dos solos é composta de uma fração mineral e uma orgânica. Por sua vez, a fração mineral divide-se em lotes de dimensões que apresentam diferenças em relação à mineralogia e ao comportamento químico.

A acidez ativa do solo é representada pelos íons de H^+ dissociados na fase líquida do solo e em equilíbrio com a fase sólida. Como a concentração de prótons dissociados é muito baixa, ela tem sido representada pelo potencial hidrogeniônico (pH), que pode ser medido em água (pH em H_2O) ou em soluções salinas (pH $CaCl_2$ e pH KCl).

Já a acidez potencial é representada pelos hidrogênios covalentes (acidez não trocável) e eletrovalente e pelo alumínio trocável (expressa como $cmol_c$ de $H^0 + Al^{+3}$ por dm^{-3} de solo). Partes do hidrogênio e do alumínio estão ligadas por forças eletrostáticas e podem ser deslocadas por outros cátions, recebendo a denominação de acidez trocável, conforme verificamos na Figura 31.

Figura 31 – Componentes da acidez do solo e sua relação com o complexo de troca coloidal.



Fonte: A autora.

Conforme observamos na Figura 31, a acidez ativa resulta das cargas de H^+ dissolvidas em solução do solo (fase líquida). A quantificação dessas cargas é avaliada pelo logaritmo da concentração do elemento $[H^+]$; dessa forma, quando se extrai a concentração do elemento

avaliado em íons grama dm^{-3} , temos uma escala que pode variar entre 0 a 14, conhecida como a escala do pH. Para solos em condições tropicais, o pH apresenta valores mais ácidos (inferiores a 6,9) na grande maioria das avaliações, inclusive os solos da região do estado do Paraná, que podem variar entre 2,5 a 6,5, raramente atingindo níveis de alcalinidade.

A acidez trocável é representada pelos íons de alumínio dispersos na solução do solo que causam efeitos nocivos ao desenvolvimento do sistema radicular.

Em contrapartida, a acidez não trocável resulta dos íons de hidrogênio dispostos em fase sólida, associados aos íons de alumínio. Quando maior for a capacidade de retenção de elementos do complexo coloidal, que inclui a matéria orgânica, maior será a acidez potencial desse solo. A acidez não trocável não causa nenhum efeito danoso ao crescimento das plantas. É dessa forma que o sistema plantio direto tem demonstrado resultados positivos, tanto na complexação do alumínio trocável quanto na elevação do pH do solo pela adsorção de íons de H^+ .

4.2 MÉTODOS DE RECOMENDAÇÃO DE APLICAÇÃO DE CALAGEM

Assim como ao interpretar os níveis dos elementos nos solos deve-se levar em consideração os valores de referência propostos para cada estado do país, os métodos de recomendação da necessidade de calagem também são diferenciados por estados. Um dos métodos se baseia na correção do alumínio, outro é para elevar a saturação de bases a níveis desejados pelas plantas e outro é para elevar o pH do solo a níveis desejáveis para a cultura.

4.2.1 Necessidade de calagem pelo método da correção do alumínio

O método que quantifica a necessidade de calagem pela correção do alumínio é utilizado no estado de São Paulo. Esse método leva em consideração dois parâmetros importantes quanto à correção da acidez do solo. O primeiro parâmetro é a necessidade de corrigir o alumínio, que causa efeitos nocivos ao desenvolvimento das plantas acarretando em perdas na produtividade. E um segundo parâmetro baseia-se no fato de que os principais corretivos agrícolas utilizados para correção da acidez garantem a elevação dos teores de cálcio e magnésio no solo. Dessa forma, tem-se a necessidade de calagem (NC) pelo método do alumínio a seguinte equação:

$$\text{NC} = 2 \times \text{Al}^{+3} + [2 - (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})] \text{ (t/ha)} \quad \text{Eq. 6}$$

4.2.2 Necessidade de calagem pelo método da saturação das bases (V%)

O método que determina a necessidade de calagem através da saturação das bases estabelece uma meta de correção para elevar a saturação das bases acima de 70% por exemplo, indiretamente planejando-se atingir valores próximos de 5,4 a 6,0 de pH, avaliado em CaCl_2 e água, respectivamente.

Esse método leva em consideração a exigência nutricional separado por grupo de culturas. O grupo 1 compreende culturas como especiarias, estimulantes e ornamentais, como o capim-limão, chás e azaleias, com uma saturação de bases desejada de 40%. Já o grupo 2 compreende culturas como arroz, café, fumo, mandioca e pupunha, entre outras, com V% desejado de 50%. O grupo 3 inclui as culturas de triticle, amendoim, banana, batata e cana-de-açúcar, etc. com V% de 60%. A maioria das culturas comerciais está inserida no grupo 4, como milho, soja, trigo, aveia, pêssago, maçã, feijão, entre outras, para atingir uma saturação de bases de 70%.

Dessa forma, tem-se a fórmula da necessidade de calagem pelo método do V%, definida por:

$$V\% = \frac{(V\% \text{ da planta} - V\% \text{ do solo}) \times \text{CTC pH } 7,0}{100} \text{ (t/ha)} \quad \text{Eq. 7}$$

4.2.3 Necessidade de calagem pelo índice SMP

O método do SMP avalia o poder tampão que o solo possui quanto à resistência em alteração do pH do solo em equilíbrio com uma solução tampão de pH 7,5. Assim, essa solução vai indicando quantos íons de H^+ são liberados para o complexo coloidal, indicando a liberação das fontes de acidez do solo. Também é um método que separa por grupos de culturas, as quais apresentam respostas positivas com a elevação do pH em água a 5,5 (grupo 1), a 6,0 (grupo 2) e a 6,5 (grupo 3).

Cada um desses grupos apresenta índices já determinados, os quais em comparação com o pH do solo descrito na análise de rotina e com o pH em água desejado pelas culturas indicarão a necessidade de calagem em t/ha. Entretanto, é necessário um longo período de avaliação para determinação desses índices e somente os solos de Rio Grande do Sul e Santa Catarina utilizam esse método.

4.3 PRINCIPAIS CORRETIVOS AGRÍCOLAS

Os corretivos agrícolas são produtos que neutralizam os efeitos da acidez do solo, elevando o pH a níveis que proporcionam maior disponibilidade de macro e microelementos, neutralizando o H^+ do solo, além de reduzir os efeitos do Al^{+3} .

Podemos dividir os corretivos agrícolas de acidez do solo em três grupos: o grupo dos carbonatos (radical CO_2), o grupo dos hidróxidos (radical OH) e o grupo dos óxidos (radical O). Esses grupos se diferenciam pela sua composição química, poder de neutralização (PN) e a quantidade equivalente a uma tonelada de CaCO_3 , conforme apresenta o Quadro 2.

Quadro 2 – Composição química, poder de neutralização (PN) ou equivalente em CaCO_3 (ECaCO_3) e quantidades equivalentes a uma tonelada de CaCO_3 dos principais compostos presentes em corretivos de acidez.

Principais corretivos agrícolas	Poder de neutralização	Quantidade equivalente
	(%)	(Kg)
Carbonato de cálcio	100	1.000
Carbonato de magnésio	119	840
Hidróxido de cálcio	135	741
Hidróxido de magnésio	172	581
Óxido de cálcio	179	559
Óxido de magnésio	248	403

Fonte: Adaptado de Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RG/SC, (2004).

4.3.1 Carbonatos

Os carbonatos são os tipos de corretivos de solo mais utilizados. Sua origem vem através do processo de moagem das rochas sedimentares de calcário que se formaram em condições com pH básico e elevada concentração de cálcio e magnésio, conforme expresso sua gênese na Figura 32.

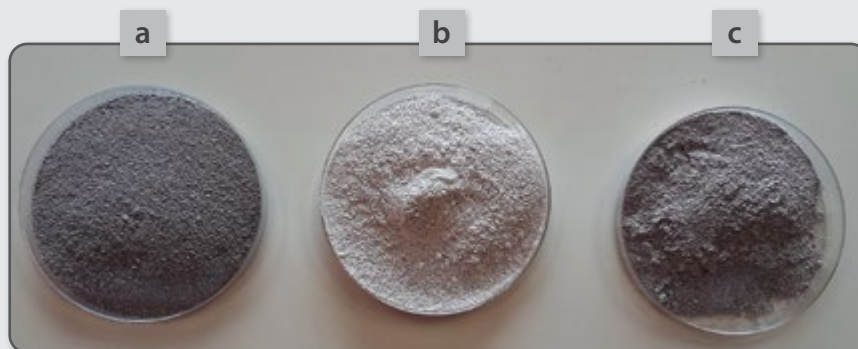
Figura 32 – O mineral calcita (CaCO_3) (a) passa pelo processo de diagênese com cimentação formando a rocha sedimentar calcário (CaCO_3), seja dolomítico (b) ou calcítico (c). Sob metamorfismo de contato, a temperatura aumenta, formando a rocha metamórfica mármore (CaCO_3) (d).



Fonte: A autora.

Os calcários têm proporções diferenciadas quando às concentrações de cálcio e magnésio, podendo ser classificados como calcíticos quando o teor de óxido de magnésio (MgO) é inferior a 5%, magnesianos com teor de MgO entre 5 a 12% ou dolomítico quando o teor é superior a 12%, conforme a Figura 33.

Figura 33 – Tipos de corretivos agrícolas: calcário calcítico (MgO < 5%) (a), calcário magnesiano (5 a 12% de MgO) (b) e calcário dolomítico (MgO > 12%) (c).



Fonte: A autora.

No mercado, a diferença de preços entre os calcários é expressiva. Todas essas alterações estão relacionadas com o custo de extração, localização e abundância de jazidas, demanda de ordem agrícola e principalmente com qualidade química e física do produto e os custos com o transporte.

Existem outras fontes de carbonatos utilizados como corretivos de solo ou como fontes fertilizadoras de cálcio e magnésio, como, por exemplo, os calcários de conchas, cinza leve de biomassa (Figura 34) e escórias de resíduos de siderúrgicas.

Seu uso agrícola está condicionado a um laudo laboratorial indicando ausência de metais pesados aceitos pelo Ministério do Meio Ambiente, conforme a Instrução Normativa n. 27, sancionada no ano de 2006, a qual determina os níveis toleráveis admitidos para as produções agrícolas quanto ao uso de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes.

Figura 34 – Resíduo de cinza leve de biomassa do processo da indústria de queima para caldeiras, adicionado na superfície do solo em sistema de semeadura direta sobre a palha.



Fonte: A autora.

4.3.2 Hidróxidos

Os hidróxidos são corretivos obtidos industrialmente da hidratação da cal virgem. Os principais hidróxidos utilizados como corretivos agrícolas são o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e o hidróxido de magnésio (Mg(OH)_2), conforme Figura 35.

A cal, lama de cal residuária do processo de clareamento da celulose, também é empregada como um hidróxido corretivo da acidez do solo. Entretanto, o uso desse resíduo fica restrito a áreas com localização próximas a indústrias de celulose.

Todo o hidróxido necessita de cuidados especiais durante o manuseio, uma vez que tem característica de alta corrosão de maquinário agrícola e pode causar danos ao operador, como queima da pele e ardência aos olhos. Mesmo a cal possuindo baixa concentração de hidróxido de sódio (NaOH), além da ação corrosiva, causa danos às plantas se aplicada em excesso, devido ao sódio (Na).

Figura 35 – Tipos de corretivos agrícolas: hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) (a) e o hidróxido de magnésio (Mg(OH)_2) (b).



Fonte: A autora.

Os hidróxidos apresentam como vantagens, quando comparados aos carbonatos, o alto poder de correção em velocidade mais rápida, baixo peso do produto reduzindo os custos com o transporte. Entretanto, trata-se de um produto com granulometria muito fina, sujeita à deriva.

4.3.3 Óxidos

Os óxidos como a cal virgem e o calcário parcialmente calcinado são produtos obtidos da queima parcial dos carbonatos, transformando parte deles em óxidos. São utilizados no processo de correção dos solos, mas seu alto custo inviabiliza muitas vezes sua utilização. Entretanto, apresenta a maior velocidade de correção quando comparados aos outros corretivos agrícolas.

4.4 USO DO GESSO AGRÍCOLA

O gesso agrícola (CaSO_4) é um sal neutro, oriundo de escória de indústrias de fertilizantes fosfatados, composto de aproximadamente 20% de cálcio e 15% de enxofre. É um condicionador de solo, pois reduz o excesso de alumínio tóxico no solo, entretanto não proporciona nenhum efeito benéfico sobre o pH. O alumínio trocável pode ser corrigido através do deslocamento das hidroxilas pelo íon sulfato, provindo do gesso agrícola. É utilizado como fonte de nutrientes para os cultivos, melhorando as condições quanto ao desenvolvimento de raízes, uma vez que, entre suas propriedades, carrega elementos para as camadas mais profundas do solo.

Figura 36 – Aplicação de gesso agrícola em cultivo de eucalipto.



Fonte: A autora.

A aplicação do gesso agrícola promove a movimentação dos elementos cálcio, magnésio e enxofre no solo, elementos presentes em sua composição química e sendo macroelementos exigidos na nutrição mineral de plantas. A aplicação do gesso agrícola, combinada com o calcário, melhora a produtividade das culturas, ampliando a densidade de raízes finas, eficientes no processo de absorção dos nutrientes.

Dessa forma, por se tratar de um condicionante de solo que melhora as condições em camadas mais profundas, está sendo utilizado como uma fonte de percolação de elementos e correções em sistemas agrícolas sem revolvimento de camadas, uma vez que os processos de calagem em sistema de plantio direto são mais complicados. Também tem sido utilizado em sistemas florestais e culturas perenes pela mesma característica, conforme Figura 36.

5 QUALIDADE DOS INSUMOS AGRÍCOLAS APLICADOS AO SOLO

5.1 CALAGEM

5.1.1 Características físicas e químicas dos calcários

Os corretivos agrícolas para controle da acidez do solo são avaliados de acordo com as suas propriedades químicas e físicas, inclusive como forma de definição do valor comercial do produto.

O poder corretivo dos calcários e demais condicionantes do solo são avaliados através do parâmetro do poder relativo de neutralização total (PRNT). Este é um parâmetro que combina os aspectos químicos do poder de neutralização (PN) e físicos como a eficiência relativa (ER) dos corretivos.

Os parâmetros químicos indicam a capacidade de correção quanto à neutralização da acidez através dos teores de óxido de cálcio (CaO) e de óxido de magnésio (MgO), chamado de poder de neutralização (PN). A capacidade neutralizante é avaliada através da porcentagem de neutralização, baseando-se que em 0,50g de CaCO_3 é capaz de neutralizar 0,01g de H^+ , adicionando ao solo 0,20g de cálcio ao sistema. Através da relação existente entre a massa molar dos óxidos de cálcio e magnésio no carbonato, podemos definir a equação que determina o PN dos corretivos agrícolas:

$$\text{PN} = (\% \text{CaO} \times 1,79) + (\% \text{MgO} \times 2,48) (\%) \quad \text{Eq. 8}$$

Já os parâmetros físicos indicam a eficiência relativa (ER) dos tamanhos das partículas, uma vez que os condicionantes do solo são pouco solúveis em água e suas reações são dependentes de diversos fatores, como acidez, concentração das bases trocáveis, umidade e temperatura do solo, entre outros.

Existe uma proporção entre a velocidade de reação do calcário e seu contato com a superfície específica, indicado pelo tamanho das partículas. Dessa forma, a legislação brasileira propõe quatro frações granulométricas separadas com o auxílio de peneiras, sendo elas a de 2 mm (ABNT n° 10), 0,84 mm (ABNT n° 20) e 0,3 mm (ABNT n° 50). Baseando-se nas porcentagens mínimas requeridas para cada peneira, definimos a equação da eficiência relativa:

$$\text{ER} = (\% \text{ ultrapassa a peneira n}^\circ 50 \times 1,0) + (\% \text{ fica retida na peneira n}^\circ 50 \times 0,60) + (\% \text{ fica retida na peneira n}^\circ 20 \times 0,20) + (\% \text{ fica retida na peneira n}^\circ 10 \times 0,0) (\%) \quad \text{Eq. 9}$$

Através da determinação desses dois parâmetros que combinam os aspectos químicos (PN) e físicos (ER) podemos definir o poder relativo de neutralização total do corretivo agrícola (PRNT), dado pela seguinte equação:

$$\text{PRNT} = \frac{(\text{PN} \times \text{ER})}{100} (\%) \quad \text{Eq. 10}$$

O PRNT indica o quanto de corretivo irá reagir como CaCO_3 , durante um período de 2 anos. Quanto maior o PRNT do corretivo maior será sua capacidade de correção da acidez do solo.

5.2 FERTILIZANTES

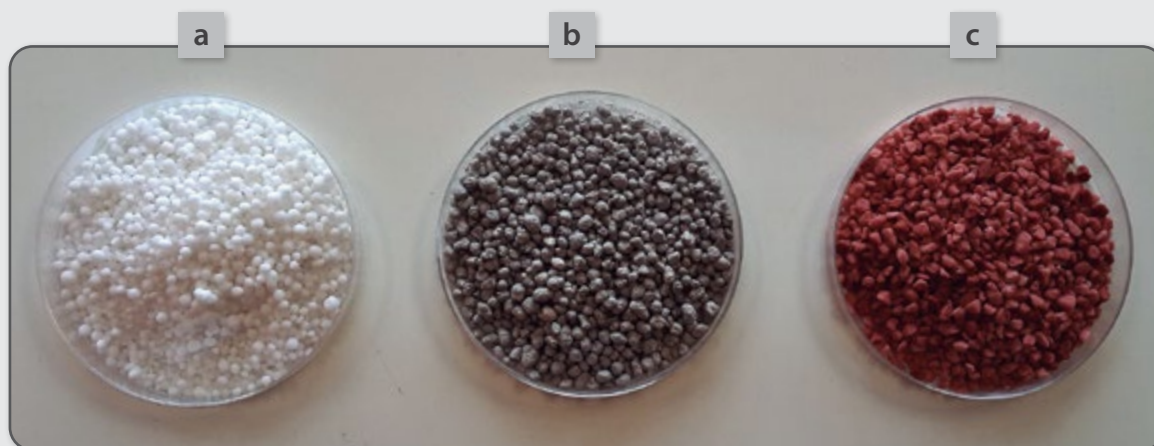
Fertilizantes agrícolas são produtos que fornecem os elementos requeridos à nutrição mineral de plantas, podendo ser fornecidos isolados ou em conjunto para proporcionar um melhor crescimento e desenvolvimento das plantas. Podem ser de origem inorgânica, chamados fertilizantes industriais ou minerais, ou como fonte orgânica como aplicação de esterco, resíduos de plantas, escórias industriais etc. Atualmente, são indispensáveis em produções agrícolas para atingir os níveis de produtividade das cultivares modernas.

São avaliados diversos aspectos quanto à concentração dos elementos nutrientes que os fertilizantes fornecem. Para isso, somente a concentração não é suficiente para definir a qualidade dos fertilizantes. É necessário observar fatores como a solubilidade do produto em água, a compatibilidade entre fertilizantes no caso de mistura de grânulos, a granulometria, a concentração dos elementos e possíveis efeitos nocivos como a salinidade dos fertilizantes.

5.2.1 Concentração dos elementos requeridos

A concentração do elemento químico fornecido pelos fertilizantes é extremamente variável. No caso de fertilizantes orgânicos, a concentração dos elementos é muito baixa, exigindo altas dosagens de aplicação. Por essa razão, os fertilizantes inorgânicos se destacam (Figura 37), uma vez que apresentam altas concentrações do elemento requerido e um grau de solubilidade em água compatível quando comparado aos fertilizantes orgânicos.

Figura 37 – Fertilizantes inorgânicos como fonte de nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c).



Fonte: A autora.

No caso dos fertilizantes nitrogenados, existem fontes amídicas (NH_2), amoniacais (NH_4), nítricas (NO_3). Os principais fertilizantes que fornecem nitrogênio são o nitrato de amônio (33% de N na sua composição), sódio (16% de N), cálcio (15% de N) ou potássio (13% de N), sulfato de amônio (21% de N), MAP (11% de N) e DAP (18% de N), uran (taxas variáveis) e amônia anidra (82% de N). Mas, sem dúvida, o fertilizante nitrogenado mais utilizado é a ureia. Além do maior teor de N que os outros adubos sólidos, com 45% de N na sua composição, reduzindo seu custo com transporte e a aplicação, a ureia tem baixa corrosividade, alta solubilidade e é prontamente absorvida pelas plantas.

A principal desvantagem da ureia é a possibilidade de perdas por volatilização de NH_3 , especialmente quando aplicado na superfície do solo. Outra desvantagem são as perdas de N por volatilização de amônia, relacionadas à hidrólise enzimática. Com objetivo de diminuir essas perdas, tem sido estudada a eficácia de polímeros que inibem a atividade da enzima urease, minimizando as perdas por volatilização.

As perdas durante a aplicação de fertilizantes nitrogenados podem ser por lixiviação, principalmente quando aplicados nas adubações de base no sulco de plantio, ou por volatilização, quando aplicados a lanço em cobertura. No caso de aplicações a lanço, os polímeros protegem contra a ação do calor, reduzindo as perdas, entretanto, seu custo-benefício deve ser calculado pelo produtor, uma vez que as perdas de fertilizantes mostram seu efeito quando foram aplicadas doses na quantidade correta ou quando a perda é extremamente severa.

As reservas de fosfatos são jazidas de apatita ligadas rochas graníticas, fosfatos sedimentares em camadas de origem marinha e aluminofosfatos de origem organomineral. As maiores jazidas são encontradas em Marrocos, Argélia, Rússia, América do Norte e América do Sul. No Brasil, as principais reservas são a de Araxá, em Minas Gerais, as de Olinda, em Pernambuco, e Jacupiranga, em São Paulo.

Os principais fertilizantes fosfatados são o superfosfato simples (com 18% de P_2O_5 na sua constituição), o superfosfato triplo (41% de P_2O_5), o fosfato monoamônio (MAP) (48% de P_2O_5), o fosfato diamônico (DAP) (45% de P_2O_5), o fosfato natural reativo (20% de P_2O_5), termofosfato magnesiano (17% de P_2O_5) e os fosfatos naturais (com concentração variável).

Os fertilizantes fosfatados são mais estáveis no solo. Suas perdas quanto à lixiviação não ocorrem com frequência, pois se trata de um elemento pouco móvel nos solos. Isso não indica que não ocorram perdas desse elemento. Existe uma forte interação entre o fósforo e os minerais de argila, indisponibilizando esse elemento na solução do solo, causando sua deficiência para as plantas. Outro fator relacionado com essa interação pode ser observado pelas perdas de sedimentos em processos de erosão. Uma vez que esse elemento fica fixado junto às argilas, todo processo erosivo carrega o elemento fósforo, tornando-se um poluente de água superficiais e lençóis freáticos.

A principal fonte de potássio nos solos provém do intemperismo dos minerais primários e secundários, principalmente do grupo das micas, feldspatos e feldspatoides. Nos minerais secundários, o potássio encontra-se adsorvido na illita, na vermiculita e nos minerais estratificados. Esse elemento está disponível na solução do solo na forma positiva.

O cloreto de potássio (KCl) é o fertilizante potássico mais utilizado no mundo, simplesmente por ser o mais barato. O KCl é obtido a partir de jazidas naturais e apresenta colorações que variam de vermelho ao branco. A principal desvantagem do cloreto de potássio é que se trata de um fertilizante com elevado índice salino, que pode prejudicar a germinação. Outras fontes fertilizadoras de potássio são o sulfato de potássio (50% de K_2O) e o nitrato de potássio (44% de K_2O).

6 PRINCIPAIS ELEMENTOS ENVOLVIDOS NA NUTRIÇÃO MINERAL DE PLANTAS

A fertilidade natural do solo é a capacidade de fornecimento dos nutrientes necessários para o bom desenvolvimento das plantas. Em sistemas naturais, a biodiversidade da composição florística é responsável por dois efeitos que proporcionam a sustentabilidade do ecossistema, uma vez que diferentes plantas apresentam necessidades nutricionais distintas. Outro efeito está relacionado à ciclagem de nutrientes entre a senescência das folhas e a decomposição desse material orgânico com diferentes concentrações dos elementos, conforme apresenta a Figura 38.

Apesar das plantas superiores fabricarem seu próprio alimento através do processo fotossintético utilizando água, gás carbônico e energia solar, são necessários diferentes elementos que participam tanto no processo de formação de compostos orgânicos com funções específicas na fotossíntese como clorofila, enzimas, carboidratos, proteínas entre outros quanto com sua participação direta no processo. Portanto, a possibilidade de controlarmos a disponibilidade e absorção destes elementos pelas plantas nos permite um melhor aproveitamento de áreas cultivadas, efeito notável das fertilizações e correções do solo, além das melhorias na disponibilidade dos elementos através dos sistemas de manejo do solo e da irrigação.

De todos os elementos químicos presentes na natureza, muitos fazem parte da nutrição mineral de plantas, embora apenas 16 desses elementos são considerados essenciais e com funções vitais para as plantas. Esses elementos podem ser divididos em macronutrientes e micronutrientes, de acordo com a sua concentração absorvida pelas plantas e existente no tecido vegetal. Os macronutrientes encontram-se em concentrações avaliadas em g kg^{-1} , sendo eles carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S) e alguns pesquisadores adicionam à lista o silício (Si). Já os micronutrientes encontram-se em concentrações avaliadas em mg kg^{-1} , sendo eles ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn), molibdênio (Mo), boro (B) e cloro (Cl).

Figura 38 – Constituição do agregado de solo associado ao sistema radicular de diferentes espécies e decomposição do material orgânico em área de preservação de mata ciliar pertencente ao Rio Quebra-Perna, município de Ponta Grossa, estado do Paraná.



Fonte: A autora.

Esses elementos nutrientes, com exceção do carbono, hidrogênio e oxigênio, são adquiridos em maior proporção pelos vegetais através do sistema radicular, sempre na forma inorgânica, existindo a necessidade de um organismo decompositor do material orgânico para realizar essa transformação. No caso do fornecimento de nutrientes através de fertilizações, esse elemento já se encontra em formas inorgânicas e em altas concentrações, facilitando o processo de absorção.

Além dos organismos decompositores, existem outros organismos que facilitam a entrada dos elementos nos tecidos das raízes. Um deles são as bactérias diazotróficas, chamadas de fixadoras de nitrogênio, como é o caso das bactérias do gênero *Rhizobium*. Essas bactérias associam-se aos tecidos radiculares definindo uma associação benéfica para ambos os organismos. As bactérias, por sua vez, se beneficiam dos nutrientes exsudados das raízes e convertem o N_2 atmosférico, cujas plantas não são capazes de assimilar, transformando-o em aminoácidos e amônia (NH_3), podendo ser utilizado pelas plantas após esta transformação. Esse é o motivo pelo qual não se utiliza adubação nitrogenada na cultura da soja.

Outro organismo que proporciona benefícios à assimilação e fornecimento de nutrientes são as micorrizas, fungos arbustulares associados aos tecidos das raízes em associação simbiótica mutualística, em que as estruturas miceliais do fungo inserem-se nas células do tecido vegetal beneficiando-se dos nutrientes fornecidos e, em contrapartida, provê as raízes de água e de nutrientes, principalmente o fósforo.

6.1 CRITÉRIOS DE ESSENCIALIDADE

Para um elemento ser considerado um nutriente essencial para as plantas, é importante que este se enquadre em três características que obedecem aos critérios de essencialidade dos nutrientes.

O primeiro critério corresponde à participação do elemento nos processos metabólicos, seja na constituição de moléculas ou na participação de uma reação química. O segundo critério refere-se ao fato de que na sua ausência, a planta é incapaz de cumprir todo o seu ciclo biológico, desde a semente até a produção final de descendentes. O terceiro e último critério conclui que o elemento tem uma função específica, não podendo ser substituído por outro elemento.

Para definir esses critérios, estudos propõem o cultivo de plantas em substrato inerte e o fornecimento de solução nutritiva com a omissão de nutrientes, observando-se a visualizações de sintomas de deficiência e avaliação dos parâmetros fitométricos, conforme demonstra o experimento na Figura 39.

Figura 39 – Experimento com omissão de micronutrientes em soluções nutritivas formuladas com fertilizantes em rúculas (*Eruca sativa*) (a) e sintoma de deficiência de Cobre (Cu) em folhas de rúcula (b).



Fonte: A autora.

O desenvolvimento das plantas em substrato inerte é fundamental para o sucesso da determinação dos sintomas de deficiência, sendo mais utilizada a areia lavada. Por essa razão, discute-se a essencialidade do elemento silício, uma vez que a areia e a maioria dos substratos utilizados apresentam esse elemento na sua composição, dificultando avaliar o desenvolvimento de plantas em sua ausência.

Um exemplo prático dos critérios de essencialidade é o uso dos micronutrientes cobalto (Co) e molibdênio (Mo) como tratamento de sementes. O cobalto é um elemento benéfico, mas em sua ausência a planta pode realizar seu ciclo de vida devido à substituição pelo elemento molibdênio. Em contrapartida, o nutriente molibdênio é insubstituível e obedece aos outros dois critérios comprovando que este é um elemento essencial ao desenvolvimento das plantas. Ambos são elementos importantes no processo de fixação biológica do nitrogênio pelas bactérias em plantas leguminosas.

Seguindo essa mesma linha de raciocínio do elemento cobalto, muitos outros participam ativamente dos processos metabólicos, estimulam o crescimento e aumentam a produtividade, como é o caso do selênio (Se), do sódio (Na), do silício (Si) e do cobalto acima citado, chamados elementos benéficos.

O conteúdo e a exigência dos nutrientes variam em função de cada tipo de planta, do estágio fenológico, das condições climáticas durante o ciclo de desenvolvimento, da idade do tecido vegetal ou da parte da planta, da composição química do solo e seu fornecimento de nutrientes para as plantas.

6.2 PRINCIPAIS FUNÇÕES AGRÍCOLAS DOS ELEMENTOS

Todos os elementos fornecidos pelo solo apresentam funções específicas no metabolismo das plantas, inclusive alguns elementos estão relacionados a fatores que prejudicam o desenvolvimento e a produtividade, como é o caso do alumínio tóxico. Essas funções específicas refletem sobre os parâmetros produtivos das culturas comerciais.

As discussões quanto às funções metabólicas e seus efeitos sobre o rendimento das culturas comerciais serão discutidas no Quadro 3, para os principais macroelementos: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, e no Quadro 4, para os microelementos: ferro, cobre, zinco, manganês, molibdênio, boro e cloro.

Quadro 3 – Macroelementos essenciais a nutrição mineral de plantas, suas principais funções metabólicas e seu efeito sobre o rendimento das culturas comerciais.

Nutriente essencial	Função metabólica nos tecidos vegetais	Efeitos sobre o rendimento e produtividade nas culturas comerciais
Nitrogênio	Componente formador de aminoácidos e proteínas; participa das moléculas produtoras de energia para a fotossíntese; responsável pela elongação celular e crescimento vegetativo.	Na sua deficiência as plantas apresentam baixa estatura; níveis de proteínas baixos acarretando em grãos e frutos com menor peso; amarelecimento devido às perdas de clorofila e, conseqüentemente, menor produção. Seu excesso promove crescimento excessivo e conseqüentemente, acamamento.
Fósforo	Participa das moléculas produtoras de energia para a fotossíntese (ATP); responsável pela transferência de energia e das informações genéticas; essencial ao crescimento radicular.	A sua deficiência afeta a germinação de plantas, reduzindo o vigor e o stand inicial; plantas deficientes acumulam açúcar ficando arroxeadas. O excesso de fósforo causa atrofia do sistema radicular.
Potássio	Regulador da pressão osmótica; controla o fechamento e abertura dos estômatos; atua na ativação enzimática; importante papel na fotossíntese, formação de frutos e resistência ao clima desfavorável e doenças.	A incidência de doenças aumenta com a deficiência de potássio; as plantas ficam acamadas; a necrose reduz a área fotossintética ocasionando baixa produtividade; o excesso de potássio não causa distúrbios as plantas, mas inibe a absorção de outros elementos.
Cálcio	Principal constituinte da parede celular, dando resistência e sustentação para o vegetal; é importante na elongação celular e crescimento do tubo polínico e germinação do pólen.	Plantas deficientes em cálcio apresentam grãos chochos e frutos apodrecidos, perdendo seu valor comercial; flores abortam e, conseqüentemente, reduzem a produção; raízes ficam menores e até morrem.
Magnésio	Principal elemento constituinte da clorofila, importante para a fotossíntese; participa dos processos respiratórios e na absorção de outros elementos.	Na sua deficiência ocorre a redução do número de folhas, área foliar reduzida e volume de raízes baixo; ocorre a queda dos botões florais, impedindo a formação dos frutos.
Enxofre	Participa na transferência de elétrons, importante para a produção de energia durante a fotossíntese; é essencial ao processo de fixação do N ₂ pelas leguminosas noduladas.	A deficiência de enxofre não causa danos severos às produções agrícolas uma vez que raramente ocorre deficiência desse elemento. Em contrapartida, seu excesso inibe a taxa fotossintética, provocando a deficiência de ferro.

Fonte: Adaptado de Fernandes, 2006.

Quadro 4 – Microelementos essenciais à nutrição mineral de plantas, suas principais funções metabólicas e seu efeito sobre o rendimento das culturas comerciais.

Nutriente essencial	Função metabólica nos tecidos vegetais	Efeitos sobre o rendimento e produtividade nas culturas comerciais
Ferro	Atua nos processos metabólicos energéticos; participa do processo de fixação do N ₂ pelas leguminosas noduladas.	A deficiência de ferro proporciona redução no desenvolvimento de raízes.
Cobre	Essencial ao balanço de nutrientes; importante nos processos de fotossíntese e respiração.	Redução na resistência a doenças e reduz a absorção de fósforo quando o cobre está deficiente.
Zinco	Atua na permeabilidade de membranas; estabilizador de componentes celulares; está relacionado ao metabolismo de carboidratos e proteínas; associado à maturação precoce.	Na sua deficiência, ocorre atraso no ciclo biológico e na maturação de frutos e grãos; redução no tamanho das folhas e ramos.
Manganês	Atua na síntese de clorofila; participa do metabolismo energético.	Redução na taxa fotossintética e provoca perdas na produtividade na sua deficiência.
Molibdênio	Atua na fixação biológica de N ₂ atmosférico em plantas noduladas; está associado aos processos de ativação de enzimas que estimulam as transformações do nitrogênio.	As plantas apresentam estatura reduzida; menor número de flores e, conseqüentemente, menor número de vagens e frutos quando esse elemento está deficiente.
Boro	Importante na retenção floral; atua no metabolismo de carboidratos, proteínas e ácidos nucléicos.	Na deficiência de boro o número de flores é reduzido; a taxa de crescimento fica mais lenta e as sementes reduzem sua carga genética ocasionando perdas de informações importantes para a manutenção da produtividade.
Cloro	Participa nos processos fotossintéticos e estimula algumas enzimas.	Plantas deficientes em cloro não apresentam sintomas claros nem perdas em rendimento produtivo.

Fonte: Adaptado de Fernandes, 2006.

6.3 SINTOMAS DE DEFICIÊNCIA E TOXICIDADE

A falta e o excesso de nutrientes apresentam sintomas característicos nos tecidos vegetais, entretanto de difícil visualização, uma vez que são muito confundidos com doenças e ataque de pragas. Como se trata de uma resposta ao fornecimento de nutrientes que o solo proporciona e em função das características climáticas, principalmente o fornecimento constante de água, os sintomas de deficiência e toxicidade limitam-se a áreas localizadas, diferindo-se das pragas e doenças que tendem a espalhar em maior proporção e velocidade nas áreas agrícolas.

Outra característica importante dos sintomas nutricionais das plantas refere-se à mobilidade do elemento nos tecidos vegetais. Os elementos móveis apresentam uma redistribuição nos tecidos e, portanto, seu sintoma de deficiência irá ocorrer nas folhas mais velhas. São elementos móveis em plantas o nitrogênio, o fósforo, o potássio, o magnésio, o cloro e o molibdênio, portanto,

a maioria dos macronutrientes são móveis. Já os elementos imóveis apresentaram seus sintomas em folhas mais jovens, como é o caso dos elementos cálcio, enxofre, boro, cobre, ferro, manganês e zinco, a maioria são micronutrientes.

Entre os elementos mais requeridos na nutrição mineral de plantas, nitrogênio, fósforo e potássio, os sintomas de deficiência são bem distintos entre si. O nitrogênio é exigido em elevadas quantidades pelas plantas, principalmente gramíneas. Deve ser manejado com muito cuidado, pois seu excesso também causas danos e perdas na produtividade. Seu sintoma característico é a clorose internerval, ou seja, as folhas perdem sua coloração verde intensa e passam a ficar amareladas no limbo foliar, permanecendo suas nervuras com cor verde, conforme apresenta a Figura 40.

Figura 40 – Sintoma de deficiência de nitrogênio em folhas de amora (*Rubus niveus*) apresentando clorose internerval em folhas mais velhas.



Fonte: A autora.

Na deficiência do nitrogênio, ocorre a redução da estatura das plantas, promovendo a alongação dos sistemas radiculares em busca desse elemento. As formas de absorção desse nutriente pelas plantas são bem diferenciadas, mas todas elas necessitam da água para que ocorra a absorção e o transporte entre as membranas das células das raízes. Culturas comerciais como milho e trigo são muito exigentes em adubações nitrogenadas. Muitas vezes, não somente o

fornecimento desse elemento através de fertilizações é suficiente para fornecer toda a quantidade exigida pelas plantas. É necessário levar em consideração os aspectos relacionados às condições climáticas para melhorar o fornecimento desse elemento as plantas e as características do solo, como a textura e a rápida taxa de infiltração de água, reduzindo a umidade e, consequentemente, o fornecimento de nitrogênio para as raízes (Figura 41).

Figura 41 – Área de cultivo de trigo (*Triticum aestivum*) em solos com textura arenosa e alta taxa de infiltração de água (a) e sintoma de deficiência em folhas apresentando clorose em folhas mais velhas (b).



Fonte: A autora.

A toxidez pelo elemento nitrogênio também é responsável por perdas na produtividade e rendimento de grãos em culturas comerciais. Seu excesso promove a alongação das células, com paredes celulares mais finas e mais suscetíveis a doenças, os grãos e frutos apresentam baixa qualidade. Em alguns casos, o crescimento excessivo causa acamamento, dificultando os processos de colheita e intensificando as perdas na lavoura.

O segundo elemento requerido em maiores quantidades pelas plantas é o fósforo. Trata-se de um elemento extremamente móvel nos tecidos vegetais e, praticamente, imóvel nos solos. Sua forma de absorção não exige a presença de água, e sim através do gradiente de concentração, ou seja, o movimento ocorre do meio mais concentrado para o menos concentrado. Seguindo esse princípio, as fertilizações com fósforo no sulco de plantio tornam-se mais eficientes para o fornecimento desse elemento.

O sintoma de deficiência de fósforo é caracterizado por uma coloração avermelhada intensa em folhas mais velhas (Figura 42), devido ao acúmulo de açúcares nas folhas. Por estar envolvido no processo de germinação, grande parte é translocada para as sementes. Por isso, sua deficiência ocasiona germinação irregular, produção de sementes com menor massa, redução no número de sementes e perdas de informações genéticas.

Figura 42 – Sintoma de deficiência de fósforo em plantas de milho (*Zea mays* L.) (a) e em aveia-preta (*Avena sativa*) (b) caracterizado pela coloração avermelhada intensa no limbo foliar.



Fonte: A autora.

São raros os sintomas de toxidez com fósforo em plantas, uma vez que em condições naturais os solos apresentam em sua maioria baixos teores desse elemento e existe uma interação entre o fósforo e os minerais de argila acarretando na fixação, tornando-o indisponível para a absorção pelas raízes. Algumas alterações ocorrem quando as plantas são submetidas a condições de estresse, ocasionando uma desregulação metabólica que proporciona acúmulo de elementos nos tecidos vegetais, principalmente de fósforo. Portanto, o acúmulo de fósforo nos tecidos está muito mais relacionado às condições de estresse do que ao excesso de absorção desse elemento.

O elemento potássio tem como característica a absorção na forma iônica monovalente de K^+ . Essa forma é extremamente fácil de ser absorvida pelos tecidos vegetais, tanto na presença de água como o nitrogênio quanto pelo gradiente de concentração como o fósforo. Devido a essas características, o potássio apresenta uma absorção de luxo, significa que a planta, mesmo não necessitando desse elemento, continua absorvendo potássio sem nenhum dano ou consequência para o desenvolvimento.

Apesar de ser um dos elementos em maior quantidade nos solos, os sintomas de deficiência não são raros. A deficiência de potássio é caracterizada pela necrose nas bordas das folhas (Figura 43), muito confundida com manchas foliares. O crescimento das plantas é afetado devido à redução da área fotossintética e as plantas ficam mais suscetíveis a doenças e a intempéries climáticas, uma vez que o potássio participa da regulação osmótica das células e controla a abertura e fechamento dos estômatos.

Figura 43 – Sintoma de deficiência de potássio em folhas de amora (*Rubus niveus*) (a) e em folhas do híbrido de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) apresentando necrose nos bordos em folhas mais velhas.



Fonte: A autora.



REFERÊNCIAS

- BRASIL. Conama. Resolução n. 420, de 28 de dezembro de 2009. Minuta de resolução do CONAMA que dispõe sobre o estabelecimento de critérios e valores orientadores referentes a presença de substâncias químicas, para proteção da qualidade do solo e sobre diretrizes e procedimentos para gerenciamento de áreas contaminadas. Publicação no DOU n. 249, p. 81-84, 30/12/2009.
- 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, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400 p.
- EMATER-PR. **Análise de solo**. 5. ed. Curitiba: Emater-PR, 1998. (Informação Técnica, 21).
- FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2006. 432 p.
- FERREIRA, C. F. Diagnose nutricional de cultivares de milho (*Zea mays* L.) de diferentes níveis tecnológicos. 2009. 144 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- HO, M. D.; McCANNON, B.C.; LYNCH, J.P. Optimization modeling of plant root architecture for water and phosphorus acquisition. **Journal of theoretical biology**. v. 226, p. 331-340, 2004.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS (IAC). **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, por B. van Raij, H. Cantarella, J. A. Quaggio, A. M. C. Furlani. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, Fundação IAC, 1997.
- LEMOES, R. C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Embrapa-SNLCS, 1984. 46 p.
- LOPES, A. S.; SILVA, M. de C.; GUILHERME, L. R. G. **Acidez do solo e calagem**. 3. ed. São Paulo: ANDA, 1991. 22 p. (Boletim Técnico, 1).
- MALAVOLTA, E.; HAAG, H. P.; MELLO, F. A. F.; BRASIL SOBRINHO, M. O. C. **Nutrição mineral e adubação de plantas**. Lavras: Pioneira, 1974.
- PAVAN, M. A.; MIYAZAWA, M. **Análises químicas de solo**: parâmetros para interpretação. Londrina: IAPAR, 1996.
- SERRAT, B. M.; KRIEGER, K. I.; MOTTA, A. C. V. Considerações sobre interpretação de análise de solos (com exemplos). In: LIMA, M. R.; SIRTOLI, A. E. et al. **Diagnóstico e recomendações de manejo**: aspectos teóricos e metodológicos. Curitiba: UFPR/Setor de Ciências Agrárias, 2006. 341p.
- SILVA, D. R. G.; LOPES, A. S. **Princípios básicos para formulação de fertilizantes**. 2011.
- TOMÉ JÚNIOR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba, Agropecuária, 1997. 247 p.













SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL

Administração Regional do Estado do Paraná

Rua Marechal Deodoro, 450 - 16º andar

Fone: (41) 2106-0401 - Fax: (41) 3323-1779

80010-010 - Curitiba - Paraná

e-mail: senarpr@senarpr.org.br

www.sistema-faep.org.br



Facebook
Sistema Faep



Twitter
SistemaFAEP



Youtube
Sistema Faep



Instagram
[sistema.faep](https://www.instagram.com/sistema.faep)



Linkedin
[sistema-faep](https://www.linkedin.com/company/sistema-faep)



Flickr
SistemaFAEP