

Adubação do

Milho

Para Qualidade e Produtividade



Adubação do
Milho
Para Qualidade e Produtividade

Godofredo Cesar Vitti

gcvitti@usp.br

Acácio Bezerra de Mira

acaciomira@usp.br

© Todos os direitos pertencem ao

International Potash Institute

Industriestrasse 31

CH-6300 Zug, Switzerland

T +41 43 810 49 22

ipi@ipipotash.org

www.ipipotash.org

2020

ISBN 978-3-905887-29-7

DOI 10.3235/978-3-905887-29-7

Impresso em Israel

Sumário

1	Introdução	7
1.1	Área plantada, produtividade e tendências	7
1.2	Botânica e fisiologia	9
2	Exigências nutricionais do milho	14
2.1	Absorção, acúmulo e exportação de nutrientes	14
2.2	Macronutrientes: absorção, função e sintomas de deficiência	18
2.2.1	Nitrogênio	18
2.2.2	Fósforo	18
2.2.3	Potássio	19
2.2.4	Cálcio	19
2.2.5	Magnésio	20
2.2.6	Enxofre	21
2.3	Micronutrientes: absorção, função e sintomas de deficiência	22
2.3.1	Manganês	22
2.3.2	Zinco	22
2.3.3	Boro	23
2.3.4	Cobre	24
2.3.5	Cobalto	24
2.3.6	Molibdênio	24
2.4	Diagnose visual dos sintomas de deficiência	25
3	Avaliação do estado nutricional para fins de adubação	27
3.1	Avaliação da fertilidade do solo	27
3.2	Diagnose foliar	29
4	Manejo químico do solo	32
4.1	Práticas corretivas	32
4.1.1	Calagem	32
4.1.2	Gessagem	36
4.1.3	Fosfatagem	38
4.2	Adubação mineral	40
4.2.1	Nitrogênio	40

4.2.2	Fósforo	43
4.2.3	Potássio	44
4.2.3.1	Recomendações de adubação potássica	44
4.2.3.2	Manejo da adubação potássica	46
4.2.4	Enxofre	46
4.2.5	Magnésio	47
4.2.6	Micronutrientes	47
5	Aspectos da adubação do milho em sistemas de sucessão	50
6	Inoculação do milho com <i>Azospirillum</i>	55
7	Sistema Santa Fé: integração milho/braquiária	56
8	Referências	58
9	Apêndice	64

1 Introdução

1.1 Área plantada, produtividade e tendências

O milho é uma das culturas mais importantes mundialmente, seja do ponto de vista econômico, seja do ponto de vista social, destacando-se por ser o grão mais produzido no mundo.

A possibilidade de cultivar duas safras ao ano (primavera/verão e verão/outono) sem a necessidade de irrigação no Brasil tem contribuído de sobremaneira para o aumento da produção nacional de milho ao longo dos anos (Fig. 1), garantindo a colocação do país na posição de terceiro maior produtor mundial.

O aumento da área cultivada com milho segunda safra também tem contribuído para o aumento da produção nacional de milho. Na safra 2017/2018, foram semeados 5,08 milhões de ha para a primeira safra de milho (verão) (CONAB, 2018), enquanto para a segunda safra foram semeados 11,5 milhões de ha. No entanto, o cultivo do milho segunda safra é uma atividade de alto risco tendo em vista que quando o milho é semeado no final do verão, reduções de temperatura e a radiação solar podem ser fatores limitantes no final do ciclo. Além disso, em algumas regiões existe um risco significativo de geadas e secas que reduzem consideravelmente a produção de milho (Sans e Guimarães, 2009; Duarte e Kappes, 2015).

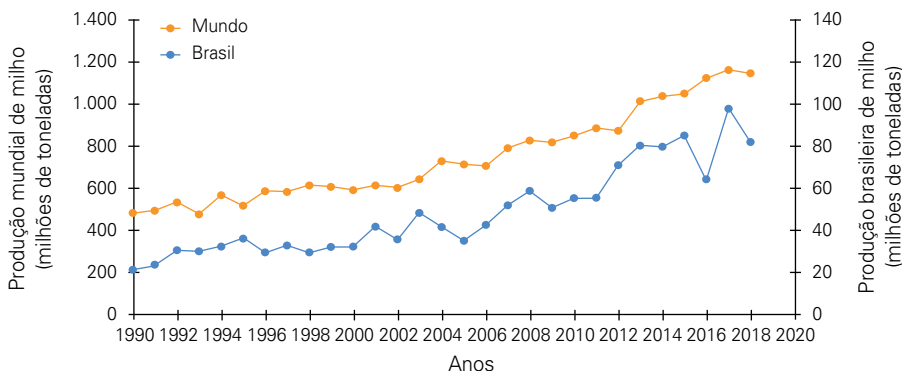


Figura 1. Evolução da produção de milho no Brasil 1990 a 2018

Fonte: FAO (2020).

Desde 2012, o estado de Mato Grosso produz 99% do milho segunda safra, tornando-se o maior produtor de milho do Brasil, seguido pelos estados de Paraná, Goiás, Mato

Grosso do Sul e Minas Gerais. Juntos, esses cinco estados representaram 68% da produção total brasileira na safra 2017/18 (CONAB, 2018). A participação relativa de cada um dos principais estados produtores na safra brasileira de milho é mostrada na Fig. 2.

Os níveis de produtividade do milho aumentaram consideravelmente, em comparação com a evolução geral da agricultura brasileira nos últimos 40 anos. Na safra 1976/1977, a produtividade média de milho era de aproximadamente 1,5 t ha⁻¹, enquanto para a safra 2018/2019 a expectativa é de 5,5 a 6 t ha⁻¹.

Apesar do clima exercer bastante influência e poder limitar os níveis de produtividade, ainda há muito espaço para avançar com o uso de pacotes tecnológicos para elevar os atuais níveis de produtividade.

Milho	Ano safra 2017/2018 (milhões de kg)	%
Produção nacional	90.018	100,0
Principais estados produtores de milho		
Mato Grosso	27.742	30,1
Paraná	14.574	16,2
Goiás	9.770	10,8
Mato Grosso do Sul	8.956	9,9
Minas Gerais	7.169	7,9
Rio Grande do Sul	5.093	5,7
São Paulo	4.653	5,2
Total	77.957	85,8

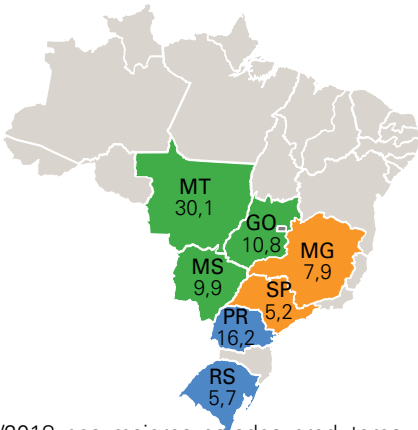


Figura 2. Produção de milho na safra 2017/2018 nos maiores estados produtores (em mil toneladas)

Fonte: CONAB (2018).

A utilização de cultivares de alto potencial produtivo e o emprego de fertilizantes tem sido fator determinante na obtenção de elevadas produtividades de milho cultivado sem irrigação no Brasil. Inclusive, os gastos com fertilizantes englobam a maior parcela do custo de produção do milho no Brasil, respondendo por cerca de 25% dos custos totais de produção (CONAB, 2017).

1.2 Botânica e fisiologia

O milho pertence à família das Poáceas (antiga família das gramíneas). É uma espécie anual, estival, cespitosa, ereta, com baixo perfilhamento, monoico-monoclina, classificada no grupo das plantas C4 (que incorpora dióxido de carbono em açúcares compostos de quatro carbonos), com ampla adaptação a diferentes condições de ambiente. As espiguetas masculinas são reunidas em espigas verticiladas terminais. O grão do milho é um fruto, denominado cariopse, em que o pericarpo está fundido com o tegumento da semente. As espiguetas femininas se soldam num eixo comum em que várias ráquis estão reunidas (sabugo) protegidas por brácteas (espiga de milho). A flor feminina apresenta um único estigma (cabelo-do-milho).

Para expressão de seu máximo potencial produtivo, a cultura requer temperatura alta, ao redor de 24 e 30°C, radiação solar elevada e adequada disponibilidade hídrica do solo. Devido à forte interação ambiental, o cultivo do milho necessita ser rigorosamente planejado e criteriosamente manejado, objetivando a manifestação plena de sua capacidade produtiva.

Dentre os fatores ambientais que mais influenciam a produtividade do milho, Fancelli (1994) aponta a umidade, temperatura e radiação solar como os mais determinantes. O milho é cultivado em regiões cuja precipitação varia de 300 a 5.000 mm anuais, sendo que a quantidade de água consumida por uma lavoura de milho durante o seu ciclo está em torno de 600 mm (Magalhães e Durães, 2006). As maiores exigências em água se concentram na fase de emergência, florescimento e formação do grão. Em especial, no período compreendido entre 15 dias antes e 15 dias após o aparecimento da inflorescência masculina, o requerimento de suprimento hídrico satisfatório aliado a temperaturas adequadas tornam tal período extremamente crítico. Temperaturas do solo inferiores a 10°C e superiores a 42°C prejudicam sensivelmente o processo de germinação. Temperaturas entre 25 e 30°C propiciam as melhores condições, sendo que durante o período de florescimento e maturação, temperaturas médias diárias superiores a 26°C podem promover a aceleração dessas fases, da mesma forma que temperaturas inferiores a 15,5°C podem retardá-las. Com relação à luz, a cultura do milho responde com altos rendimentos a crescentes intensidades luminosas, em virtude de pertencer ao grupo de plantas C4.

Durante muito tempo, o início da estação chuvosa condiciona a semeadura do milho na maioria das regiões produtoras de milho no Brasil, ao período entre os meses de agosto e novembro. Entretanto, uma nova época de semeadura tem sido utilizada visando o aproveitamento do milho como segunda cultura, a qual convencionou-se denominar de “safrinha”. Nesse modelo o milho é semeado entre os meses de janeiro

e março, após a colheita da safra de primavera/verão (soja, algodão ou feijão). Devido a ocorrência de veranicos e temperaturas desfavoráveis, normalmente nessa época, o milho apresenta desempenho inferior se comparado com a época recomendada, porém têm contribuído para o incremento da renda do produtor. Isso levou a uma grande difusão do milho safrinha por todo o país a ponto desse modelo de cultivo ultrapassar o milho verão em área e produção, passando a ser chamado de "milho segunda safra".

Na maioria das regiões, a semeadura do milho segunda safra deve ser feita até o final de fevereiro. Geralmente, quanto mais tarde for semeado, menor será o potencial produtivo, devido à redução da disponibilidade de água, às baixas temperaturas, e à menor radiação solar no inverno (Duarte, 2015). Ao sul da latitude 22° é necessário antecipar a semeadura nas áreas mais altas para escapar da maioria das geadas, enquanto ao norte, a disponibilidade de água reduz drasticamente com a chegada do inverno, mas é possível semear até fevereiro, nas áreas mais altas. Porém, em regiões de baixa altitude entre as latitudes 22 e 23, clima de transição entre inverno seco e inverno úmido é possível semear até a terceira semana de março.

Como as temperaturas são menores durante a segunda safra, o ciclo do milho é mais longo em comparação ao milho verão, sendo a maior parte colhida cerca de 150 dias após a semeadura. Isso expõe o milho segunda safra por mais tempo às condições adversas do inverno, aumentando assim o risco de perdas. Recomenda-se então, o uso de cultivares de ciclos precoces e superprecoces, especialmente em regiões passíveis de ocorrência de geada (Duarte, 2015).

O milho é uma planta de ciclo vegetativo variado, evidenciando desde genótipos extremamente precoces, cuja polinização pode ocorrer 30 dias após a emergência, até mesmo aqueles cujo ciclo vital pode alcançar 300 dias (Fancelli, 1994). Contudo, em nossas condições, a cultura do milho apresenta ciclo variável entre 110 e 180 dias, em função da caracterização dos genótipos (superprecoce, precoce e tardio), período este compreendido entre a semeadura e o ponto de maturidade fisiológica.

O milho é uma planta termossensível, ou seja, para completar seu ciclo precisa acumular quantidades distintas de energia térmica em cada fase de desenvolvimento. Portanto, em vez de usar a data para orientar a semeadura e o manejo da cultura do milho, é mais adequado usar um sistema baseado no método dos graus-dias (GD). Graus-dia é definido como a diferença entre a temperatura média diária e a temperatura basal exigida por uma espécie, sendo dada pela fórmula descrita na equação 1.

$$(1) \quad GD_n = \sum_{i=1}^n \frac{T_{\max_i} + t_{\min_i}}{2} - Tb$$

Onde: GD = número de graus-dia acumulados em n dias.

$T_{\max}$ = Temp. máxima (< 40 °C) do i -ésimo dia após a emergência;

$T_{\min}$ = Temp. mínima (> 10 °C) do i -ésimo dia após a emergência;

Tb = Temp. basal exigida pela espécie (10 °C para o milho)

De modo geral, as exigências térmicas dos híbridos de milho mais disponíveis no Brasil é de 890 a 1200 GD para os de ciclo normal a tardio, 831 a 889 GD para os de ciclo precoce (ou médio), e 780 a 830 GD para os superprecoces. A escolha do híbrido a ser utilizado deverá ser baseada em sua necessidade térmica, nas condições climáticas da época de semeadura, e na região de cultivo, conforme será discutido adiante.

Como a duração de cada etapa do ciclo do milho pode variar em função de fatores genéticos e ambientais, a maioria das recomendações existentes para a realização de manejo adequado das aplicações de fertilizantes usa como referência os estádios fenológicos (Tabela 1) ao invés do tempo em dias. A duração média dos estádios fenológicos está representada na Fig. 3.

Tabela 1. Estádios vegetativos e reprodutivos do milho.

Estádios vegetativos	Estádios reprodutivos
Ve - Emergência	R1 - Florescimento
V1 - Primeira folha desenvolvida	R2 - Grão leitoso
V2 - Segunda folha desenvolvida	R3 - Grão pastoso
V3 - Terceira folha desenvolvida	R4 - Grão farináceo
V4 - Quarta folha desenvolvida	R5 - Grão farináceo-duro
Vn - Enésima folha desenvolvida	R6 - Maturidade fisiológica
VT - Pendoamento	

*Quando se estiver estabelecendo o estágio de desenvolvimento de uma plantação de milho, cada estágio específico de V ou de R é definido quando 50% ou mais das plantas no campo estiverem naquele estágio ou além dele.

Fonte: Ritchie *et al.*, 2003.

O sistema de identificação fenológico é dividido em duas fases: vegetativa (V) e reprodutiva (R). Estas fases são subdivididas com base em aspectos fenotípicos que refletem processos fisiológicos que ocorrem ao longo do desenvolvimento da cultura. Assim, a divisão dos estádios baseada em mudanças morfológicas da planta possibilita recomendações que aumentam a eficiência no manejo de práticas como irrigação, adubação e demais tratos culturais (Magalhães e Durães, 2006).

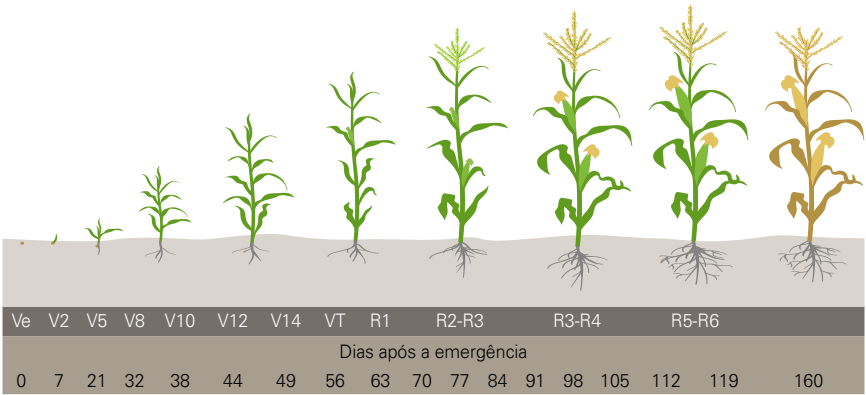


Figura 3. Estádios fenológicos do milho.

Fonte: Adaptado de PANNAR (2016).

O acúmulo de matéria seca (MS) ao longo do ciclo do milho pode ser descrito por uma curva sigmoide, tal como geralmente ocorre em culturas anuais. A produção de MS é pequena logo após a emergência, aumentando rapidamente até os 40-50 dias do ciclo, torna-se uniforme aos 50-60 dias seguintes e diminui perto da maturação. Entre 30-100 dias após a emergência, o acúmulo de MS é praticamente linear, admitindo taxas de 75 a 200 kg ha⁻¹ dia⁻¹ de MS, em função da fertilidade presente no solo. No entanto, deve-se ter cautela na utilização de dados de acúmulo MS ou de nutrientes em função de dias após a semeadura ou em dias após a emergência, pois as cultivares podem ter variações quanto ao tempo para a ocorrência de eventos fisiológicos na planta em função de fatores genéticos e ambientais. Na Fig. 4 está representada a curva de acúmulo e particionamento de MS no milho em função do número de graus dia e do estágio fenológico.

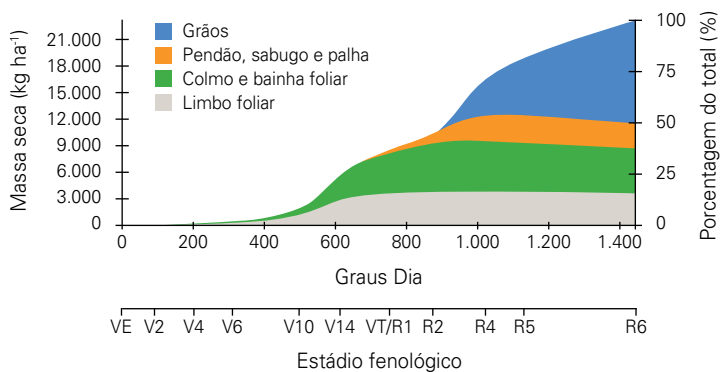


Figura 4. Média de acúmulo e particionamento de matéria seca de seis híbridos de milho cultivados em dois locais

Fonte: Adaptado de Bender *et al.* (2013).

2 Exigências nutricionais do milho

2.1 Absorção, acúmulo e exportação de nutrientes

Além dos macronutrientes orgânicos (carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), fornecidos pela atmosfera (CO_2 , H_2O , O_2), o milho necessita de nutrientes minerais fornecidos pelo solo e/ou fertilizantes: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn), molibdênio (Mo), ferro (Fe) e níquel (Ni).

Com o desenvolvimento de cultivares de milho cada vez mais produtivas, a necessidade de aportar nutrientes para atender a demanda nutricional da cultura é tem sido um ponto chave em plantações de milho altamente produtivas. Conforme apresentado na Tabela 2, N e K são os nutrientes mais requisitados para a produção de milho e, juntamente com o P, os mais removidos do campo pela colheita de grãos.

Tabela 2. Extração e exportação de macronutrientes pela cultura do milho

Autor	Nutriente (kg t^{-1} de grãos)					
	N	P_2O_5	K_2O	Ca	Mg	S
	Extração (grãos + parte aérea)					
(1)	20,0	9,0	17,0	4,0	4,0	2,5
(2)	28,4	6,3	18,0	5,0	3,8	2,0
(3)	23,8	9,5	16,8	-	4,9	2,2
	Exportação (grãos)					
(1)	15,0	6,5	7,0	1,0	2,0	1,3
(2)	14,3	4,2	3,7	0,0	0,8	0,9
(3)	13,8	7,5	5,5	-	1,4	1,3

Fonte: ⁽¹⁾ Fancelli (2007): dados não publicados – adaptado de vários autores; ⁽²⁾ Bender *et al.* (2013): média de seis híbridos de milho em duas localidades, com produtividade média de 12 t ha^{-1} de grãos e 23 t ha^{-1} de biomassa; ⁽³⁾ Resende *et al.* (2016): média de seis híbridos em três condições de cultivo, com produtividade média de $10,3 \text{ t ha}^{-1}$ de grãos de milho e 25 t ha^{-1} de biomassa.

Tabela 3. Extração e exportação de micronutrientes pela cultura do milho.

Autor	Nutriente (g t ⁻¹ de grãos)					
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Mo
	Extração (grãos + parte aérea)					
(1)	8,0	12,0	45,0	230,0	50,0	1,0
(2)	-	9,0	63,0	220,0	45,0	-
(3)	6,9	11,8	45,2	114,7	41,5	-
	Exportação (grãos)					
(1)	4,5	2,2	10,0	20,0	23,0	0,7
(2)	-	2,0	4,0	11,0	16,0	-
(3)	1,6	3,4	6,0	20,7	25,7	-

Fonte: ⁽¹⁾ Fancelli (2007): dados não publicados – adaptado de vários autores; ⁽²⁾ Bender *et al.* (2013): média de seis híbridos de milho em duas localidades, com produtividade média de 12 t ha⁻¹ de grãos e 23 t ha⁻¹ de biomassa; ⁽³⁾ Resende *et al.* (2016): média de seis híbridos em três condições de cultivo, com produtividade média de 10,3 t ha⁻¹ de grãos de milho e 25 t ha⁻¹ de biomassa.

As quantidades de micronutrientes requeridas pelas plantas de milho são muito pequenas (Tabela 3). Entretanto, a deficiência de qualquer um destes pode desorganizar de processos metabólicos e ter efeitos tão severos quanto a deficiência de um macronutriente (Vitti e Favarin, 1997).

Quando o milho é colhido para silagem, toda a parte aérea é removida, resultando em alta extração e exportação de nutrientes. Assim, problemas de fertilidade do solo se manifestarão mais cedo na produção de silagem do que na produção de grãos, principalmente se a área for usada para produção de silagem por área por vários anos consecutivos e se não for adotado um sistema de manejo de solo e adubações adequados.

Tão importante quanto a absorção total de nutrientes, a taxa de absorção na qual os elementos são demandados pelo milho ao longo do ciclo da cultura é um fator chave que deve ser levado em consideração para que um programa de adubação seja bem sucedido. Conforme demonstrado na Tabela 4, durante os primeiros 30 dias, os elementos mais exigidos são K e Ca. Aos 90 dias, a demanda total da cultura por nutrientes praticamente já foi atendida. A maior demanda de nutrientes ocorre entre 60 e 90 dias, época em que se ocorre o florescimento e o enchimento dos grãos.

Tabela 4. Absorção de nutrientes em termos percentuais, durante o ciclo vegetativo do milho.

Elementos	Dias após a emergência			
	0-30	30-60	60-90	90-120
	Absorção de nutrientes (% do total absorvido)			
N	2,5	38,0	47,0	12,5
P	1,0	26,5	46,5	26,0
K	4,4	66,0	29,6	-13,3*
Ca	4,6	49,2	46,2	-
Mg	1,5	46,5	42,0	10,0

* Valores negativos representam perdas.

Fonte: Malavolta e Dantas (1987).

Em trabalho recente, Bender *et al.* (2013) investigaram o acúmulo e particionamento de nutrientes em híbridos modernos de milho altamente produtivos (Fig. 5). Apesar da baixa produção de matéria seca até os primeiros 20 dias é coerente a preocupação com o fornecimento de maior quantidade de N no sulco de semeadura, pois sua disponibilidade depende da taxa de mineralização dos resíduos culturais e da matéria orgânica do solo (MOS). Os micronutrientes tendem a apresentar o pico de demanda mais tardiamente em relação aos macronutrientes, apresentando uma concentração mais elevada na espiga. A maior absorção e demanda de K pelas plantas de milho ocorre durante o período vegetativo, apresentando elevada taxa de acúmulo entre os estádios V8 e V14, com taxa de absorção semelhante à do N. Isso indica que o fornecimento e a disponibilidade de K deve se fazer presente logo na fase inicial de desenvolvimento do milho, que é o ponto de partida para o desenvolvimento e produção de biomassa. Isso fica evidente ao se comparar a Fig. 4 e a Fig. 5, que mostram que quando a planta acumula 50% de matéria seca na saída do período vegetativo para o reprodutivo, a mesma já acumulou cerca de 80% do K necessário para todo o ciclo.

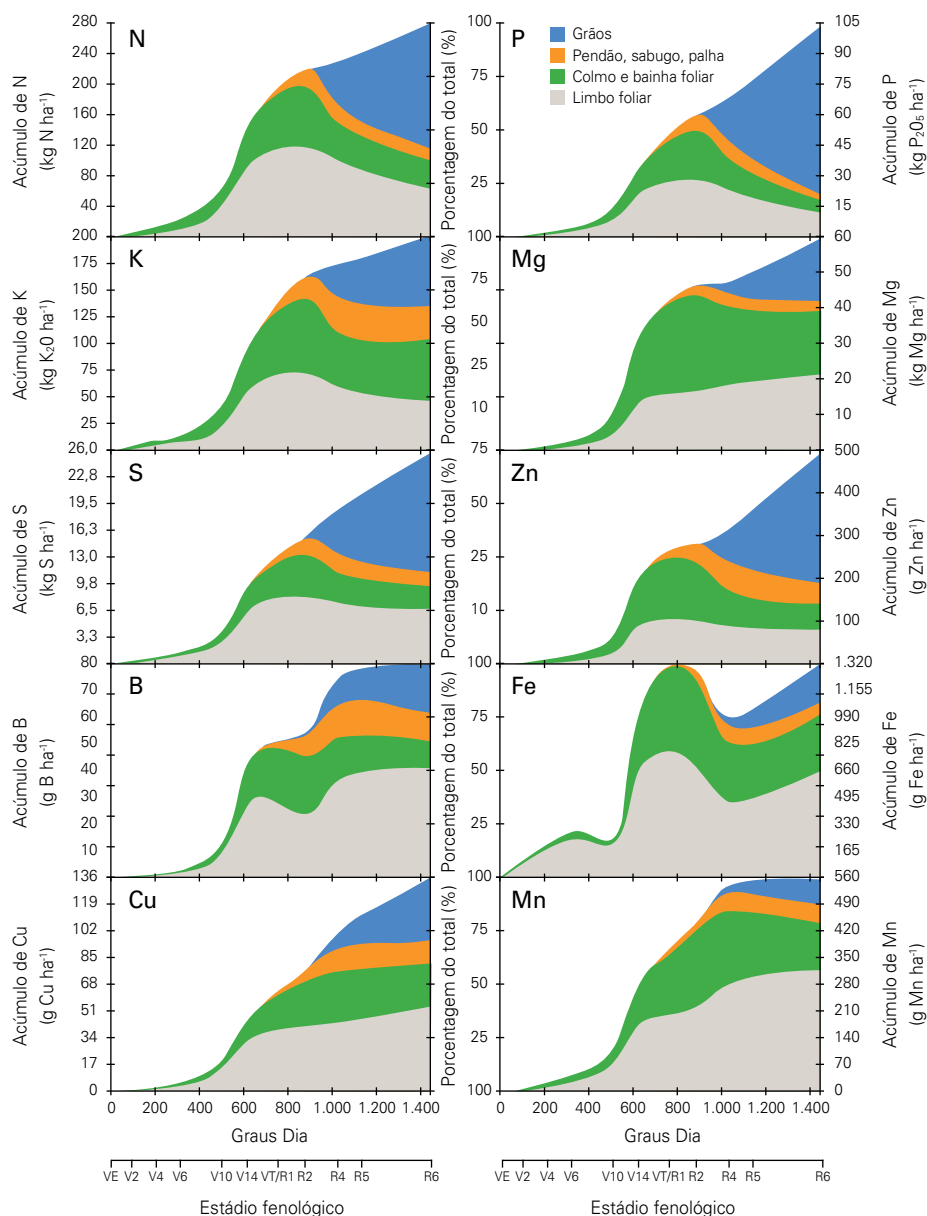


Figura 5. Média de acúmulo e particionamento de macro e micronutrientes de seis híbridos de milho cultivados em dois locais.

Fonte: Adaptado de Bender *et al.* (2013).

2.2 Macronutrientes: absorção, função e sintomas de deficiência

2.2.1 Nitrogênio

As espécies vegetais diferem na sua preferência por fontes de nitrogênio (N) mas absorvem este nutriente principalmente nas formas inorgânicas como nitrato (NO_3^-) ou amônio (NH_4^+) (Williams e Miller, 2001).

O NH_4^+ absorvido ou proveniente da redução do NO_3^- é imediatamente incorporado aos esqueletos de carbono, para formar compostos orgânicos como aminoácidos. Destes, cerca de 20 são usados na formação de proteínas, as quais participam, como enzimas, nos processos metabólicos das plantas, tendo um papel mais funcional do que estrutural. Quando o N é incorporado nas raízes em aminoácidos, estes são transportados até as folhas via fluxo transpiratório pelo xilema (Marschner, 2012). Além disso, o N participa da composição da clorofila, fundamental para o metabolismo vegetal (Rajj, 2011).

Plantas deficientes em N apresentam-se amareladas e com crescimento reduzido. A clorose se desenvolve principalmente nas folhas mais velhas, da ponta para a base em formato de “V” invertido (Apêndice – Foto 1) enquanto as folhas mais novas permanecem verdes. Em casos de deficiência severa, as folhas adquirem coloração marrom e eventualmente morrem.

O fato de as folhas novas conservarem-se verdes em condições de deficiência de N é indicativo da mobilidade deste nutriente na planta. As proteínas são quebradas em compostos mais simples, translocadas das folhas deficientes e reutilizadas nas folhas mais novas. Plantas deficientes em N têm o seu ciclo encurtado e por conseguinte, amadurecem precocemente.

2.2.2 Fósforo

O fósforo (P) é absorvido pelas plantas preferencialmente como H_2PO_4^- . Após a absorção, o P é quase imediatamente incorporado aos compostos orgânicos das plantas (Rajj, 2011). O P está particularmente envolvido na transferência de energia, pois o ATP (trifosfato de adenosina) é necessário para a fotossíntese, translocação e muitos outros processos metabólicos relevantes (Shuman, 1994). O P também faz parte de vários compostos na planta como ésteres de carboidratos, nucleotídeos e ácidos nucleicos, coenzimas e fosfolipídios. Em sua forma inorgânica (Pi), o P é substrato ou o produto final em muitas reações enzimáticas importantes, incluindo as

de fotossíntese e metabolismo de cloroplasto, síntese de amido e sacarose, transporte de trioses-fosfato, translocação de sacarose e síntese de hexoses (Marschner, 2012).

Plantas deficientes em P têm acentuada redução no crescimento e uma coloração arroxeada das folhas mais velhas (Apêndice – Foto 2) em consequência do acúmulo de antocianina. Outros sintomas de deficiência de P são atraso no florescimento e espigas com aparência retorcida e com poucos grãos na ponta, como consequência de problemas de polinização (Malavolta *et al.*, 1997).

2.2.3 Potássio

O potássio (K) é essencial para o crescimento desenvolvimento e maturação dos grãos (Meurer, 2006). O teor de K na planta só é inferior ao de nitrogênio (Raij, 2011), apresentando níveis geralmente mais elevados nas folhas do que nos grãos. Isso permite inferir que este nutriente é pouco exportado pela colheita de grãos.

O K é absorvido pelas plantas na forma de K^+ e principalmente na fase de crescimento vegetativo (Raij, 2011). Este nutriente não faz parte de nenhum composto específico, portanto sua função não é estrutural. No entanto, o K está envolvido em várias funções como translocação de açúcares, abertura e fechamento de estômatos, regulação osmótica, e ativação de muitas enzimas (Marschner, 2012). Plantas deficientes em K apresentam inicialmente faixas amareladas evoluindo para necrose nas margens das folhas mais velhas (Apêndice – Foto 3). Na ocasião da colheita, espigas podem apresentar afinamento no ápice e enchimento de grãos prejudicado. Plantas deficientes em K também apresentam turgidez reduzida, menor resistência a seca e são mais susceptíveis a fungos e ao acamamento.

A deficiência de K não revela sintomas imediatos. Os sintomas visuais de sua deficiência – clorose seguida de necrose nas pontas e margens das folhas mais velhas, internódios mais curtos e diminuição da dominância apical – só ocorrem em situações extremas de deficiência. Desse modo, a produtividade do milho pode ser significativamente comprometida por uma nutrição deficiente em K sem que a cultura manifeste sintomas visuais. Isso reforça a necessidade de um aporte adequado deste nutriente e o acompanhamento nutricional da cultura em fases críticas de demanda de K, a fim de garantir maior qualidade e quantidade da produção.

2.2.4 Cálcio

O cálcio (Ca) é absorvido pelas raízes como Ca^{2+} , podendo sua absorção ser diminuída por altas concentrações de K^+ , Mg^{2+} e NH_4^+ no solo. Encontra-se firmemente ligado a

estruturas do apoplasto (parede celular), mas também se apresenta de forma trocável formando pectatos de Ca na lamela média além de desempenhar importante papel de estabilização de membranas celulares (Marschner, 2012). Grande parte do Ca pode ser encontrado nos vacúolos. Baixas concentrações são encontradas no simplasma e no floema, indicando uma baixa capacidade de redistribuição do Ca na planta (Vitti, *et al.* 2006).

Muitas das funções do Ca estão ligadas à composição estrutural de macromoléculas e relacionadas a sua capacidade de coordenação, o que confere ligações intermoleculares estáveis mais reversíveis, principalmente nas paredes celulares e na membrana plasmática. A maior parte do Ca no tecido vegetal está localizado na parede celular, devido à grande quantidade de sítios de ligação para este elemento e ao transporte restrito do Ca no citoplasma (Vitti, *et al.* 2006).

O Ca tem importante papel na absorção iônica, particularmente na correção do efeito desfavorável da concentração hidrogeniônica excessiva, ou dos efeitos deletérios do alumínio (Al) do solo, sendo essencial o Ca para que tal efeito não diminua a absorção de outros nutrientes.

O Ca é indispensável para a germinação do grão de pólen, para o crescimento do tubo polínico e elongação radicular, o que se deve ao fato de estar presente na síntese da parede celular e no funcionamento da membrana plasmática (Malavolta *et al.*, 1997). Por ser um nutriente com papel direto na formação da parede celular, plantas deficientes em Ca apresentam porte baixo devido à menor elongação celular e baixo desenvolvimento radicular. As folhas mais novas crescem grudadas umas nas outras com manchas esbranquiçadas e com lesões (Apêndice – Foto 4).

2.2.5 Magnésio

As raízes ou folhas absorvem o magnésio (Mg) na forma iônica Mg^{2+} (Malavolta, 2006). Dentre as várias funções na planta, o Mg se destaca como constituinte da molécula da clorofila (corresponde a 2,7% do peso molecular), estrutura de grande importância no processo de fotossíntese. O Mg é um importante ativador enzimático, ativando mais enzimas do que qualquer outro elemento. O papel principal desse nutriente é ser cofator de quase todas as enzimas fosforilativas, formando uma ponte entre o pirofosfato do ATP ou ADP e a molécula da enzima. A transferência de energia desses dois compostos é fundamental nos processos de fotossíntese, respiração, reações de síntese de compostos orgânicos, absorção iônica e trabalho mecânico executado pela planta. Além disso, o Mg também atua no transporte de fotossintetizados e, sendo carregador de P contribui para a entrada do P na planta.

Deficiências de Mg estão associadas a solos com baixa CTC, baixo teor desse nutriente na matriz mineralógica e com valores baixos de pH, geralmente não corrigidos pela aplicação de calcário. A deficiência de Mg também pode ser induzida pelo uso de calcário calcítico por muitos anos uma vez que uma relação Ca:Mg muito alta no solo pode levar a planta a absorver menos Mg. Além disso, a deficiência de Mg também pode ser verificada em solos com níveis adequados de Mg, induzida por uma aplicação excessiva de fertilizantes potássicos ou nitrogenados, visto que os cátions K^+ e NH_4^+ competem com o Mg^{2+} durante a absorção pelas plantas.

Como faz parte da molécula de clorofila o Mg é redistribuído na planta em caso de suprimento insuficiente pelo solo. Isso leva ao aparecimento de sintomas de deficiência nas folhas mais velhas na forma de uma clorose que pode ser seguida de pontos necróticos entre as nervuras das folhas, enquanto as nervuras permanecem verdes (Apêndice – Foto 5).

2.2.6 Enxofre

O enxofre (S) é absorvido via radicular na forma do ânion sulfato (SO_4^{2-}), entrando na planta por transporte simporte. O transporte do SO_4^{2-} até a raiz se dá principalmente por fluxo de massa. A absorção do SO_4^{2-} é reduzida pela presença de íons Cl^- no solo, e estimulada pela presença de íons como Ca^{2+} e Mg^{2+} (Malavolta, 1979). Dentro da planta o S é transportado basicamente pelo xilema, sendo pouco encontrado nos vasos do floema, indicando uma baixa capacidade de translocação deste nutriente na planta.

O S está relacionado com várias funções estruturais e metabólicas na planta. É constituinte de aminoácidos como a cisteína e a metionina, e está presente em enzimas constituídas por proteínas pelos aminoácidos previamente mencionados. É componente dos grupos sulfidríla ($-SH$) que parecem aumentar a resistência à seca e ao frio (Vitti *et al.*, 2006).

Como a deficiência de S implica em inibição da síntese proteica, plantas deficientes nesse nutriente apresentam redução na intensidade da coloração verde (clorose) devido à menor produção de clorofila. Como consequência, deficiência de S resulta em redução da fotossíntese, reduzindo o crescimento e a produtividade do milho. Os sintomas de deficiência são semelhantes à deficiência de N, porém ocorrem nas partes mais novas da planta (Apêndice – Foto 6), visto que o S é pouquíssimo remobilizado na planta (Marschner, 2012).

2.3 Micronutrientes: absorção, função e sintomas de deficiência

2.3.1 Manganês

O manganês (Mn) pode ser absorvido pelas plantas na forma do cátion Mn^{2+} , havendo evidências de que a absorção do manganês é controlada metabolicamente, de forma similar ao caso do Ca e Mg. Entretanto a absorção passiva de Mn também pode ocorrer, principalmente quando se encontra em elevadas concentrações no solo.

A baixa mobilidade do Mn no floema é responsável pela baixa concentração de Mn em frutos, sementes e órgãos de reserva. Geralmente a forma iônica do Mn é altamente solúvel e facilmente absorvido pelas plantas. No entanto, em condições de elevado pH do solo, a precipitação de Mn em formas menos solúveis pode diminuir a absorção desse elemento pelas plantas.

O Mn é essencial à síntese de clorofila e sua função principal está relacionada a ativação de enzimas. Participa do fotossistema II, sendo responsável pela fotólise da água. O Mn pode atuar como um contra-íon de grupos aniônicos e ativa e ativa várias enzimas, especialmente aquelas envolvidas em metabolismos intermediários.

A deficiência de Mn tem reflexo direto no conteúdo de carboidratos não estruturais, o que é particularmente evidente nas raízes. Isso é, provavelmente, o fator responsável pela redução no crescimento de raízes de plantas deficientes neste nutriente. Em plantas severamente afetadas as folhas mostram coloração pálida e crescimento flácido. As folhas novas tornam-se cloróticas com listras brancas entre as nervuras (Apêndice – Foto 7). No entanto a diferenciação visual de sintomas de Mn, Zn, S e Fe é difícil de ser feita com precisão, pois a deficiência de qualquer um desses elementos pode produzir estrias cloróticas nas folhas novas do milho.

2.3.2 Zinco

O zinco (Zn) é absorvido na forma de Zn^{2+} tanto via radicular como foliar. Alguns pesquisadores consideram o Zn altamente móvel no floema, enquanto outros reportam uma mobilidade intermediária. Verifica-se na Figura 5 que grande parte do Zn absorvido é exportado na forma de grão, de modo que a reposição deste nutriente é fundamental para a manutenção de boas produtividades. O Zn atua como cofator enzimático e é essencial para a atividade, regulação e estabilização da estrutura proteica. É um constituinte (estrutural) de enzimas desidrogenases; participa na ativação enzimática da trifosfato-desidrogenase; e afeta a síntese e conservação de auxinas, fitormônios envolvidos no crescimento vegetal.

Com a deficiência de Zn a planta sofre drástica alteração da atividade enzimática, desenvolvimento de cloroplastos, conteúdo de proteínas e ácidos nucleicos. A deficiência se manifesta na forma de baixa atividade da gema terminal, o que se traduz num porte na forma de roseta nos cultivos herbáceos, enquanto em outros cultivos os entrenós tornam-se curtos (Deschen e Nachtigall, 2006). Os sintomas iniciam-se nas folhas mais jovens, que apresentam zonas cloróticas em faixas que terminam necrosadas, afetando todo o parênquima foliar e as nervuras. O tamanho das folhas é geralmente menor, mas elas permanecem ligadas à planta (Apêndice – Foto 8).

A interação entre Zn e P na planta tem sido bastante estudada, e concluído que altos teores de P induzem a deficiência de Zn. Em solos cultivados onde há correção de acidez, não se encontra a ocorrência de problemas de toxidez de Zn, já que nessa situação ocorre intensa imobilização do Zn.

2.3.3 Boro

O boro (B) é absorvido pela planta como ácido bórico $B(OH)_3$ e, provavelmente como ânion borato $B(OH)_4^-$ em valores elevados de pH, tanto via foliar como radicular.

O B é pouco móvel na planta e transportado principalmente através do xilema, tendo mobilidade limitada no floema (Raven, 1980) de modo que a adubação com esse nutriente deve ser feita preferencialmente via solo na semeadura, em vez de ser realizada tardiamente via foliar. O B acumula-se nas folhas velhas, nas quais a concentração é maior nas pontas e margens (Jones, 1970). Em geral a parte aérea apresenta maior concentração de B do que as raízes.

Plantas jovens absorvem B com maior eficiência, sendo que o B participa de processos biológicos importantes, atuando em alguns sistemas enzimáticos como constituinte ou como componente ativo.

O B tem importante função na translocação de açúcares e no metabolismo de carboidratos, estando comprovado experimentalmente que deficiência de B provoca acúmulo de açúcares nos tecidos. Desempenha importante papel no florescimento, no crescimento do tubo polínico, processos de frutificação, no metabolismo do N e na atividade de hormônios. Com relação ao metabolismo dos ácidos nucleicos, demonstrou-se que a deficiência de B interrompe a maturação das células.

O B intervém na absorção e no metabolismo dos cátions, principalmente Ca^{2+} , na formação da pectina de membranas celulares, na absorção de água e no metabolismo de glicídios. Plantas com deficiência de B têm paredes celulares menos resistentes apresentando vincos salientes nas folhas novas.

2.3.4 Cobre

O cobre (Cu) é absorvido como Cu^{2+} e Cu-quelato. A absorção radicular de Cu se dá por processo ativo, existindo evidências de que este elemento iniba fortemente a absorção do Zn e vice-versa (Bowen, 1969). O Cu é considerado imóvel no floema, sendo constituinte da oxidase do ácido ascórbico, da citocromoxidase e da plastocianina, que se encontram nos cloroplastos. Este elemento participa também de enzimas de oxirredução, influencia a fixação de N_2 pelas leguminosas, e é essencial no balanço de nutrientes que regulam a transpiração na planta. As plantas raramente apresentam deficiência de Cu, dada sua disponibilidade adequada na maioria dos solos do Brasil. Os sintomas de deficiência quando ocorrem são de difícil diagnóstico devido a interferência de outros elementos como P, Fe, Mo, Zn e S.

2.3.5 Cobalto

O cobalto (Co) é um elemento benéfico absorvido de forma lenta pela planta, principalmente como Co^{2+} , e sua translocação ocorre somente após a formação de quelatos com ácidos orgânicos (Malavolta *et al.*, 1997). O Co também pode ser absorvido quelatado e/ou complexado com compostos orgânicos.

O Co pode ser razoavelmente translocado das folhas para outras partes da planta, sendo que plantas de milho têm apresentando respostas positivas à associação de Co junto ao Mo aplicados via foliar (Campo e Hungria, 2000).

A adubação de Co em plantas ou solo deficientes não apenas aumenta a FBN, como contribui para melhor qualidade nutricional da forrageiras. O Co é essencial para ruminantes porque a microflora é capaz de sintetizar a vitamina B12 em quantidades suficientes para atender as necessidades dos animais (Asher, 1991).

2.3.6 Molibdênio

O molibdênio (Mo) é absorvido na forma do ânion molibdato (MoO_4^{2-}), de modo que a absorção de Mo pode ser reduzida pelo efeito competitivo do ânion sulfato (SO_4^{2-}). Embora o Mo seja considerado moderadamente móvel na planta, a forma com que é translocado ainda não é completamente conhecida. Resultados sugerem que o Mo se mova no xilema como MoO_4^{2-} , como complexo Mo-S aminoácido ou como molibdato complexado com açúcares.

O Mo é componente de cinco enzimas distintas que catalisam reações muito diversas participando em processos de transferências eletrônica: nitrogenase, redutase do nitrato, oxidase da xantina, oxidase de aldeído e oxidase do sulfato.

A deficiência de Mo afeta negativamente a formação de ácido ascórbico, o conteúdo de clorofila e a atividade respiratória. A deficiência em Mo induz uma concentração anormal de NO_3^- nas folhas e, portanto, influi no metabolismo de N. A deficiência de Mo pode influenciar a viabilidade do grão de pólen e, conseqüentemente, a produtividade das plantas.

2.4 Diagnose visual dos sintomas de deficiência

A técnica diagnose visual baseia-se no princípio de que todas as plantas necessitam dos mesmos nutrientes, e se houver deficiências no solo, estas irão provocar sintomas semelhantes (alterações morfológicas), provenientes de alterações fisiológicas (Malavolta *et al.*, 1997). A diagnose visual pode ser usada como um indicativo de disponibilidade de nutrientes no solo. Na Tabela 5 são descritos os principais sintomas de deficiência na cultura do milho.

Tabela 5. Descrição sucinta dos sintomas de deficiência de nutrientes na cultura do milho.

Elemento	Sintoma de deficiência
N	Amarelecimento das folhas mais velhas (formato de “V” invertido)
	Morte prematura de folhas e/ou plantas
	Espigas pequenas
	Colmos finos
	Grãos leves
	Tombamento de plantas
P	Coloração púrpura ou arroxeadas das folhas novas
	Colmos frágeis e delgados
	Espigas pequenas e retorcidas (tortas) nas extremidades
K	Margens das folhas inferiores (velhas) amarelada, alaranjada ou bronzeada
	Manchas marrons no interior do colmo
	Espigas com extremidade sem grãos e com sabugo afilado
Ca	Clorose nas folhas novas
	Redução do crescimento radicular
	Morte das extremidades das raízes
	Falhas de granação
Mg	Folhas inferiores com listras cloróticas paralelas às nervuras
	Crescimento reduzido da planta

S	Amarelecimento das folhas novas
	Crescimento reduzido da planta
B	Folhas avermelhadas no final do ciclo da cultura
	Formação de vincos salientes nas folhas novas
	Espigas pequenas e falhas na granação
	Extremidade das espigas com aspecto de cortiça
Zn	Folhas com coloração esbranquiçada em faixas próximas à região do cartucho
	Crescimento reduzido da planta
	Encurtamento dos internódios
Mn	Clorose internerval nas folhas novas (sintomas semelhantes a deficiência de magnésio)
	Colmos finos
	Menor crescimento das plantas

Fonte: Adaptado de Fancelli e Dourado-Neto (2000) e Fancelli (2010).

3 Avaliação do estado nutricional para fins de adubação

3.1 Avaliação da fertilidade do solo

O histórico de cultivo de uma área deve ser conhecido para que os impactos potenciais do fornecimento de nutrientes possam ser estimados. É importante obter informações tais como quais sistemas de manejo foram implantados e por quanto tempo, quais culturas foram cultivadas, o tipo de adubação usada e o nível de produtividade alcançado.

A amostragem do solo é a primeira etapa da análise do solo, antes de ser criado um programa de correção e fertilização de uma área. Portanto, é extremamente importante que as amostras de solo coletadas sejam representativas.

Para a cultura do milho é recomendada a amostragem de solo anualmente em duas profundidades, 0-20 cm e 20-40 cm. A cada gleba (parcela em condições similares de relevo, tipo de solo ou outros fatores), uma amostra composta, composta por 10 subamostras – das quais sete devem ser coletadas na entrelinha e três na linha da cultura – deve ser analisada. Quando se desejar avaliar a disponibilidade de S, amostras de solo devem ser coletadas de profundidades maiores.

A análise química do solo, baseia-se nos teores de nutrientes disponíveis no solo para as plantas. Para estabelecer se uma faixa de disponibilidade de nutrientes no solo é insuficiente ou adequada para a obtenção de níveis ótimos de produtividade, são realizados estudos de calibração e correlação entre os valores obtidos por um determinado método de extração e a resposta das culturas à adubação. No Brasil são utilizadas diferentes classes de concentração em função do extrator utilizado, da cultura e do nível tecnológico adotado. A Tabela 6 mostra os níveis dos teores de K e P, extraídos por resina, e os níveis recomendados para o Estado de São Paulo. Nas Tabelas 7 e 8, apresenta-se a interpretação de análise química do solo para K e P na região do cerrado, utilizando como extrator a solução Melich-1. Neste caso, o teor de argila é utilizado para interpretação dos resultados da análise de P, e a CTC do solo é levada em consideração e para a interpretação dos teores de K. Na Tabela 9 são listados os limites de classes de teores de Mg e S trocáveis para a maioria dos cultivos. A interpretação dos níveis de micronutrientes encontra-se na Tabela 10.

Tabela 6. Limites de classes de teores de P e K para solos do Estado de São Paulo.

Classe de teor	Produção relativa	K ⁽¹⁾	K ⁽¹⁾	P ⁽¹⁾	P ⁽²⁾
	%	mmol _c dm ⁻³	(mg dm ⁻³)		
Muito baixo	<70	<0,7	<30	<6	<7
Baixo	71-90	0,8-1,5	30-60	7-15	7-15
Médio	91-100	1,6-3	61-120	16-40	16-25
Alto	>100	3,1-6	121-240	41-80	26-40
Muito alto	>100	>6	>240	>80	>40

Extrator resina.

Fonte: ⁽¹⁾ Adaptado de Raij *et al.* (1996); ⁽²⁾ Sugerido por Vitti (dados não publicados, 2016).

Tabela 7. Interpretação de análise de solo para P de acordo com o teor de argila, para recomendação de adubação fosfatada em sistemas de sequeiro com culturas anuais.

Teor de argila (%)	Teor de P no solo				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Adequado	Alto
	mg dm ⁻³				
≤15	<6	6,1-12	12,1-18	18,1-25	>25
16 to 35	<5	5,1-10	10,1-15	15,1-20	>20
36 to 60	<3	3,1-5	5,1-8	8,1-12	>12
>60	<2	2,1-3	3,1-4	4,1-6	>6,0

Extrator Mehlich-1.

Fonte: Sousa e Lobato (2004).

Tabela 8. Limites de classes de teores K para culturas anuais em solos do Cerrado.

CEC	Teor de K no solo			
	Baixo	Médio	Adequado	Alto
(mmol _c dm ⁻³)	mg dm ⁻³			
<40	≤15	16-30	31-40	> 40
≥40	≤25	26-50	51-80	> 80

Extrator Mehlich-1.

Fonte: Vilela *et al.* (2004).

Tabela 9. Limites de classes de teores de Ca, Mg e S no solo.

Classe de teor	Ca ^{(1)*}	Mg ^{(2)*}	S ^{(3)**}
	mmol _c dm ⁻³		mg dm ⁻³
Baixo	<12	<4	<10
Médio	12-24	5-8	10-15
Alto	24-40	>8	>15

* Extrator – KCl 1 mol L⁻¹; ** Turbidimetria (BaCl₂).

Fonte: ⁽¹⁾ Alvarez *et al.* (1999); ⁽²⁾ Raij *et al.* (1996); ⁽³⁾ Vitti (1989).

Table 10. Limites de interpretação dos teores de micronutrientes no solo.

Classe de teor	B*	Cu**	Fe**	Mn**	Zn**
	mg dm ⁻³				
Baixo	0-0,2	0-0,2	0-4	0-1,2	0-0,5
Médio	0,21-0,6	0,3-0,8	5,0-12,0	1,3-5	0,6-1,2
Alto	>0,6	>0,8	>12	>5	>1,2

* Extrator água quente; ** Extrator ácido dietilenotriaminopentacético (DTPA).

Fonte: Raij *et al.* (1996).

3.2 Diagnose foliar

A utilização da diagnose foliar para avaliar a capacidade de suprimento do solo é justificada pelo fato das folhas serem órgãos que refletem o estado nutricional da planta, ou seja, respondem diretamente ao suprimento de nutriente pelo solo ou fertilizante (Malavolta *et al.*, 1997).

Para avaliação do estado nutricional pela técnica da diagnose foliar na cultura do milho, os protocolos usuais de análise foliar recomendam que os 20 cm centrais da folha oposta e abaixo da espiga (Fig. 6), sejam coletados (excluindo a nervura central) de 30 plantas ha⁻¹ logo após o aparecimento da inflorescência feminina (Malavolta *et al.*, 1997). Algumas tabelas de interpretação recomendam a coleta do terço basal da mesma folha (Martinez *et al.*, 1999). É importante adequar a metodologia de coleta à tabela de interpretação a ser usada, uma vez que diferentes elementos possuem mobilidade distinta na planta e podem variar sua concentração ao longo da planta e do ciclo produtivo, levando a interpretações incorretas caso outras partes da planta, que não sejam as recomendadas, sejam amostradas.

Na literatura, podem ser encontradas várias faixas de níveis de nutrientes considerados adequados para o milho. Ao analisar as recomendações, os agricultores devem prestar atenção àquelas que mais se adaptam ao tipo de solo e clima encontrados em sua região e ao nível de tecnologia que está sendo usado. A Tabela 11 mostra os níveis foliares considerados adequados para macro e micronutrientes da cultura do milho, segundo diversos autores.



Figura 6. Amostragem de folha para a cultura do milho.
Fonte: cortesia de Bruna Giacon.

Tabela 11. Teores foliares de macro e micronutrientes adequados para a cultura do milho.

Fonte	N	P	K	S	Mg	Ca
	g kg ⁻¹					
(1)	27,5-32,5	1,9-3,5	17,5-29,7	1,5-2,1	1,5-4,0	2,3-4,0
(2)	27,0-35,0	1,9-4,0	17,0-35,0	1,5-3,0	1,5-5,0	3,0-10
(3)	27,5-32,5	2,5-3,5	17,5-22,5	1,0-2,0	2,5-4,0	2,5-4,0
(4)	35,0-40,3	3,3-3,8	22,7-28,9	2,1-3,0	1,6-2,2	4,4-6,2
Fonte	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
	mg kg ⁻¹					
(1)	15-20	6-20	50-250	42-150	0,15-0,20	15-50
(2)	7-25	6-20	21-250	20-200	0,15-0,20	15-100
(3)	4-20	6-20	20-250	20-150	0,20	20-70
(4)	8,9-17,7	9,1-14,1	122-219	17,5-49,1	-	18-34,1

Fonte: ⁽¹⁾ Bull (1993); ⁽²⁾ Rajj *et al.* (1996); ⁽³⁾ Martinez *et al.* (1999); ⁽⁴⁾ Gott *et al.* (2014).

Há uma desvantagem em interpretar os níveis de nutrientes individualmente com esta técnica, pois as tabelas não levam em consideração vários fatores como as interações entre os nutrientes, variação da concentração com a idade e grau de desenvolvimento da planta e diferenças entre variedades.

O método clássico faz uma interpretação a partir da comparação dos resultados analíticos com os parâmetros previamente tabulados (índice padrão). Um dos problemas desse método é o fato de não indicar se determinado nutriente está em concentração deficiente ou tóxica; apenas que está fora do índice padrão.

Para a interpretação e comparação dos dados das análises foliares, existe o Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação ou índice DRIS (*Diagnosis and Recommendation Integrated System*), que é uma ferramenta que expressa o equilíbrio entre os nutrientes. Portanto, este sistema pode ser utilizado para identificar e corrigir deficiências nutricionais para safras futuras, bem como descobrir possíveis causas de baixa produtividade relacionadas à nutrição das plantas. Na interpretação do índice DRIS, o nível de desequilíbrio de nutrientes pode ser observado em função da amplitude dos índices negativos ou positivos. Quanto maior a distância do valor do índice do padrão (zero), tanto negativo (deficiência) quanto positivo (toxicidade), maior o efeito negativo desse nutriente sobre a capacidade da planta de atingir alta produtividade.

Índices de balanço de nutrientes, como o DRIS, são cada vez mais usados para investigar o estado nutricional das plantas a fim de estabelecer uma prioridade de correção e/ou adequação de nutrientes limitantes em determinadas condições. No entanto, esses índices devem ser usados com cautela, uma vez que os programas computacionais estão usando algoritmos cada vez mais complexos para sua obtenção. Muitos profissionais estão, portanto, usando os índices sem conhecer as implicações de cada variável e as condições locais específicas. Para o uso adequado desses índices, é aconselhável que o usuário tenha um conhecimento sólido de nutrição mineral de plantas e da dinâmica dos nutrientes na planta e no meio ambiente.

Em se tratando de nutrição com K, o equilíbrio entre os nutrientes é muito importante, uma vez que tanto a absorção quanto a participação desse nutriente nas funções fisiológicas da planta são influenciadas por sua interação com outros elementos como Ca, Mg e N – principalmente na forma iônica NH_4^+ . Portanto, mesmo na presença de níveis adequados de nutrientes no solo ou no tecido vegetal, pode haver redução da produtividade ou manifestação de sintomas de deficiência, caso haja desequilíbrio nutricional.

4 Manejo químico do solo

4.1 Práticas corretivas

4.1.1 Calagem

Visando maximizar a eficiência de uso dos nutrientes pelas plantas, o solo precisa ter sua acidez corrigida de acordo com as exigências da cultura. Calagem é a prática realizada para corrigir a acidez do solo. A acidez do solo pode ser dividida em dois tipos, acidez ativa e acidez potencial e esta última, por sua vez, pode ser subdividida em acidez trocável e acidez não-trocável.

A acidez ativa é aquela composta pelo hidrogênio (H) dissociado, na forma do íon H^+ , na solução do solo, e é expressa em valores de pH. Porém importante salientar que nos solos (à semelhança aos ácidos fracos), a maior parte do hidrogênio não está dissociada.

A acidez trocável refere-se aos íons H^+ e Al^{3+} que estão retidos na superfície dos colóides do solo por forças eletrostáticas. Depois de liberados na solução do solo, os íons de Al^{3+} se hidrolisam, liberando íons H^+ . A quantidade de hidrogênio trocável, em condições naturais, pode ser considerada pequena. A acidez não trocável é representada pelo hidrogênio de ligação covalente, associado aos colóides com carga variável negativa e aos compostos de Al (incluindo o hidroxialumínio). Esses íons não são removidos por solução salina, mas, à medida que os íons H^+ são removidos e/ou neutralizados na solução do solo, esses compostos dissociam mais íons H^+ exercendo um efeito tamponante do pH da solução do solo; um efeito que é ainda mais evidente em solos tropicais altamente intemperizados. Na Fig. 7 estão esquematizadas de forma simplificada as reações que ocorrem durante a correção da acidez do solo pela aplicação de calcário.

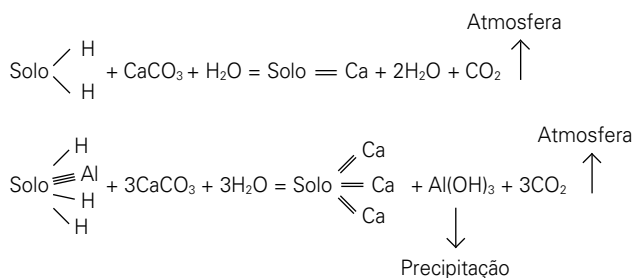


Figura 7. Reações de neutralização da acidez do solo

Fonte: Longanathan (1987).

O calcário reduz a acidez do solo (aumenta o pH) convertendo alguns íons H^+ em água. Acima de pH 5,5, o Al^{3+} precipita como $Al(OH)_3$, removendo da solução do solo o íon Al^{3+} que, caso presente, possui ação fitotóxica, além de ser uma fonte de íons H^+ após ocorrer processo de hidrólise. A reação funciona assim: enquanto íons de cálcio (Ca^{2+}) do calcário substituem o Al (Al^{3+}) e parte do H (H^+) nos pontos de troca, o íon carbonato (CO_3^{2-}) reage com a solução do solo criando excesso de íons hidroxilas (OH^-) que, em seguida, reagem com o H^+ (excesso de acidez), formando água. O carbonato de Mg reage da mesma forma. Os carbonatos (de Ca ou de Mg) reagem com o H^+ do solo liberando água e gás carbônico. O alumínio é insolubilizado na forma de hidróxido. No caso de outros corretivos da acidez de solo, que não o calcário, como a cal virgem CaO , cal hidratada $Ca(OH)_2$, calcário calcinado, etc., que são quimicamente bases fortes, o mecanismo de neutralização da acidez do solo baseia-se na reação da hidroxila (OH^-) com o (H^+) da solução do solo.

O inverso desse processo também pode ocorrer e o solo se tornar mais ácido se um programa de calagem não for seguido. À medida que íons básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+) são removidos, geralmente por absorção pelas culturas, eles podem ser substituídos na CTC do solo por H^+ , e por Al^{3+} que volta a se formar com a decorrente redução do pH (excesso de H^+). Os íons básicos podem também ser perdidos por lixiviação, novamente sendo substituídos por H^+ e Al^{3+} . A atividade do íon H^+ aumenta, abaixando o pH do solo, se não for feita a calagem adequada.

A prática da calagem é considerada essencial em solos com valor de pH abaixo de 5,6. Baixo pH implica em saturação de bases (V%) muito baixa no solo (Catani e Gallo, 1955). Se a V% do solo for baixa, em vez de elementos essenciais para o metabolismo do milho estarem adsorvidos aos coloides, os sítios de adsorção são ocupados por outros cátions, como H^+ e Al^{3+} , que são prejudiciais ao crescimento da raiz e ao metabolismo da planta.

Uma vez que os níveis tóxicos de H^+ e Al^{3+} tenham sido corrigidos pela calagem, forma-se um ambiente químico mais propício ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, o que reflete em maior resistência à seca, maior absorção de nutrientes e consequentemente maior produtividade. A redução de fatores que influenciam negativamente no desenvolvimento do sistema radicular é de fundamental importância para o sucesso do sistema agrícola, principalmente em países tropicais, com altas temperaturas, e em regiões onde é comum a ocorrência de veranicos.

Outro motivo para o emprego da calagem é o fornecimento de Ca e Mg para o solo. O calcário é um produto que é obtido a partir da moagem da rocha calcária cujos principais constituintes são o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e o carbonato de magnésio ($MgCO_3$).

Além de ser fonte de Ca e Mg, a calagem aumenta a disponibilidade de nutrientes como P, K, S e Mo, reduz a absorção de Al^{3+} , Fe^{2+} e Mn^{2+} , aumenta a atividade microbiana propiciando maior mineralização da materiais orgânicos, aumenta a fixação biológica no N_2 , bem como melhora a estrutura do solo.

Diversos trabalhos têm mostrado resultados variáveis sobre o efeito da calagem na produtividade do milho. Em alguns casos não é observada resposta (Moreira *et al.*, 2001), porém na maioria dos estudos, a aplicação de calcário promove aumento da produtividade do milho (Zandoná *et al.*, 2002; Caires *et al.*, 2004; Dalla Nora *et al.*, 2014). Caires *et al.* (2004) verificaram que a calagem superficial, com ou sem parcelamento ou incorporação, aumentou a produção de milho em 13% em Latossolo Vermelho distrófico argiloso.

A produtividade do milho é positivamente influenciada pela aplicação combinada de gesso e calcário, sendo o incremento de Ca um fator determinante para este resultado. Isso tem sido confirmado por experimentos nos quais a aplicação somente de calcário resultou em alteração da produtividade, mesmo quando a calagem corrigiu o pH e promoveu níveis adequados de Ca e Mg na camada superficial do solo.

No Brasil, as recomendações de correção de acidez do solo para o cultivo do milho visam elevar a V% até 70% (Raij *et al.*, 1996), o que correlaciona com pH ($CaCl_2$) próximo a 6,0. Segundo Raij *et al.* (1996), em solos com teores de matéria orgânica maior que 50 g dm^{-3} , a elevação da V% até 50% é suficiente. Existem vários critérios de calagem, sendo os principais os que consideram o poder tampão do solo (dado pela CTC), a V%, e os teores de Ca e Mg. Em áreas cultivadas pela primeira vez é necessário corrigir os teores de bases em maior profundidade, recomendando-se usar a equação 2. Em áreas consolidadas, recomenda-se usar a equação 3 para o cálculo da necessidade de calagem.

$$(2) \quad NC = \frac{[(V2 - V1_{0-20}) \times CTC_{0-20}] + [(V2 - V1_{20-40}) \times CTC_{20-40}]}{10 \times PRNT}$$

$$(3) \quad NC = \frac{[(V2 - V1_{0-20}) \times CTC_{0-20}]}{10 \times PRNT}$$

Onde: NC = necessidade de aplicação de calcário ($t\ ha^{-1}$);
 V2 = V% recomendada para a cultura do milho 70%;
 $V1_{0-20}$ = V% atual do solo na camada 0-20 cm;
 $V1_{20-40}$ = V% atual do solo na camada 20-40 cm;

CTC_{0-20} = CTC do solo na camada 10-20 cm ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$);
 CTC_{20-40} = CTC do solo na camada 20-40 cm ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$);
 PRNT = Poder Relativo de Neutralização Total do calcário (%).

Outro critério para recomendação de calagem é o que preconiza a aplicação de calcário para elevar os teores de Ca e Mg do solo até $30 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Este método é particularmente utilizado em solos com baixa CTC visando garantir níveis adequados desses elementos para o milho. A recomendação por esse critério é baseada na equação 4. Como regra, recomenda-se optar pelo critério de recomendação que demande a aplicação da maior dose de calcário.

$$(4) \quad NC = \frac{[30 - (Ca + Mg) \times 10]}{10 \times PRNT}$$

Onde: NC = Necessidade de aplicação de calcário (t ha^{-1});
 Ca = Teor de Ca no solo na camada 0-20 cm ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$);
 Mg = Teor de Mg no solo na camada 0-20 cm ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$);
 PRNT = Poder Relativo de Neutralização Total do calcário (%).

O calcário deve ser aplicado cerca de três meses antes da semeadura para garantir tempo necessário para ocorrer a reação do calcário no solo. Além disso, conforme representado na Fig. 7, a umidade do solo é fundamental para assegurar a efetividade da calagem. Recomenda-se, também, a realização de uma gradagem leve para incorporar o calcário aplicado superficialmente, visto que a má distribuição e/ou a incorporação muito rasa do calcário no solo pode causar ou agravar a deficiência de micronutrientes metálicos, resultando em queda de produtividade.

Em áreas de abertura, a incorporação da camada arável (0-20 cm) é fundamental, em função das altas doses recomendadas. Caso não haja incorporação adequada do calcário, pode haver alta concentração do corretivo na camada superficial, o que pode levar a precipitação de nutrientes como P, Zn, Fe, Cu e Mn. Por este mesmo motivo, as recomendações para áreas sob sistema semeadura direta consolidado possuem algumas restrições.

Em áreas com teores de argila superiores a 30% e/ou $CTC > 70 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e os teores de micronutrientes catiônicos (Mn, Zn e Cu) estiverem em níveis adequados, pode-se realizar a calagem a lanço sem incorporação, desde que a dose não ultrapasse $3,0 \text{ t ha}^{-1}$. Nesta mesma condição, se a necessidade de calagem exceder $3,0 \text{ t ha}^{-1}$, deve-se incorporar o calcário na camada arável do solo. Por outro lado, em áreas

com teores de argila inferiores a 30% e/ou CTC <70 mmol_c dm⁻³, e os teores de micronutrientes catiônicos estiverem em níveis adequados, pode-se aplicar o calcário a lanço sem incorporação desde que a dose não ultrapasse 2,0 t ha⁻¹. Nesta mesma condição, se necessidade de calagem for superior a 2,0 t ha⁻¹ deve-se incorporar o calcário na camada arável do solo.

Em áreas sob sistema de semeadura direta consolidado que apresentem teores de micronutrientes catiônicos abaixo do nível crítico, tanto em solos argilosos quanto em solos arenosos, é fundamental corrigir os teores destes nutrientes por meio de adubação quando aplicações superficiais de calcário tenham sido realizadas visando a correção da acidez do solo.

4.1.2 Gessagem

A aplicação de sulfato de cálcio (gesso) é uma importante prática corretiva que diminui a saturação por Al e eleva os teores de cálcio e enxofre, melhorando as propriedades químicas do subsolo, que geralmente é um ambiente pouco favorável ao desenvolvimento de raízes (Vitti *et al.* 2008). O sulfato de cálcio ocorre sob três formas: anidrita (CaSO₄), gipsita (gesso natural CaSO₄.2H₂O) e gesso agrícola (fosfogesso) obtido como subproduto da produção do ácido fosfórico.

Para Raij *et al.* (1998) a resposta à aplicação de gesso depende do grau de tolerância da variedade utilizada ao estresse por Al. Os autores relatam que em solos ácidos, com valores de V% menor que 36% e elevada concentração de Al, a produtividade do milho foi menor para variedades sensíveis à toxicidade do Al onde apenas calcário foi aplicado. O uso de gesso em adição ao calcário reduziu a saturação de Al no subsolo e aumentou a produtividade de grãos de tais cultivares sensíveis.

Estudos realizados por Zandoná *et al.* (2015) mostraram que a aplicação de gesso agrícola contribui para elevar os teores de Ca²⁺, redistribuir Mg²⁺ para as camadas 10-20 cm e 20-40 cm e diminui os teores de Al na camada subsuperficial. Onde o gesso foi aplicado, foram observados aumentos de até 2 t ha⁻¹ na produtividade de grãos do milho.

Aplicando apenas de gesso agrícola (9 t ha⁻¹) como fonte de Ca, Caires *et al.* (2004) verificaram aumento de 5% na produção do milho. A aplicação de calcário juntamente com o gesso agrícola aumentou a produção de milho em 17% em comparação com a aplicação apenas de gesso somente. De acordo com os autores, este aumento não foi decorrente de alterações no crescimento do sistema radicular em profundidade, mas sim devido ao aumento da saturação de Ca nas camadas superficiais do solo.

Além disso, os autores sugeriram que o gesso pode ter aumentado a lixiviação do Mg, reduzindo a disponibilidade de Mg na camada superficial do solo. A aplicação de calcário se mostrou útil para fornecer Mg e compensar o aumento da lixiviação de Mg, e a aplicação combinada de gesso mostrou-se uma estratégia eficiente para maximizar a produção de grãos.

Desse modo, a gessagem deve ser realizada após a calagem, visando o condicionamento do subsolo (20-40 cm), quando este apresentar qualquer uma das seguintes condições:

- (i) Teor de Ca trocável menor que $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$;
- (ii) Teor de Al trocável maior que $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$;
- (iii) Saturação da CTC efetiva (Ca + Mg + K + Na + Al) por Al maior que 30%;
- (iv) Saturação de bases menor que 30% ($V\% < 30$).

Para determinar a dose de gesso a ser aplicada podem ser utilizados vários critérios. Os principais e que vem produzindo melhores resultados estão listados a seguir:

- (i) Recomendação baseada no teor de argila (Sousa e Lobato, 2004).

$$(5) \quad NG_{(t \text{ ha}^{-1})} = 5,0 \times Argila_{(g \text{ kg}^{-1})}$$

- (ii) Recomendação baseada no teor de argila (Raij *et al.*, 1996).

$$(6) \quad NG_{(t \text{ ha}^{-1})} = 6,0 \times Argila_{(g \text{ kg}^{-1})}$$

- (iii) Recomendação baseada na elevação da V% a 50 (Vitti *et al.*, 2008).

$$(7) \quad NG = \frac{[(50 - V1_{20-40}) \times CTC_{20-40}]}{500}$$

Onde: NG = necessidade de gessagem em $t \text{ ha}^{-1}$.

V1 = V% do solo na camada 20-40 cm.

CTC_{20-40} = CTC na camada 20-40 cm ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), para uma CTC máxima de $100 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

- (iv) Recomendação baseada no fornecimento de S suficiente para três ciclos de cultivo, em áreas com baixo Al e Ca suficiente em subsuperfície (critério dos autores).

se $V1_{(20-40 \text{ cm})} > 40$: verificar o teor S $_{(20-40 \text{ cm})}$:

se $S_{(20-40 \text{ cm})} < 15 \text{ mg dm}^{-3}$, $NG = 300 \text{ kg ha}^{-1}$,

se $S_{(20-40 \text{ cm})} > 15 \text{ mg dm}^{-3}$, não aplicar gesso.

O gesso agrícola deve ser aplicado em área total e a lanço, após a realização da calagem, cerca de três meses antes da adubação mineral de semeadura, não sendo necessária incorporação.

4.1.3 Fosfatagem

No solo, o P está disponível para as plantas na forma dos ânions PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} e $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$. A fração argila da maioria dos solos tropicais possui alta quantidade de óxidos de ferro e alumínio que, na faixa natural de pH destes solos, apresentam cargas positivas em sua superfície. Estas cargas atraem e se ligam fortemente aos ânions de fosfato tornando-os indisponíveis para o crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas. Diz-se então o P foi fixado no solo ou sofreu fixação no solo.

Como medida para melhorar o aproveitamento de P em sistemas agrícolas tropicais, a fosfatagem corretiva pode ser realizada. Essa prática consiste em aplicar fontes de P de baixa solubilidade em água para liberarem P lentamente para o solo. Essa liberação lenta vai corrigindo a demanda de fixação de P pelo solo, ao mesmo tempo que fornece P para as plantas. A fosfatagem corretiva é caracterizada por ser uma prática que visa aumentar a eficiência dos fosfatos solúveis em água aplicados no sulco de modo a aumentar a absorção de P pelas plantas. Esta prática não elimina a necessidade de adubação fosfatada durante a semeadura para atendimento direto da demanda do milho.

Em solos com teores de P menores que 15 mg dm^{-3} (classes baixo e muito baixo, extrator resina) e classificados abaixo do nível adequado (Tabela 9) pelo extrator Melich-1, recomenda-se realizar a fosfatagem através da aplicação em área total de fontes de fosfato de baixa solubilidade. Para isso, pode-se utilizar o fosfato natural reativo (levando em consideração o teor de P_2O_5 total), termofosfato magnesiano, fosfatos parcialmente acidulados ou até mesmo fontes mais solúveis (levando-se em consideração o custo da unidade de P_2O_5).

Os dois principais critérios de recomendação de aplicação de fontes de fosfato para fins corretivos são:

(i) Aplicação de $5 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ para cada ponto percentual do teor de argila do solo, até teores máximos de 30% Vitti e Mazza (2002).

(ii) Doses de P_2O_5 para aumentar teor de fósforo no solo (em mg dm^{-3}) para atingir o nível crítico, em função do teor de argila e tipo de extrator usado na análise de solo (Sousa *et al.*, 2006). Nesse caso, deve-se considerar a capacidade tampão do solo (Tabela 12), sendo a quantidade de P_2O_5 a ser aplicada definida pela seguinte fórmula:

$$(8) \quad NP_{(kg \ ha^{-1})} = (P_{critico} - P_{solo}) \times CT$$

Onde: NP = Quantidade de P_2O_5 a ser aplicada ($kg \ ha^{-1}$).

$P_{critico}$ = Nível crítico de P na camada 0-20 cm ($mg \ dm^{-3}$).

P_{solo} = Teor de P na camada 0-20 cm ($mg \ dm^{-3}$).

CT = Capacidade tampão de P do solo ($kg \ P_2O_5 \ ha^{-1} / mg \ dm^{-3}$ de P)

Tabela 12. Níveis críticos de fósforo para sistema de sequeiro e valores de capacidade tampão de fósforo do solo para determinar dose de fertilizante fosfatado utilizado na fosfatagem corretiva para culturas anuais (usando os métodos de extração Mehlich-1 e resina).

Teor de argila	Nível crítico de fósforo para o sistema de sequeiro*		Capacidade tampão de fósforo (CT)**	
	Mehlich-1	Resina	Mehlich-1	Resina
%	$mg \ dm^{-3}$		$kg \ P_2O_5 \ ha^{-1}$ para aumentar $1 \ mg \ dm^{-3}$ de P no solo	
10-15	20	15	5	6
16-25	17	15	7	8
26-35	15	15	10	10
36-45	12	15	16	12
46-55	9	15	26	15
56-65	6	15	42	17
66-70	4	15	70	19

* Para obtenção do nível crítico de fósforo no sistema irrigado (90% do potencial produtivo) multiplicar por 1,4 os valores de nível crítico do sistema de sequeiro;

** Dose de P_2O_5 para elevar o teor de P no solo em $1 \ mg \ dm^{-3}$, com base em amostra da camada de 0 a 20 cm.

Fonte: Sousa *et al.* (2006)

Os níveis críticos de P no solo e a capacidade tampão de P do solo em função do teor de argila estão descritos na Tabela 12. Por exemplo, considerando-se o extrator resina, em um solo com teor de argila entre 260 a $350 \ g \ kg^{-1}$ e teor de P de $5 \ mg \ dm^{-3}$, seria necessário aumentar o teor do nutriente em $10 \ mg \ dm^{-3}$ para atingir o nível crítico de $15 \ mg \ dm^{-3}$ de P no solo. Com base no teor de argila deste solo são necessários $10 \ kg \ ha^{-1}$ de P_2O_5 para elevar $1 \ mg \ dm^{-3}$ de P, ou seja, deverão ser aplicados $100 \ kg \ ha^{-1}$ de P_2O_5 .

4.2 Adubação mineral

4.2.1 Nitrogênio

A adubação nitrogenada é de grande importância no cultivo do milho, uma vez que o N é o nutriente mineral mais absorvido pela cultura. A recomendação para adubação da cultura do milho é baseada em fatores que incluem a estimativa do potencial de mineralização do N do solo, a quantidade de N mineralizado ou imobilizado pela cultura de cobertura, o requerimento do N pela cultura para atingir um rendimento projetado, e a expectativa da eficiência de recuperação do N disponível das diferentes fontes (solo, resíduo de cultura, fertilizante mineral).

Para a adubação de semeadura recomenda-se doses entre 30 a 45 kg ha⁻¹ de N, variando de acordo com a cultura antecessora. O uso de doses elevadas de N na semeadura N (> 60 kg ha⁻¹) pode levar à salinização e/ou a alcalinização da rizosfera, reduzindo a taxa de absorção de alguns elementos essenciais, principalmente de micronutrientes, pela raiz do milho. Posteriormente, ao longo do ciclo do milho, cerca de 70 a 150 kg ha⁻¹ de N devem ser aplicados no estágio em que quatro a seis folhas estão totalmente desenvolvidas (V4 a V6); o período em que o rendimento potencial da cultura é definido.

Para o cálculo da quantidade de N a ser aplicada vários critérios são adotados. Pode-se usar fórmula adaptada de Stanford e Legg (1984):

$$(9) \quad Nf = \frac{(Ny - Ns)}{Ef}$$

Onde: Nf = quantidade de N fertilizante requerida pela planta;

Ny = quantidade de N que pode ser acumulada na MS da parte aérea da planta (palhada + grãos), para uma determinada produção de grãos (aproximadamente 1% de N na palhada a 1,4 % de N nos grãos);

Ns = N suprido pelo solo (20 kg de N para cada 1% de matéria orgânica do solo- MOS);

Ef = é o fator de eficiência ou aproveitamento do fertilizante pela planta (calculado em função do aumento do conteúdo de N da parte aérea por unidade de fertilizante aplicado [entre 0,5 e 0,7]).

Um exemplo de estimativa da adubação nitrogenada de cobertura para uma produtividade média de 7 t ha⁻¹ de milho está exemplificado na Tabela 13.

Tabela 13. Estimativa da necessidade de adubação nitrogenada para a cultura do milho para a produção de 7 t ha⁻¹ de grãos.

Necessidade da cultura para produzir	
Grãos, 7 t ha ⁻¹ × 1,4% de N	100 kg
Palhada, 7 t ha ⁻¹ × 1% de N	70 kg
Total	170 kg
Fornecimento pelo solo	
20 kg de N por 1% de M.O (solo com 3% de MOS)	60 kg
N aplicado na semeadura	30 kg
Necessidade de adubação	
Nr = (170-90)/0,6*	130 kg

* Eficiência da adubação = 60%

Quando a soja é cultivada como cultura antecessora, deve-se considerar o aporte de N desta cultura por fixação biológica. Isso é uma realidade no Brasil, uma vez que quase toda a área plantada de milho segunda safra tem a soja como cultura antecessora. Geralmente estima-se uma contribuição de cerca de 15 kg de N t⁻¹ de soja produzida. Para as produtividades médias do Cerrado, calcula-se que a fixação biológica de N pela cultura da soja deixe de 35 a 45 kg ha⁻¹ de N no solo que podem ser descontados do cálculo da necessidade de adubação nitrogenada de cobertura do milho.

Deve-se ter cuidado ao se utilizar ureia na adubação de cobertura do milho uma vez que este fertilizante é suscetível a perdas de N na ordem de 30 a 50% do N aplicado por volatilização da amônia (NH₃) formada após a ureia ser hidrolisada no solo. Para reduzir a perda de N por volatilização de amônia, recomenda-se que fertilizantes à base de ureia sejam incorporados ao solo para evitar que a amônia produzida seja transportada para fora do solo. Outra opção é utilizar ureia revestida com inibidores de urease que atrasam a reação de hidrólise da ureia no solo, garantindo uma maior janela de tempo para a ocorrência de chuvas que ajudem a incorporar o fertilizante no solo, reduzindo assim as perdas de N. Também é possível utilizar fertilizantes de liberação controlada, que consistem em grãos de ureia recobertos com polímeros que reduzem o contato do fertilizante com a água do solo, fazendo com que a solubilização seja mais lenta e gradual. Isso permite um fornecimento regular e contínuo do nitrogênio para as plantas, reduzindo perdas por lixiviação, imobilização e volatilização.

Apesar da incorporação mecânica de ureia diminuir as perdas por volatilização, doses elevadas desse fertilizante aplicadas no sulco de semeadura podem levar à perda de produção devido a danos por salinização das sementes. Roscoe e Miranda (2013) testando doses de adubação nitrogenada em milho safrinha verificaram resposta linear da produção de grãos à aplicação a lanço de ureia, sendo a resposta positiva até a dose de 160 kg ha⁻¹ de N com produtividade estimada de 7.920 kg ha⁻¹ (Figura 8). A aplicação em sulco de semeadura gerou uma resposta quadrática na produção de milho safrinha, apresentando pico de produtividade de 7380 kg ha⁻¹ com a dose de 75 kg ha⁻¹ de N.

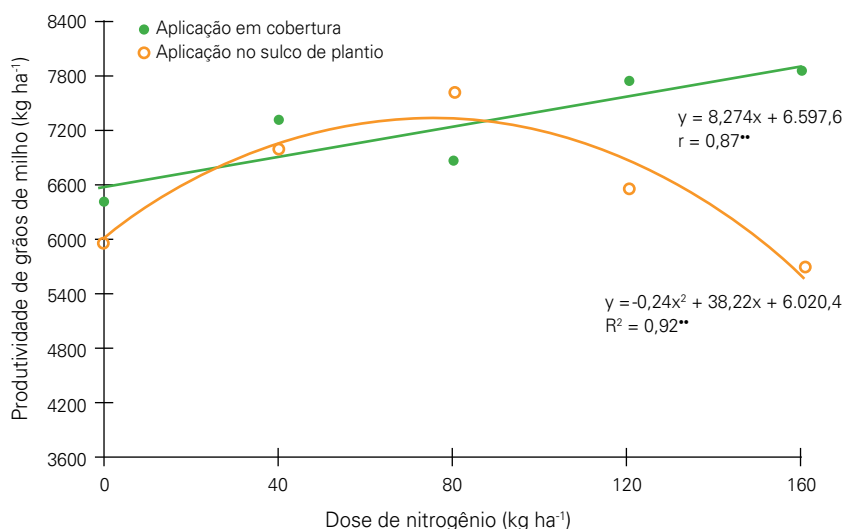


Figura 8. Produtividade do milho safrinha em função da dose de nitrogênio aplicada em sulco de semeadura e em cobertura.

Fonte: Adaptado de Roscoe e Miranda (2013).

Os fertilizantes nítricos e amoniacais não são suscetíveis a perdas de amônia por volatilização quando aplicados na superfície de solos não-alcálinos, sendo uma alternativa para adubação nitrogenada de cobertura do milho. Adicionalmente, fertilizantes amoniacais, ao se dissociarem no solo, liberam íons amônio (NH₄⁺) se oxidam liberando íons de H (H⁺) que diminuem o pH do solo aumentando a disponibilidade de micronutrientes metálicos (Zn²⁺, Mn²⁺, Cu²⁺, Fe²⁺), o que pode um fato positivo em solos que possuem níveis de pH muito elevado. No entanto, o custo por unidade de N normalmente é mais elevado para esses tipos de fertilizantes.

4.2.2 Fósforo

Embora a extração de P pelo milho seja relativamente pequena, no Brasil o baixo teor de P no solo é um dos fatores limitantes à obtenção de altas produtividades. O manejo da adubação fosfatada depende, principalmente, da capacidade de fixação e do teor de P do solo.

Em solos de Cerrado, durante os primeiros anos de cultivo do milho, observam-se rendimentos mais baixos, sendo o principal motivo o baixo teor de P desses solos. Após vários anos de cultivo e aplicações constantes de fertilizantes fosfatados, o solo fica enriquecido com P, tornando esse nutriente mais acessível às raízes e, conseqüentemente, aumentando a produtividade do milho. Em solos com baixos teores de P, recomenda-se a elevação dos níveis do elemento pela prática da fosfatagem. Após correção do teor de P no solo, recomenda-se a manutenção da fertilização com P no sulco de semeadura.

Tabela 14. Critério para adubação de semeadura do milho com P_2O_5 , de acordo com o teor de P no solo.

P* no solo	Dose recomendada de P_2O_5
mg dm ⁻³	kg ha ⁻¹
0- 7	200
7- 15	165
15- 25	130
25- 40	95
> 40	60

* Extrator resina.

A quantidade de fertilizante aplicada neste manejo leva em consideração o teor do elemento no solo e quantidade do nutriente exportada pela cultura. As maiores doses de P serão aplicadas quanto menores forem os níveis do nutriente no solo e maiores as expectativas de produtividade.

Quando os teores de P tiverem sido corrigidos pela fosfatagem, ou caso tais níveis já se encontra nas classes média e muito alta, recomenda-se aplicar uma dose de manutenção de 9 kg de P_2O_5 por tonelada de grão, aplicada no sulco de semeadura. Assim, para uma produtividade esperada de 10 t ha⁻¹ recomenda-se aplicar cerca de

90 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Onde o teor de P ainda não tenha sido corrigido, sugere-se basear adubação no nível de P extraído por resina, conforme descrito na Tabela 14.

Para aplicação do fósforo nas operações de semeadura devem-se utilizar fontes aciduladas e com alta solubilidade em água, como o superfosfato simples, superfosfato triplo, fosfato monoamônico (MAP) ou fosfato diamônico (DAP), preferencialmente na forma granulada.

4.2.3 Potássio

4.2.3.1 Recomendações de adubação potássica

Os primeiros programas de recomendação de adubação no Brasil apresentavam recomendações singelas de adubação potássica para a cultura do milho. Isso foi atribuído à baixa resposta do milho à adubação com K uma vez que os próprios estoques e ciclos biogeoquímicos naturais do solo eram capazes de suprir K para o milho atingir sua produtividade potencial. Entretanto, o advento de híbridos de milho cada vez mais produtivos e o cultivo da soja como cultura antecessora (uma leguminosa que exporta grandes quantidades de K), têm demandado maiores aplicações de K para compensar as exportações do sistema.

Tabela 15. Interpretação da análise do solo e recomendação de adubação corretiva de K para culturas anuais conforme a disponibilidade do nutriente em solos de Cerrado.

Teor de K	Interpretação	Adubação corretiva
mg kg ⁻¹		kg de K ₂ O ha ⁻¹
CEC < 40 mmol _c kg ⁻¹		
< 15	Baixo	50
16- 30	Médio	25
CEC > 40 mmol _c kg ⁻¹		
< 25	Baixo	100
26- 50	Médio	50

Fonte: Vilela *et al.* (2004).

O primeiro passo para elevar a concentração de K a níveis adequados antes da semeadura do milho é através de uma adubação corretiva. Um trabalho realizado por Vilela *et al* (2004) propôs adubação corretiva de K em função do nível do nutriente e CTC do solo, como mostra a Tabela 15.

Outro método prático utilizado é buscar a elevação dos teores de K no solo de modo que o elemento passe a ocupar 4% da CTC. O cálculo para realizar essa correção usando KCl está descrito na equação 10.

(10) $KCl_{(kg\ ha^{-1})} = (160 \times [0,04 \times CTC_{(0-20cm)}]) - K_{solo}$

Onde: $KCl_{(kg\ ha^{-1})}$ = Necessidade de aplicação de KCl ($kg\ ha^{-1}$);
 CTC_{0-20} = CTC na camada 0-20 cm do solo ($mmol_c\ dm^{-3}$);
 K_{solo} = K trocável na camada 0-20 cm do solo ($mmol_c\ dm^{-3}$);

Uma vez corrigidos os teores de K no solo, deve-se realizar adubação anual apenas para reposição do K exportado pelo milho e possíveis perdas por lixiviação. A interpretação da análise de solo e a recomendação da adubação potássica com base no rendimento esperado para milho visando produção de grãos, são apresentadas na Tabela 16, adaptada de Coelho (2005).

Tabela 16. Recomendações de adubação potássica para a cultura do milho

Produtividade esperada	Recomendação de adubação ($kg\ ha^{-1}$ de K_2O)			
	Teor de K no solo			
t ha^{-1}	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto
	Estado de Minas Gerais ⁽¹⁾			
4-6	-	50	40	20
6-8	-	70	60	40
>8	-	90	80	60
	Estado de São Paulo ⁽²⁾			
4-6	70	50	40	20
6-8	110	70	50	30
8-10	140	110	70	40
>10	160	130	90	50
	Rio Grande do Sul and Santa Catarina ⁽³⁾			
-	100-130	70	40	20

Fonte: ⁽¹⁾ Alves *et al.* (1999); ⁽²⁾ Rajj e Cantarella (1996); ⁽³⁾ Comissão de Fertilidade do Solo – RS/SC (1994).

4.2.3.2 Manejo da adubação potássica

Para a adubação corretiva, a aplicação de K em pré-semeadura é uma prática de manejo recomendada para solos com baixos teores deste nutriente, pois ao atingir níveis adequados de K no solo aumenta-se, consequentemente, a eficiência da adubação de manutenção.

O fertilizante mais utilizado para adubação potássica é o cloreto de potássio (KCl), o qual apresenta alta salinidade (índice salino = 117). A aplicação de altas doses deste fertilizante no sulco de semeadura pode acarretar problemas de germinação e redução da produtividade devido a problemas de salinização. Desta forma, deve-se evitar a aplicação doses maiores do que 50 a 60 kg ha⁻¹ de K₂O no sulco de semeadura. Recomenda-se que o restante da quantidade recomendada seja aplicado a lanço área total. Em solos com teores de argila superiores a 300 g kg⁻¹ e/ou CTC superior a 40 mmol_c dm⁻³ a aplicação pode ser feita em pré-semeadura. No entanto, caso o teor de argila seja menor que 300 g kg⁻¹ e/ou a CTC do solo for inferior a 40 mmol_c dm⁻³ recomenda-se a aplicação de K em cobertura, no máximo até 25 dias após a emergência, uma vez que a absorção de K pelas plantas de milho ocorre principalmente nas fases iniciais do crescimento (Tabela 4 e Fig. 4).

Como fonte alternativa ao KCl, estão disponíveis atualmente fertilizantes naturais produzidos através do processamento do mineral denominado polialita, que possui baixa salinidade (índice salino = 12), com 14% de K₂O, e outros os três macronutrientes importantes: 19,2% de S, 12% de Ca, 3,6% de Mg. Desse modo, a polialita é uma fonte de K mais completa e mais recomendada para aplicação no sulco de semeadura, pois junto com o K fornece Ca e Mg e S em níveis equilibrados, mantendo níveis reduzidos de salinidade no ambiente radicular.

4.2.4 Enxofre

Para produtividades de até 6 t ha⁻¹ de grãos, recomenda-se a aplicação de 20 kg ha⁻¹ de S. Para produtividades maiores faz-se necessária uma aplicação de 40 kg ha⁻¹ de S.

A necessidade de aplicação de S geralmente é atendida pela aplicação de gesso agrícola (15% de S) durante a etapa de correção do solo. No entanto, outros fertilizantes que possuam S em sua composição podem ser usados anualmente para reposição anual deste nutriente no solo. Fertilizantes como o sulfato de amônio (24% de S), superfosfato simples (12% de S), polialita (19,2% de S) ou termofosfato magnésiano (4,0 a 6,0% de S) são boas opções.

Novamente, é comum que a necessidade de S seja suprida com a aplicação de gesso agrícola como condicionador de subsuperfície, ou de outros fertilizantes que contêm enxofre. Para situações pontuais, estão disponíveis novos produtos com S elementar que podem ser aplicados juntamente com o fósforo no sulco de semeadura ou com o N em cobertura, nos quais o S recobre o grânulo de fertilizante, aumentando sua eficiência.

4.2.5 Magnésio

A demanda de Mg pelo milho é geralmente atendida pela calagem quando calcário dolomítico é usado. Entretanto, para se alcançar altas produtividades, pode ser necessária uma aplicação de $0,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de Mg via foliar, parcelado em duas aplicações de $0,45 \text{ kg ha}^{-1}$; a primeira aplicação antes do pendoamento e a segunda no pós-pendoamento.

A fonte mais tradicional de Mg é o sulfato de magnésio, que é uma fonte solúvel e também fornece S. Outras fontes recomendadas são o óxido de magnésio (MgO), cloreto de magnésio ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), nitrato de magnésio ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e quelatos de Mg (como Mg-EDTA, por exemplo).

4.2.6 Micronutrientes

Em razão dos baixos teores no solo e da realização de práticas culturais como a calagem e o uso de fertilizantes cada vez mais purificados, o que diminui a disponibilidade dos micronutrientes para as plantas, (Vitti *et al.*, 2006), o fornecimento adequado de micronutrientes torna-se fundamental para o aumento da produtividade e da qualidade do milho.

Dentre os micronutrientes metálicos (Cu, Mn, Fe e Zn), o Zn é o mais limitante na produção de milho no Brasil, entretanto é comum haver relatos de deficiência deste elemento em várias regiões do mundo. Baixo teores de Zn ocorrem principalmente em solos intemperizados na região do Cerrado ou em solos desenvolvidos sobre rochas sedimentares com baixo conteúdo de Zn, como arenito e siltitos. A resposta à aplicação de Zn depende do patamar de produtividade da cultura e o teor do nutriente no solo. Ritchey *et al.*, (1986) observaram que em experimento realizado com doses de Zn, plantas fertilizadas com 3 kg ha^{-1} produziram quantidades semelhante às que receberam $9\text{-}27 \text{ kg ha}^{-1}$ do micronutriente. Em adubações com altas doses de Zn normalmente houve redução na produção. Devido à baixa mobilidade dos micronutrientes metálicos no solo, cujo principal mecanismo de contato íon-raiz é por difusão, recomenda-se a aplicação destes elementos no sulco de semeadura, visando a adequada nutrição das

plantas. Entretanto tem-se a opção de fazer aplicações corretivas de micronutrientes em área total, quando necessário.

Dos micronutrientes aniônicos (B e Mo), o B é o que se mostra mais limitante à produtividade em solos altamente intemperizados, havendo resposta do milho à aplicação deste micronutriente, principalmente em solos arenosos. Em solos pobres em B, a alta produtividade de milho combinada com doses elevadas de N e K pode ocasionar deficiência do micronutriente na cultura (Woodruff *et al.* 1987). Devido à alta mobilidade do B no solo o fornecimento deste elemento para as plantas pode ser à lanço em área total ou no sulco de semeadura. Para a segunda opção recomenda-se aplicar doses menores e utilizar fontes com menor solubilidade. Durante a fase reprodutiva do milho, a demanda por B é alta e coincide com o período crítico de disponibilidade de água, essencial para o suprimento do micronutriente à planta pela corrente transpiratória. Neste caso, a aplicação de B via foliar é recomendada.

As fontes de micronutrientes são divididas em inorgânicas (minerais) e orgânicas. Dentre as fontes inorgânicas têm-se as fontes ácidas, sais, silicatos (FTE), carbonatos, hidróxidos, óxidos, oxissulfatos e fosfitos. As principais fontes orgânicas são quelatos e ácidos fúlvicos e húmicos. De modo geral essas fontes podem ser fornecidas de três formas às plantas de milho: aplicações via solo, via foliar e tratamento de sementes. A aplicação de micronutrientes via solo é geralmente realizada durante a semeadura sendo a aplicação realizada no sulco de semeadura (Tabela 17).

Tabela 17. Sugestão de adubação de micronutrientes na semeadura de milho.

Nutriente	Dose (kg ha ⁻¹)	Fonte
Zn	3,0 a 5,0	Oxisulfato
B	1,0	Ulexita

Fonte: Vitti (2017, dados não publicados).

Para a aplicação via foliar deve-se levar em consideração a dose, a época de aplicação e o micronutriente. O fornecimento de micronutrientes via foliar permite correção rápida, porém é menos duradoura e não corrige os níveis de micronutrientes no solo. Para adubação foliar, micronutrientes são aplicados principalmente na forma de sulfato, fontes quelatadas ou fosfitos.

Para a cultura do milho, o Zn e o Mn devem ser aplicados junto com o inseticida para o controle da lagarta do cartucho entre os estádios V4 e V6, na dose de 100 g ha⁻¹, se utilizada fonte quelatizada, e 400 g ha⁻¹ se utilizada como fonte um sal. Além disso,

deve-se aplicar 60 g ha⁻¹ de Mo, juntamente com a primeira aplicação de Zn e Mn. O resumo das aplicações foliares para a cultura do milho é descrito na Tabela 18.

A aplicação via semente de Zn pode ser realizada junto a produtos fitossanitários, em doses por volta de 90-100 g ha⁻¹ de Zn. É importante verificar sua compatibilidade com os produtos fitossanitários usados no caso da aplicação via semente. O maior problema para o tratamento de sementes é que estas já vêm blindadas/protegidas de alguma forma pelas empresas produtoras, o que dificulta a realização de tratamentos adicionais.

Tabela 18. Sugestão de adubação foliar na cultura do milho.

Estádio	Mn	Zn	Cu	Mo	Mg
	g ha ⁻¹				
V4	50	60		30	-
V8	100	60	25	30	-
Pré-pendoamento	100	-	25	-	450
Pós-pendoamento	-	-	25	-	450
Total	250	120	75	60	900

Fonte: Recomendação dos autores.

5 Aspectos da adubação do milho em sistemas de sucessão

Uma realidade cada vez mais comum na agricultura tropical é o cultivo de mais de uma safra por ano agrícola. Isso aumentou a produtividade por área cultivada e garantiu maior retorno e sustentabilidade do sistema produtivo. Com essa prática, uma segunda safra de milho é cultivada após a safra de verão, sendo o sistema soja-milho o mais comum no Brasil. Isso tem um impacto direto na disponibilidade de nutrientes, tornando as recomendações de adubação para a segunda safra de milho ligeiramente diferentes daquelas realizadas para a safra de verão.

Uma prática que tem sido realizada por alguns produtores é antecipação da aplicação dos fertilizantes necessários à cultura do milho, aplicando uma quantidade superior à demanda da cultura anterior de modo a gerar um “saldo” do nutriente no solo a ser utilizado pela cultura do milho segunda safra. Essa prática procura se encaixar no conceito de “adubação de sistema” e visa aumentar a operacionalidade e a velocidade da semeadura do milho, visto que um menor espaço da semeadora é ocupado com fertilizantes. Entretanto esse manejo de adubação exige certa cautela.

Produtores têm realizado adubações fosfatadas na totalidade na cultura da soja. Esta prática pode não ser eficiente pois o P disponível para o milho pode não ser a diferença simples entre o aplicado e o extraído pela soja. A determinação é complicada, uma vez que o ânion fosfato pode ser fixado no solo por óxidos de Fe e Al o que reduz sua disponibilidade na solução do solo para o milho. Em solos onde a fertilidade já foi consolidada, ou seja, onde a fixação de P por óxidos já foi estabilizada, a antecipação da adubação fosfatada do milho tem produzido resultados semelhantes à adubação no momento da semeadura. Entretanto em solos com baixos teores de P, recomenda-se manter a adubação fosfatada do milho no momento da semeadura. Além disso, deve-se atentar para o fato de que em situações onde a disponibilidade de P no solo seja muito baixa, a necessidade de se aplicar altas doses de fertilizantes fosfatados torna o cultivo do milho quase sempre antieconômico.

A adubação nitrogenada para o milho varia em função da cultura antecessora (gramínea ou leguminosa), especialmente em sistema de semeadura direta. Gramíneas deixam sobre o solo resíduos com elevada relação C:N. Para decomposição desses resíduos, os microrganismos do solo demandam N da solução do solo, diminuindo a disponibilidade de N para o milho, o que demanda uma compensação através de adubação nitrogenada. Por outro lado, quando o milho é cultivado após leguminosas, há possibilidade de significativa redução da adubação nitrogenada, devido a rápida

mineralização dos resíduos vegetais com elevado teor de N (Amado *et al.*, 2002). No caso do milho segunda safra outros fatores importantes devem ser considerados, tais como a ocorrência de estiagens (em menores latitudes) e baixas temperaturas (em latitudes maiores). A baixa umidade e baixa temperatura reduzem a mineralização da MOS, diminuindo a disponibilização de N dos resíduos culturais para o milho. Tais condições climáticas também limitam o potencial produtivo do milho segunda safra, diminuindo a demanda por nutrientes.

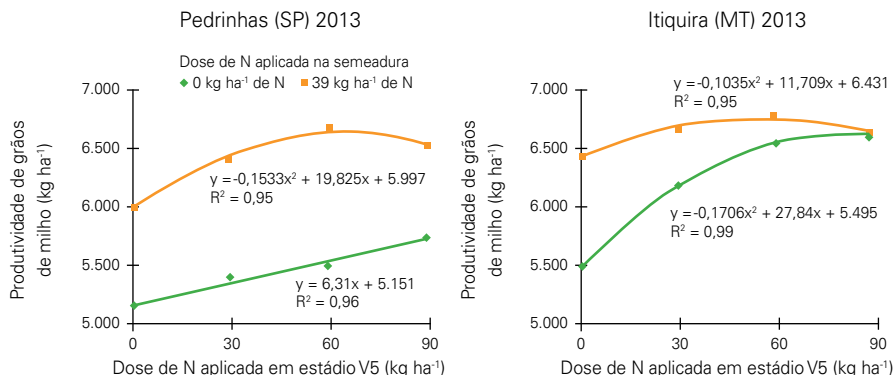


Figura 9. Resposta do milho segunda safra 2B587Hx à adubação nitrogenada de cobertura, em áreas com e sem adubação nitrogenada de semeadura.

Fonte: Adaptado de Duarte (2015).

Independentemente das condições de clima ou cultura antecessora, a necessidade de se realizar adubação nitrogenada de semeadura no milho segunda safra é indiscutível. Como demonstrado por Duarte (2015) a retirada da adubação nitrogenada da semeadura pode demandar o dobro de fertilizante para obtenção de produtividade semelhante àquela obtida quando o N é aplicado na semeadura, isso quando não compromete irreversivelmente a produtividade do milho (Fig. 9).

Quando o milho segunda safra é cultivado em áreas tendo a soja como cultura antecessora (a grande maioria dos casos), a fixação biológica de N pela cultura da soja deixa de 35 a 45 kg ha⁻¹ de N residual no solo. Isso somado a cerca de 60 kg ha⁻¹ de N disponibilizados pela mineralização da matéria orgânica do solo (vide item 4.2) resulta num fornecimento de cerca de 100 kg ha⁻¹ de N para a cultura do milho segunda safra em sucessão à soja. Considerando produtividades médias de grãos de 4.500 a 6.000 kg ha⁻¹ para o milho segunda safra (Roscoe e Miranda, 2013), entre 120 e 150 kg ha⁻¹ de N são extraídos do solo pelo milho segunda safra. Nessas condições, a recomendação seria aplicar de 20 a 50 kg ha⁻¹ de N durante a semeadura.

Para produtividades de milho segunda safra acima de 6 t ha⁻¹, é fundamental complementar a adubação de semeadura com a aplicação de N em cobertura, em doses compatíveis com a produtividade esperada. Uma sugestão de adubação adaptada por Duarte *et al.* (2013) encontra-se na Tabela 19. Porém, quando se aplica cerca de 30 kg ha⁻¹ de N no sulco de semeadura do milho em sucessão à soja em solos argilosos, a frequência de resposta à adubação nitrogenada de cobertura é muito baixa, em áreas com produtividades esperadas abaixo de 6 t ha⁻¹. Nessas condições, Duarte *et al.* (2013), verificaram apenas 10% dos experimentos em áreas com produtividade igual ou inferior a 6 t ha⁻¹ apresentaram resposta e retorno econômico à aplicação de N em cobertura, enquanto em 60% dos experimentos com produtividades mais elevadas obteve-se lucro quando a adubação de semeadura foi complementada pela aplicação de N em cobertura (Fig. 10). Assim, adubação nitrogenada na semeadura do milho segunda safra é indispensável, porém a aplicação adicional de N em cobertura é recomendada apenas para áreas onde produtividades acima de 6 t ha⁻¹ são esperadas.

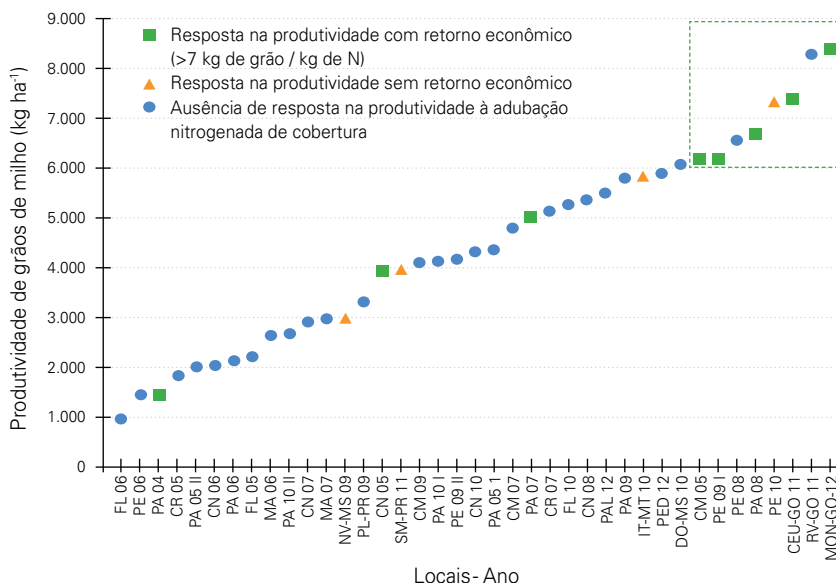


Figura 10. Resposta à aplicação de N em cobertura, na forma de nitrato de amônio, em 39 experimentos de milho segunda safra, nos estados produtores de milho do Brasil, no período de 2005 a 2012.

Fonte: Adaptado de Duarte *et al.* (2013).

Em áreas cultivadas há mais de cinco anos, o K é geralmente o macronutriente que apresenta os menores teores no solo devido à grande demanda da soja por este nutriente (Duarte *et al.*, 2013). Isso faz da adubação potássica de plantio uma prática fundamental em sistemas onde o milho é cultivado após a soja. Como o K é um nutriente acumulado em maior quantidade nas fases iniciais de desenvolvimento do milho, e existe baixa probabilidade de ocorrência de chuvas capazes lixiviar o K aplicado durante o período da segunda safra, deve-se evitar o parcelamento da adubação potássica nesse tipo de cultivo.

Haja vista o menor potencial produtivo do milho segunda safra, as quantidades de K recomendadas, logicamente, são menores do que para o milho verão (Tabela 16). Apesar do uso de menores doses reduzir os riscos de injúrias ao sistema radicular por efeito salino do K e N, deve-se aplicar no sulco de semeadura, em geral no máximo 50 kg ha⁻¹ de K₂O. Visando maximizar o rendimento da semeadura e/ou evitar os danos provocado por efeito salino, a aplicação do K pode ser feita juntamente com a do N o mais cedo possível, de maneira isolada ou em fórmulas NPK como 20-00-20. Porém, em aplicações tardias, na ausência de umidade adequada no solo para que o K aplicado na superfície movimente e seja absorvido pelas raízes, o efeito desta adubação sobre a produtividade da cultura pode ser pouco expressivo ou nulo (Duarte, 2015).

A Tabela 19 contém uma recomendação de adubação para o milho segunda safra com os macronutrientes primários, que são aqueles cuja recomendação possui mais peculiaridades entre o cultivo de milho verão e segunda safra. A aplicação de outros macros e micronutrientes pode proceder conforme as recomendações para o milho verão, baseadas na produtividade esperada e nos teores do elemento do solo.

Tabela 19. Recomendação de adubação para milho segunda safra.

Produtividade de grãos esperada (t ha ⁻¹)	N*			
	Classe de resposta			
	Baixa		Média	
	Semeadura	Cobertura	Semeadura	Cobertura
	kg ha ⁻¹ de N			
<4	30	0	30	0
4-6	40	0	30	20
6-8	30	20	30	40
	P			
	P-resina (mg dm ⁻³)			
	0-6	7-15	16-40	>40
	kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅			
<4	nr**	40	30	20
4-6	nr	50	40	30
6-8	nr	70	60	40
	K***			
	K trocável- Melich-1 (mmolc dm ⁻³)			
	0-0,7	0,8-1,5	1,6-3,0	>3,0
	kg K ₂ O ha ⁻¹			
<4	50	40	20	0
4-6	60	50	30	20
6-8	nr	60	40	30

* Baixa resposta ao N = milho após soja ou outra leguminosa no verão, em solos argilosos; média resposta ao N = milho após soja, em solos de textura média ou mais arenosos. ** nr = não recomendável realizar adubação com o nutriente porque é improvável a obtenção de alta produtividade. *** Não aplicar mais que 40 kg ha⁻¹ de K₂O no sulco de semeadura.

Fonte: Adaptado de Duarte *et al.* (2013).

6 Inoculação do milho com *Azospirillum*

Uma prática que vem ganhando cada vez mais popularidade na produção de milho é a inoculação das sementes com microrganismos fixadores de N. O uso de bactérias promotoras do crescimento de plantas, fungos micorrízicos, entre outros, pode desempenhar papel estratégico para garantir altas produtividades a baixo custo e com maior eficiência de uso de fertilizantes. O processo de fixação biológica de N em gramíneas ocorre por meio de bactérias diazotróficas. Especificamente para a cultura do milho, a *Azospirillum brasilense* é uma das bactérias que vem proporcionando resultados positivos (Hungria, 2011; Rosa, 2017).

Bactérias do gênero *Azospirillum*, estimulam um aumento de densidade e comprimento dos pelos radiculares, e da taxa de aparecimento de raízes laterais. Isso aumenta a área superficial radicular e potencializa utilização de nutrientes resultando em melhor desenvolvimento das plantas e maior produtividade da cultura. A inoculação com *A. brasilense* promove maior acúmulo de matéria seca, maior extração de nutrientes e maior produtividade de grãos na cultura do milho (Rosa, 2017).

Trabalhos de longa duração desenvolvidos por Okon e Labandera-Gonzalez (1994) evidenciaram que, em 20 anos de condução dos experimentos, o uso de *A. brasilense* e *A. lipoferum* em sementes gerou resultados positivos em 60-70% dos casos, propiciando incrementos na produção de grãos de 5-30%. Em estudos mais recentes, Hungria (2011) relata incremento médio de 24-30% na produtividade de grãos de milho quando inoculados com *A. brasilense* em relação ao tratamento controle que não recebeu adubação nitrogenada de cobertura. No entanto nas mesmas condições, a adubação nitrogenada convencional promoveu aumentos de 38-43% na produção de grãos do milho. Isso evidencia que a prática da inoculação de sementes do milho com *Azospirillum* spp é uma boa fonte alternativa de N para melhorar a produtividade da cultura. No entanto, a inoculação por si só é uma prática mais adequada para sistemas com baixo aporte de insumos, não devendo ser tomada como única fonte de N para o milho.

Os produtos comerciais contendo *Azospirillum* spp podem ser encontrados em forma de pó (baseados em turfa) ou em forma líquida, com protetores celulares que mantêm a viabilidade das bactérias ao longo de vários meses (Fancelli, 2010; Hungria, 2011).

7 Sistema Santa Fé: integração milho/braquiária

O sistema Santa Fé de intercultivo permite o uso intensivo de áreas agrícolas com redução nos custos de produção. Esse sistema consiste no cultivo intercalar de forrageiras tropicais, principalmente as do gênero *Brachiaria*, que ficam estabelecidas na área após a colheita do milho. Essa prática proporciona o aproveitamento, durante todo o ano, das terras cultivadas com lavouras anuais de grãos na safra de verão, além de garantir todos os benefícios da rotação de culturas, como manutenção de cobertura no solo e melhoria na sua estrutura, controle de erosão, reciclagem de nutrientes, aumento do C orgânico do solo, e redução de pragas, doenças e plantas espontâneas.

Os principais objetivos do sistema Santa Fé são a produção forrageira para a entressafra e palhada para o sistema semeadura direta. O sistema Santa Fé apresenta grandes vantagens, pois não altera o cronograma de atividades do produtor, é de baixo custo e não exige equipamentos especiais para sua implantação, sendo o consórcio estabelecido anualmente, simultaneamente à semeadura do milho (Kluthcouski *et al.*, 2000).



Figura. 11. Sistema Santa Fé de consórcio milho e *Brachiaria*.

Fonte: cortesia de Rodrigo Estevam Munhoz de Almeida.

Quando a braquiária é semeada entre as fileiras de milho, a eficiência de absorção de fertilizantes pelo milho aumenta de 13% para 21%; isso ocorre porque as raízes da braquiária secretam uma substância chamada braquilactona (Crusciol, comunicação pessoal), que é capaz de reduzir a nitrificação do amônio, aumentando sua relação com o nitrato do solo, que é um íon que requer maior gasto energético da planta para sua

absorção. Com o aumento da relação amônio:nitrato no solo ocorre uma acidificação próximo a rizosfera, favorecendo a disponibilidade de micronutrientes metálicos. O aumento da quantidade de matéria orgânica pela biomassa da *Brachiaria* propicia um acréscimo da atividade microbiológica que pode favorecer a solubilização de formas menos solúveis de P, aumentando a disponibilidade deste nutriente para as plantas.

Outro benefício da utilização do sistema Santa Fé é sua habilidade de reciclagem do K aplicado, o que é muito importante para a nutrição do milho e para evitar perdas de K por lixiviação. Garcia *et al.* (2008) investigaram as dinâmicas do K no sistema solo-palha-planta em sistemas onde o milho foi cultivado solteiro ou consorciado com *Brachiaria brizantha* e verificaram que o cultivo consorciado de milho com *Brachiaria* foi mais efetivo em reciclar o K e aumentar os teores de K trocável nas camadas superficiais do solo. Os autores concluíram que a *Brachiaria* foi capaz de acessar e absorver formas não trocáveis de K do solo, e que este K foi lavado dos resíduos da braquiária após a dessecação, tornando-se mais disponível para ser utilizado pelo milho.

8 Referências

- Alves, V.M.C., C.A. Vasconcellos, F.M. Freire, G.V.E. Pitta, G.E. França, A. Rodrigues Filho, J.M. Araújo, J.R. Vieira, e J.E. Loureiro. 1999. Milho. *In: Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a aproximação*. Ribeiro, A.C., P.T.G. Guimarães, e V.H. Alvarez, editores. CFSEMG, Viçosa, MG. p. 314-316.
- Alvarez, V.H., R.F. Novais, N.F. Barros, R.B. Cantarutti, e A.S. Lopes. 1999. Interpretação dos resultados das análises de solos. *In: Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a aproximação*. Ribeiro, A.C., P.T.G. Guimarães, e V.H. Alvarez, editores. CFSEMG, Viçosa, MG. p. 25-32.
- Amado, T.J.C, J. Mielniczuk, e C. Aita. 2002. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:241-248.
- Asher, C.J. 1991. Beneficial elements, functional nutrients, and possible new essential elements. *In: Micronutrients in agriculture*. 2a ed. Book Series 4. J.J. Mortvedt, editor. SSSA, Madison, WI. p. 703-723.
- Bender, R.R., J.W. Haegele, M.L. Ruffo, e F.E. Below. 2013. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. *Agron. J.* 105:161-170.
- Bowen, J.E. 1969. Absorption of copper, zinc, and manganese by sugarcane leaf tissue. *Plant Physiol.* 44: 255-261.
- Büll, L.T. 1993. Nutrição mineral do milho. *In: Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade*. Büll, L.T, e H. Cantarella, editores. Potafós, Piracicaba, SP. p. 63-145
- Caires, E.F., M.T. Kusman, G. Barth, F.J. Garbuio, e J.M. Padilha. 2004. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. *R. Bras. Ci. Solo*, 28(1):125-136.
- Campo, R.J., e M. Hungria. 2000. Compatibilidade de uso de inoculantes e fungicidas no tratamento de sementes de soja. Circular técnica 26. Embrapa Soja, Londrina, PR.
- Catani, R.A., e J.R. Gallo. 1955. Avaliação da exigência de calcário dos solos do Estado de São Paulo mediante correlação entre pH e a porcentagem de saturação de bases. *Revista de Agricultura*, 30:49-60.

- Coelho, A.M. 2005. O potássio na cultura do milho. *In*: Potássio na agricultura brasileira. Yamada, T., and T.L. Roberts. Potafós, Piracicaba p. 613-658. Comissão de Fertilidade do Solo – RS/SC. 1994. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 3a ed. SBCS, Passo Fundo, RS.
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). 2017. Custos de produção - culturas de verão. CONAB. <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1554&t=2> (acessado em 28 Jan. 2018).
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). 2018. Safra brasileira de grãos. CONAB. https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/22835_a4e21f191899c30a7c7c4abf4ac59979 (acessado em 20 Nov. 2018).
- Dalla Nora, D., T.J.C. Amado, R.P. Bortolotto, A.O. Ferreira, A., C. Keller, e J. Kunz 2014. Alterações químicas do solo e produtividade do milho com aplicação de gesso combinado com calcário. *Magistra*, 26:1-10.
- Dechen, R.A., e G.R. Nachtigall. 2006. Micronutrientes. *In*: Nutrição mineral de plantas. M.S. Fernandes, SBCS, Viçosa, MG. 2006. p. 327-354.
- Duarte, A.P. 2015. Milho safrinha se consagra se caracteriza um sistema peculiar de produção. *Visão agrícola*, 13:78-82.
- Duarte, A.P., e C. Kappes. 2015. Evolução dos sistemas de cultivo de milho no Brasil. *Informações Agronômicas*, 152:15-18.
- Duarte, A.P., C.H. Kurihara, e H. Cantarella. 2013. Adubação de milho safrinha em consórcio com braquiária. *In*: Consórcio milho-braquiária. G. Ceccon, editor. Embrapa, Brasília, D.F p. 115-144
- Fancelli, A.L. 2010. Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes na cultura do milho. *Informações Agronômicas*, 131. IPNI, Piracicaba, SP.
- Fancelli, A.L., and Dourado-Neto D. 2000. Produção de Milho. Agropecuária, Guaíba, RS.
- Fancelli, A.L. 1994. Milho e feijão: Elementos para manejo em agricultura irrigada. ESALQ/USP. Piracicaba, SP.
- Fancelli. 2007. Data not published- adapted from various authors.

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2020. FAOSTAT Database. Rome, Italy. Latest update: 15/6/2020. (acessado em 17/6/2020. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>).
- Garcia, R.A., C.A.C. Crusciol, J.C. Calonego, and C.A. Rosolem. 2008. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. *Europ. J. Agronomy* 28:579-585.
- Gott, R.M., L.A.D. Aquino, A.M. Carvalho, L.P. Santos, P.H. Nunes, e B.S. Coelho. 2014. Diagnostic index for interpretation of foliar analysis of corn. *Rev. bras. eng. agric. ambient.*, 18(11):1110-1115.
- Hungria, M. 2011. Inoculação com *Azospirillum brasilense*: inovação em rendimento a baixo custo. Documentos, 325. Embrapa soja, Londrina, PR.
- Jones, J.B. Jr. 1970. Distribution of 15 elements in corn leaves. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 1:27-34.
- Kluthcouski, J., T. Cobucci, H. Aida, L.P. Yokoyama, I.P. Oliveira, J.D.S. Costa, J.G. Silva, L. Vilela, A.O. Barcellos, and C.D.U Magnabosco. 2000. Sistema Santa Fé – Tecnologia Embrapa: integração lavoura-pecuária pelo consórcio de culturas anuais com forrageiras, em áreas de lavoura, nos sistemas direto e convencional. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO.
- Loganathan, P. 1987. Soil quality considerations in the selection of sites for aquaculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Magalhães, P.C., e F.O.M. Durães. 2006. Fisiologia da produção de milho. Circular técnica 76. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.
- Malavolta, E. 1979. ABC da adubação. 4a ed. Ceres, São Paulo, 256p.
- Malavolta, E. 2006. Manual de nutrição mineral de plantas. Ceres, São Paulo, SP.
- Malavolta, E., G.C. Vitti, e S.A. Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2a ed. Potafós, Piracicaba, SP.
- Malavolta, E. and J.P. Dantas. 1987. Nutrição e adubação do milho. *In*: Melhoramento e produção de milho. E. Paterniani, e G.D. Viegas. 2a ed. Fundação Cargill, Campinas, SP. p. 541-593.
- Marschner, H. 2012. Mineral nutrition of higher plants. 3a ed. Academic press, London.

- Martinez, H.E.P., J.G Carvalho, e R.B Souza. 1999. Diagnose foliar. *In: Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a aproximação.* Ribeiro, A.C., P.T.G. Guimarães, and V.H. Alvarez, editores. CFSEMG, Viçosa, MG. p. 143-168.
- Meurer, E.J. 2006. Potássio. *In: Nutrição mineral de plantas.* Fernandes, M.S., editor. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. p. 281-298.
- Moreira, S.G., J.C. Kiehl, L.I. Prochnow, e V. Pauletti, 2001. Calagem em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de milho e soja. *R. Bras. Ci. Solo* 25:71-81.
- Okon Y., e C. Labandera-González. 1994. Agronomic applications of *Azospirillum*: an evaluation of 20 years of worldwide field inoculation. *Soil Biol Biochem.* 26:1591-1601.
- PANNAR. 2016. Manage the growth stages of the maize plant. PANNAR. http://www.pannar.com/blog/detail/manage_the_growth_stages_of_the_maize_plant (acessado em 28 Jan. 2018).
- Raij, B. van, and H. Cantarella, J.A. Quaggio, e A.M.C. Furlani. 1996. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. *Boletim*, 100. 2a ed. IAC, Campinas, SP.
- Raij, B. van, H. Cantarella, e J.A. Quaggio 1996. Milho para grãos e silagem. *In: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo.* Raij, B. van, H. Cantarella, J.A. Quaggio, e A.M.C. Furlani, editores. *Boletim*, 100. 2a ed. IAC, Campinas, SP.
- Raij, B. van, P.R. Furlani, J.A. Quaggio, e A. Pettinelli Jr. 1998. Gesso na produção de cultivares de milho com tolerância diferencial a alumínio em três níveis de calagem. *R. Bras. Ci. Solo* 22:101-108.
- Raij, B. van. 2011. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. IPNI, Piracicaba, SP.
- Raven, J.A. 1980. Short- and long-distance transport of boric acid in plants. *New Physiol.*, 84:231-249.
- Resende, A.V., C.G.M. Silva, A.M. Gutiérrez, E.P. Simão, L.J.M. Guimarães, S.G Moreira, e E. Borghi. 2016. Indicadores de demanda de macro e micronutrientes por híbridos modernos de milho. Circular técnica 220. Embrapa milho e sorgo, Sete Lagoas, MG.

- Ritchie, S.W., J.J. Hanway, e G.O. Benson. 2003. Como a planta de milho se desenvolve. *Informações agrônômicas*, 103:1-19.
- Ritchey, K.D., F.R. Cox, E.Z. Galvão, e R.S. Yost. 1986. Disponibilidade de zinco para as culturas do milho, sorgo e soja em Latossolo Vermelho-escuro argiloso. *Pesq. Agropec. Bras.* 21(3):215-225.
- Rosa, P.A.L. 2017. Acúmulo de matéria seca, extração e exportação de nutrientes por híbridos de milho inoculados com *Azospirillum brasilense*. Master's diss. São Paulo State Univ., Ilha Solteira.
- Roscoe, R., e R.A.S. Miranda. 2013. Manejo da adubação do milho safrinha. *In: Tecnologia e produção: milho safrinha e culturas de inverno*. Roscoe, R., A.L.F. Lourenção, J.F.J. Grigolli, A.M. Melotto, C. Pitol e R.A.S. Miranda, editores. Fundação MS, Maracaju-MS. p. 15-37.
- Sans, L.M.A. and D.P. Guimarães. 2009. Zoneamento agrícola. *In: Cultivo do milho. Sistemas de produção 1*. 5a ed. Cruz, J.C., editor. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.
- Shuman, L.M. 1994. Mineral Nutrition. *In: Plant-environment interaction*. Wilkinson, R.E. editor. Marcel Dekker, NewYork, NY. p. 149-182.
- Sousa, D.M.G., E. Lobato, e T.A. Rein. 2006. Recomendação de adubação fosfatada com base na capacidade tampão de fósforo do solo para a região do Cerrado. *In: Proceedings of the 27 Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas*. Bonito, MS. 2006. Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS.
- Sousa, D.M.G., e E. Lobato. 2004. Cerrado: correção do solo e adubação. 2a ed. Embrapa Informação tecnológica, Brasília, DF.
- Stanford, G. e J.O. Legg. 1984. Nitrogen and yield potential. *In: Nitrogen in crop production*. Hauck, R.D., editor. ASA. p. 263-272.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2017. World Agricultural Production. USDA Foreign Agricultural Service. <https://www.fas.usda.gov/data/worldagricultural-production>. (accessed 28 Jan. 2018)
- Vilela, L., D.M.G. Souza, e J.E.D. Silva. 2004. Adubação potássica. *In: Cerrado: correção do solo e adubação* 2a ed. Sousa, D.M.G., e E. Lobato, editores. Embrapa Informação tecnológica, Brasília, DF.

- Vitti G.C., E. Lima, e F. Cicarone. 2006. Cálcio, magnésio e enxofre. *In: Nutrição mineral de plantas*. Fernandes, M.S., editor. SBCS, Viçosa, MG. p. 299-326.
- Vitti, G.C. 1989. Avaliação e interpretação do enxofre no solo e na planta. FUNEP, Jaboticabal, SP.
- Vitti, G.C., P.H.C. Luz, E. Malavolta, A.S. Dias, e C.G.E. Serrano. 2008. Uso do gesso em sistemas de produção agrícola. GAPE, Piracicaba, SP.
- Vitti, G.C., e J.L. Favarin. 1997. Nutrição e manejo químico do solo para a cultura do milho. *In: Tecnologia da produção de milho*. Fancelli, A.L. e R. Dourado Neto, coordinators. ESALQ, Piracicaba, SP.
- Vitti, G.C. e J.A. Mazza. 2002. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição de cana-de-açúcar. *Informações Agronômicas* 97:1-16.
- Williams, L.E., e A.J. Miller. 2001. Transporters responsible for the uptake and partitioning of nitrogenous solutes. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Molec. Biol.* 52:659-688.
- Woodruff, J. R., F.W. Moore, e H.L. Musen. 1987. Potassium, boron, nitrogen and lime effects on corn yield and ear leaf nutrient concentrations. *Agron. J.* 79:520-524.
- Zandoná, R.R., A.N. Beutler, G.M. Burg, C.F. Barreto, e M.R. Schmidt. 2015. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 45(2):128-137.

9 Apêndice

Sintomas visuais de deficiências nutricionais do milho



Foto 1. Sintomas de deficiência de nitrogênio.

Fotografia por Iowa State University Extension and Outreach Publication IPM42 (reimpresso em Fevereiro de 2012), John Sawyer, Departamento de Agronomia, Iowa State University.

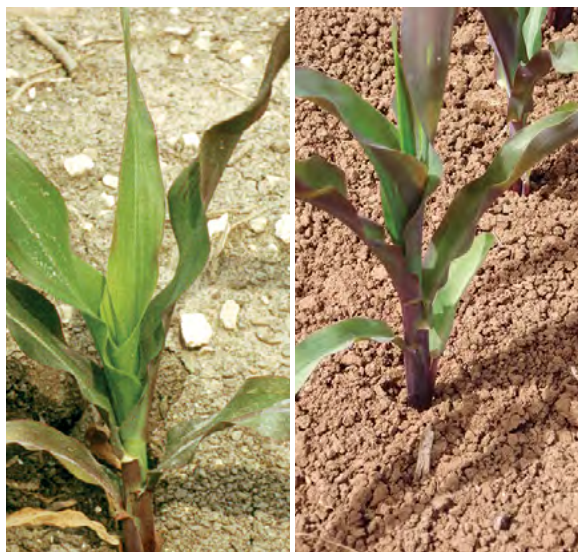


Foto 2. Sintomas de deficiência de fósforo.

Fotografia por Iowa State University Extension and Outreach Publication IPM42 (reimpresso em Fevereiro de 2012), John Sawyer, Departamento de Agronomia, Iowa State University. Fotografia (direita) por Yaron Bar (Israel).



Foto 3. Sintomas de deficiência de potássio.

Fotografia por Iowa State University Extension and Outreach Publication IPM42 (reimpresso em Fevereiro de 2012), John Sawyer, Departamento de Agronomia, Iowa State University.



Foto 4. Sintomas de deficiência de cálcio.

Fotografia por Iowa State University Extension and Outreach Publication IPM42 (reimpresso em Fevereiro de 2012), John Sawyer, Departamento de Agronomia, Iowa State University.



Foto 5. Sintomas de deficiência de magnésio.

Fotografia por Iowa State University Extension and Outreach Publication IPM42 (reimpresso em Fevereiro de 2012), John Sawyer, Departamento de Agronomia, Iowa State University.



Foto 6. Sintomas de deficiência de enxofre.

Fotografia por Iowa State University Extension and Outreach Publication IPM42 (reimpresso em Fevereiro de 2012), John Sawyer, Departamento de Agronomia, Iowa State University.



Foto 7. Sintomas de deficiência de manganês.

Fotografia por Iowa State University Extension and Outreach Publication IPM42 (reimpresso em Fevereiro de 2012), John Sawyer, Departamento de Agronomia, Iowa State University.



Foto 8. Sintomas de deficiência de zinco.

Fotografia por Iowa State University Extension and Outreach Publication IPM42 (reimpresso em Fevereiro de 2012), John Sawyer, Departamento de Agronomia, Iowa State University. Fotografia (centro) por Mateo Martinez Nicolas (México). Fotografia (direita) por Patrick Gesualdi Haim (Brasil).



Foto 9. Sintomas de deficiência de ferro.

Fotografia por Iowa State University Extension and Outreach Publication IPM42 (reimpresso em Fevereiro de 2012), John Sawyer, Departamento de Agronomia, Iowa State University.

