

6

Fertilidade do solo e a cultura do trigo no Brasil

Sirio Wiethölter

Introdução

O Brasil apresenta consumo anual de cerca de 10,6 milhões de toneladas de trigo. A área de cultivo em 2008 e 2009 foi 2,4 milhões de hectares e em 2010, 2,1 milhões de hectares. Nestas três safras, o rendimento médio nacional oscilou entre 1,8 t/ha a 2,5 t/ha e a produção variou entre 4 e 6 milhões de toneladas, representando cerca de 55% do consumo nacional. O trigo é cultivado, principalmente, no sul do país (Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina) e em outros seis estados (São Paulo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Bahia) e no Distrito Federal. Considerando que há diferenças importantes nas características de solo, de clima e de potencial de rendimento das diversas regiões de cultivo de trigo, as recomendações de adubação e de calagem são distintas nessas regiões. Dessa forma, objetiva-se, nesse capítulo, descrever os fundamentos das principais práticas relacionadas com o manejo da fertilidade do solo para a cultura do trigo, com o intuito de aperfeiçoar o uso eficiente de nutrientes no

sistema solo-planta em cada região. A base dos sistemas de recomendação de adubação e de calagem é a análise do solo, pois, sabendo-se a reserva química de nutrientes, pode-se indicar a demanda de fertilizante e de corretivo da acidez do solo, para propiciar adequada nutrição às plantas.

O solo constitui a base da agricultura e é o maior recurso natural disponível no planeta Terra. Por definição, solo é uma camada da crosta terrestre cuja espessura é determinada pela profundidade das raízes das plantas. Para fins de classificação, o limite inferior desta camada costuma ser estabelecido em 2 m (SOIL..., 2010). Ele é o meio de cultura para a produção da maioria dos alimentos e fibras. Sua composição, em termos de volume, é, em média, a seguinte: 50% de material sólido e 50% de poros ocupados por ar e por água. Do material sólido, cerca de 1% a 5% é constituído de substâncias orgânicas. O material mineral é formado essencialmente de três frações granulométricas: argila (< 0,002 mm), silte (0,002 mm a 0,05 mm) e diversas frações de areia (> 0,05 mm a 2 mm). As características físico-químicas da superfície dessas

partículas permitem o suprimento contínuo de nutrientes às plantas. É graças a um equilíbrio entre a adsorção dos íons na fase sólida do solo e a sua dissociação na fase líquida (a solução do solo) que o desenvolvimento de plantas é possível. A fase sólida é o principal reservatório de nutrientes, mas é da fase líquida que as raízes se abastecem. Portanto, o processo de disponibilidade de nutrientes envolve fenômenos físico-químicos de troca entre as fases sólida e líquida do solo. É por essa razão que os processos físicos e químicos, aos quais a fertilidade do solo está relacionada, são difíceis de serem previstos com precisão. Em adição, a análise química é uma avaliação do estado estático (do momento) do solo, mas o crescimento futuro de plantas nesse solo será um processo dinâmico, no qual os fluxos de materiais (nutriente, água e ar) e de energia variam continuamente. No entanto, a análise química do solo pode indicar parcialmente o que está acontecendo no solo e quais são, potencialmente, as probabilidades de haver suficiente disponibilidade de determinado nutriente. Em adição aos aspectos químicos do solo, os atributos físicos (aeração, densidade, capacidade de retenção de água, estabilidade de agregados, etc) e microbiológicos (taxa de decomposição da matéria orgânica e de resíduos culturais e a consequente liberação ou imobilização de N, S, P, etc), são determinantes da capacidade produtiva intrínseca do solo. Dessa forma, um solo é produtivo quando for capaz de gerar elevada quantidade de biomassa em cada safra, e os fatores que concorrem para isso são de diversas naturezas. Na prática, a análise laboratorial dos fatores físicos e microbiológicos é demo-

rada e sua relação com o desenvolvimento das plantas nem sempre é conhecida. Por conseguinte, o usual é realizar a análise química do solo, pois esta é rápida, tem custo baixo e o teor no solo, dos principais nutrientes, apresenta em geral boa correlação com o desenvolvimento das plantas. Ainda deve ser considerado que as plantas absorvem pequenas quantidades de nutrientes do solo. Plantas vivas, por exemplo, são compostas aproximadamente por 80% de água e 20% de matéria seca. Já a matéria seca é constituída de 95% de carbono (C)⁽¹⁾, oxigênio (O) e hidrogênio (H) e, somente 5% é formado pelos outros 13 elementos essenciais ao seu desenvolvimento, e que são absorvidos do solo pelas raízes. Dessa forma, somente 1% da massa das plantas vivas é constituído de elementos químicos absorvidos do solo, pois o carbono, o oxigênio e o hidrogênio são acumulados na planta pelo processo de fotossíntese⁽²⁾.

A fertilidade do solo

A fertilidade do solo conceitualmente representa o potencial de produção de plantas (DABBERT, 1994). Um solo pode ser quimicamente fértil, mas isso não assegura que ele seja produtivo. A melhor maneira de conhecer o nível de fertilidade de um solo é determinar a quantidade média de biomassa (grãos+palha, forragem, etc) produzida por unidade de área, em mais de uma safra, considerando que variações climáticas entre safras podem afetar muito os resultados. Para conhecer o grau de resposta do solo e das plantas ao aporte de fertilizante ou de corretivo de acidez, o melhor procedimento é conduzir um experimen-

⁽¹⁾ Plantas secas contêm cerca de 50% de carbono. Na matéria orgânica do solo, o teor de carbono é 58%.

⁽²⁾ Na fotossíntese, em que são formados os carboidratos $[H_2O + CO_2 + \text{energia solar} \rightarrow C(H_2O)_n + O_2]$, o O_2 liberado para a atmosfera provém da água e não do CO_2 .

to nesse local, mas isso é inviável para todas as lavouras. Com base em dados de rendimento de experimentos de adubação, e a calibração dos valores analíticos obtidos na análise química destes solos (interpretação agrônômica), pode-se inferir o estado atual de fertilidade de solos semelhantes aos usados nos experimentos. Esse é o procedimento mundialmente usado desde a década de 1940. Por ser de fácil execução e de baixo custo, a análise de solo, como instrumento indicador do grau de disponibilidade de nutrientes, consolidou-se no Brasil a partir da década de 1960. Ela é a melhor ferramenta para documentar e monitorar, ao longo do tempo, variações no estoque de nutrientes no solo, presentes na forma química disponível às plantas.

A acidez do solo

A acidez do solo pode ser representada por dois parâmetros químicos: acidez ativa (fator intensidade) e acidez potencial (fator quantidade). A acidez ativa constitui o pH da suspensão solo-água, na proporção 1:1 ou 1:2. Já a acidez potencial é representada pela acidez trocável (Al^{3+}) e acidez não trocável (H^0), provindas do conjunto de substâncias que podem liberar H^+ para a solução do solo. A acidez trocável é o H^+ adsorvido eletrostaticamente (geralmente menos de 5% da acidez trocável) e o Al^{3+} trocável, ambos deslocáveis por simples reações de troca eletrostática. Por isso, a acidez trocável é geralmente representada somente por Al^{3+} , que é extraído com uma solução de um sal neutro (KCl 1 mol/L), e o Al^{3+} é titulado como ácido, usando-se NaOH 0,015 mol/L. A acidez não trocável envolve adsorção específica de H e, portanto, ligações covalentes, cuja forma química é representada por H não dissociado (H^0). Mas, como a maioria dos íons de H do so-

lo não está dissociada (a parte dissociada chama-se acidez ativa e é medida pelo pH do solo), o solo como um todo apresenta comportamento semelhante ao de um ácido fraco (dissociação parcial de H, sendo o pH afetado apenas pela parte dissociada dos íons H^+), ou seja, o solo apresenta poder tampão (acidez potencial) em relação aos íons H. Dessa forma, em termos químicos, a concentração de Al representa simplesmente uma forma indireta de determinar a acidez do solo. Para a cultura do trigo, a acidez trocável é de muita importância, pois há cultivares tolerantes ao Al e outras que não sobrevivem em solo que apresenta Al solúvel, apresentando o sintoma do crestamento, cujo processo foi descrito no Brasil por Araújo (1948, 1949, 1951).

No solo há equilíbrio químico entre acidez ativa e acidez potencial. A acidez potencial torna-se ativa quando a acidez ativa é neutralizada e reações de troca de cátions trazem para a solução do solo a acidez antes tida como potencial. Como a maior parte do H do solo não está dissociada, essa acidez pode ser determinada pela adição de OH^- até o solo atingir determinado pH, como, por exemplo, 6. Dessa maneira, a quantidade de base necessária para neutralizar o H liberado com o aumento do pH (desfazendo ligações covalentes) é denominada acidez titulável ao pH desejado. A quantidade de base necessária para elevar em uma unidade o pH é definida como “poder tampão do solo”. Esta propriedade varia muito entre tipos de solo. A calagem, quando objetiva elevar o pH do solo a 6, representa, portanto, a quantidade de calcário necessária para neutralizar a acidez titulável a pH 6. Em virtude da coincidência numérica de a acidez equivalente a

1 meq/100 g de solo⁽³⁾ (= 1 cmol_c/dm³ de solo se a densidade for igual a 1 g/cm³) corresponder à quantidade de base química contida em 1 t de CaCO₃/ha (camada 0-20 cm), a necessidade de calcário para elevar o pH do solo a 6, em t/ha, é numericamente igual à quantidade de acidez titulável a pH 6, em meq/100 g de solo. Na prática, a acidez potencial é definida integralmente pela determinação de H⁺+Al³⁺, sendo as seguintes soluções extratoras as mais empregadas: acetato de cálcio 1 mol/L a pH 7 e a solução SMP⁽⁴⁾ tamponada a pH 7,5 (WIETHÖLTER, 2000).

As causas da acidez do solo

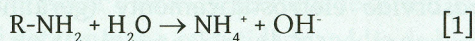
As principais causas químicas da geração de acidez (H⁺) no solo são: a água da chuva, a decomposição de materiais orgânicos (matéria orgânica nativa do solo, resíduos culturais e adubos orgânicos), a adição de fertilizantes nitrogenados (Tabela 8) e a lixiviação e exportação pelas culturas de cátions de reação básica (Ca, Mg e K). A contribuição de H⁺ pela água da chuva decorre da formação natural de ácido carbônico (H₂CO₃) no momento da passagem da água pela atmosfera, que contém 0,033% de CO₂ (o ar seco apresenta densidade igual a 1,29 kg/m³). Na dissociação do H₂CO₃ resulta um pH 5,65 a 25 °C (STUMM; MORGAN, 1981), ou seja, uma concentração de H⁺ = 2,24x10⁻⁶ mol/L. A presença de compostos ácidos (HNO₃ e o H₂SO₄) de origem antropogênica na atmosfera causa chuva ácida em regiões de intensa atividade industrial. Porém, em geral, a quantidade de acidez gerada por este processo ao longo de um ano pode ser corrigida com poucos quilogramas de calcário por hectare. Já a decomposição de qualquer material orgânico (matéria orgânica do solo,

palha, adubos orgânicos, etc) e a adição de fertilizantes nitrogenados minerais são importantes fontes de acidez, pois para cada átomo de N convertido em NO₂⁻ formam-se 2 H⁺ (Equação [2]). A contribuição da lixiviação de cátions básicos na geração de acidez é um fator complementar, pois depende diretamente da quantidade de ânions (NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻) presentes na solução do solo e da quantidade de água que permeia o solo. Já a remoção da palha de trigo da lavoura para a produção de feno, o pastejo de trigo, ou mesmo a silagem de qualquer planta, aumenta a exportação de cátions de reação básica e é, portanto, fator gerador de acidez.

Decomposição de substâncias orgânicas

A viabilidade de manter o sistema plantio direto depende da contínua presença de palha na superfície do solo e de raízes em decomposição. Sem esses ingredientes, o solo paulatinamente sofre um processo de adensamento, ao ponto de impedir parcialmente o desenvolvimento de raízes.

Primeiramente, as substâncias orgânicas passam pelo processo de aminação, em que são formados compostos do tipo R-NH₂. A etapa seguinte é a amonificação, ou seja, a formação de amônio (NH₄⁺), conforme indicado na Equação [1]:

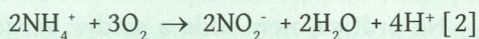


É importante observar que, para cada átomo de N convertido, forma-se 1 íon OH⁻, ou seja, o processo tem reação básica. Em seguida, o NH₄⁺ é transformado em nitrito (NO₂⁻) (Equação [2]) e, para cada 2 átomos de N, formam-se 4 íons H⁺ (prótons). Dessa forma, tem-se um saldo de 2 H⁺ para cada átomo de N transformado. Portanto, a de-

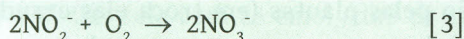
⁽³⁾ meq = miliequivalente = mmol_c = milimol de carga.

⁽⁴⁾ A sigla provém das iniciais dos autores Shoemaker, McLean e Pratt (SHOEMAKER et al., 1961).

composição de compostos orgânicos é uma reação ácida.



Por último, o nitrito passa para um estágio de oxidação mais elevado e é transformado em nitrato (NO_3^-) (Equação [3]),



cujo processo é neutro, ou seja, não afeta o pH.

Para exemplificar, admita-se que 10 t de palha de milho/ha contendo 0,5% de N (50 kg N/ha) estejam sendo decompostos. A acidez resultante (H^+) corresponderá a uma equivalência química básica (OH^-) contida em 357 kg CaCO_3 /ha.

Em síntese,

$$1 \text{ kg N}_{\text{palha}} = 7,14 \text{ kg CaCO}_3 \quad [4]$$

ou,

$$10 \text{ t de palha/ha} = 357 \text{ kg CaCO}_3/\text{ha} \quad [5]$$

Transformação química de fertilizantes nitrogenados

A ureia [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] é o fertilizante nitrogenado mais empregado na cultura do trigo no Brasil. Portanto, a sua contribuição, em termos de geração de acidez, tem certa importância para os solos cultivados com trigo.

Raciocínio semelhante ao empregado nas equações acima pode ser empregado para calcular a acidez gerada na transformação da ureia, verificando-se que

$$1 \text{ kg N}_{\text{ureia}} = 3,57 \text{ kg CaCO}_3 \quad [6]$$

ou

$$100 \text{ kg N/ha} = 357 \text{ kg CaCO}_3/\text{ha} \quad [7]$$

A acidez gerada por 100 kg de N provindo do sulfato de amônio [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$] é

540 kg de CaCO_3 (Tabela 8) e do nitrato de amônio (NH_4NO_3) é equivalente ao da ureia, pois este tem 1 átomo de N na forma de NH_4 em cada molécula, gerando 2H^+ por molécula.

Se a mineralização de N da MO nativa do solo for igual à adição de N à MO (estado quase contínuo), ter-se-á, para o somatório dos dois processos acima (10 t de palha e 100 kg N), uma demanda teórica de cerca de 700 kg de CaCO_3 /ha/ano. Todavia, se no sistema plantio direto houver acúmulo de MO ou, em outras palavras, acúmulo de N, haverá menor geração de acidez do que o acima estimado. Essa talvez seja a razão teórica por que se tem observado menor taxa de retorno da acidez ao solo no sistema plantio direto do que no sistema convencional de preparo do solo, resultando numa demanda de cerca de 400 kg a 500 kg CaCO_3 /ha/ano. Porém, essa hipótese é válida somente se ocorrer aumento do teor de MO no solo, ou seja, quando houver aumento do estoque de N no solo. De outra parte, a quantidade adequada de corretivo (necessária para corrigir a acidez) é altamente dependente das características químicas do solo e do sistema de cultivo. Por essa razão, a análise do solo é o único procedimento seguro para determinar a dosagem de corretivo da acidez.

Lixiviação de cátions básicos

Para corroborar com as estimativas teóricas acima, pode-se citar, como exemplo, a medição da lixiviação de Ca e de Mg em lisímetros de drenagem de 0,9 m² e de 30 cm de espessura, que não permitiam movimento ascendente de água de camada além dos 30 cm, usando um Latossolo Vermelho Distrófico típico com cerca de 50% de argila (WIETHÖLTER, 1992). A lixiviação total de cátions, decorrente de 4.336 mm de chuva e

475 mm de irrigação, durante 778 dias, em 68 coletas de água, foi a seguinte, em kg/ha: Ca 540, Mg 92, K 32, Na 14 e N-NH_4^+ 3. A perda total de N na forma de NO_3^- foi 119 kg/ha. Ao expressar quimicamente o Ca e o Mg lixiviados em CaCO_3 puro (equivalência química de base), obteve-se um consumo de calcário de 810 kg/ha/ano. Deve ser lembrado que a lixiviação de cátions é uma consequência da presença de ânions, pois para que um cátion possa ser lixiviado é necessário que haja um ânion que funcione como coíon, ou ânion acompanhante, pois nenhum sistema químico natural tem sobra de cargas - do contrário formar-se-ia um potencial elétrico. Sem considerar os cátions adsorvidos na fase sólida do solo, cátions e ânions estão presentes na solução do solo em quantidades estequiometricamente equivalentes. Em geral, o ânion predominante é o nitrato e, para cada íon nitrato formado, 2 H^+ são gerados (equações [2] e [3]). Os outros ânions que podem ter certa importância nesse processo são o cloreto (Cl^-) e o sulfato (SO_4^{2-}). Em solo semelhante ao acima citado e sob sistema plantio direto consolidado há 15 anos, observou-se um consumo anual de calcário da ordem de 400 kg/ha a 500 kg/ha (PRNT 100%).

O transporte de Ca e de Mg, provindos de calcário aplicado na superfície do solo, pode ocorrer também em função da presença de ânions orgânicos (MIYAZAWA et al., 2000). Pavan (1999) demonstrou que há diferenças entre espécies vegetais (aveia > nabo > centeio > milheto > tremoço > ervilhaca > mucuna > crotalária) em formar prováveis ligantes orgânicos com os quais o Ca e o Mg poderiam se ligar, transportando-os para mais de 30 cm de profundidade. É interessante observar que a sequência de culturas acima indica que as espécies leguminosas teriam menor capacidade de for-

mar as substâncias ligantes. Já a palha de trigo não afetou a mobilidade de Ca no perfil do solo.

Na prática, nem toda a acidez gerada diretamente pela transformação do NH_4^+ em NO_2^- necessita ser corrigida, pois há adsorção de NH_4^+ pelo solo (principalmente em solos ácidos), e também sua absorção pelas plantas (em troca elas exsudam H^+), bem como sempre ocorre alguma perda de N por desnitrificação (N_2O , N_2) e lixiviação. Se assim for, e conforme a Equação [1], o processo é alcalino e não ácido. De outra parte, a absorção de NO_3^- pelas plantas faz as raízes exsudarem HCO_3^- e OH^- (para manter o equilíbrio de cargas químicas na planta), reduzindo, portanto, a acidez. O mesmo equilíbrio de cargas ocorre quando há absorção de cátions em quantidade maior que de ânions (comum em leguminosa ou *Fabaceae*), resultando em exsudação de prótons (H^+), ou seja, gerando acidez. Segundo Barber (1998), este processo poderia aumentar a eficiência de absorção de P na rizosfera de plantas leguminosas e, talvez por isso, as leguminosas sejam menos exigentes em P do que as plantas da família das poáceas (*Poaceae*) (anteriormente denominadas gramíneas). O trigo, em especial, necessita de um bom suprimento de P nos primeiros estádios de desenvolvimento e, mesmo em solos bem supridos nesse nutriente, uma pequena aplicação de P na semeadura em geral traz algum benefício à planta, inclusive em termos de tolerância a frio. A absorção de P é estimulada na presença de N na forma de NH_4^+ (JONES et al., 1991).

Capacidade de troca de cátions do solo

O solo é dotado de cargas elétricas negativas e positivas (em menor quantidade) e, por isso, é capaz de adsorver cátions

e ânions. A ordem decrescente de energia de retenção dos principais cátions presentes no solo é a seguinte: Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ e Na^+ . Quanto maior a valência (menor é o raio iônico do cátion, porque perdeu mais elétrons), maior é a preferência do solo em adsorver esse cátion. Por essa razão, o Al é mais fortemente retido que o K. Um solo com $15 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ de capacidade de troca de cátions (CTC) poderá apresentar $6 \text{ cmol}_c \text{ Ca}/\text{dm}^3$, $3,6 \text{ cmol}_c \text{ Mg}/\text{dm}^3$, $5,1 \text{ cmol}_c \text{ H+Al}/\text{dm}^3$ e $0,3 \text{ cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3$. Esse solo terá, no seu complexo de troca, a seguinte porcentagem de saturação: 40% de Ca, 24% de Mg, 34% de H+Al e 2% de K. A porcentagem de saturação por cátions de reação básica (Ca, Mg e K) será 66%.

É com base na CTC que se conhece o potencial de armazenamento de cátions de um solo. Quanto maior a CTC, mais fértil, portanto, o solo, conquanto os nutrientes absorvidos pelas plantas na forma aniônica (N, P, S) e o pH estejam presentes em níveis satisfatórios. Um aspecto de grande importância no manejo da fertilidade do solo é a presença de matéria orgânica (MO), pois a capacidade de reter cátions, por unidade de volume, é muito superior na MO do que em partículas minerais de solo. Assim, quanto maior o teor de MO, melhores são as características físico-químicas do solo em termos de armazenamento de nutrien-

tes, mormente de N, mas também de P e de S, pois boa parte das frações lábeis desses nutrientes está contida na MO. Além disso, a MO, por apresentar elevada capacidade de reter água, também contribui com vários fatores físicos e biológicos favoráveis ao desenvolvimento das plantas.

Relação entre cátions no solo

Uma forma de analisar a importância da relação entre cátions trocáveis pode ser observada nas tabelas 1 e 2. No caso de K, por exemplo, a expressão $\text{K}/(\text{Ca}+\text{Mg})^{1/2}$ (CASTRO; MENEGUELLI, 1989) permite diagnosticar se a relação entre K e Ca+Mg poderia justificar o aporte de K ao solo. O cálculo da dose de K_2O a aplicar ao solo, para tornar a relação igual a 0,13 (nível crítico), pode ser ilustrado pela seguinte equação (WIETHÖLTER, 1997):

$$\text{kg K}_2\text{O}/\text{ha} = 391b[0,13(\text{Ca}+\text{Mg})^{1/2} - \text{K}] \quad [8]$$

sendo b igual à capacidade tampão do solo (kg de K_2O a aplicar por hectare para aumentar na análise 1 mg de K/ dm^3 de solo, Tabela 5) e Ca, Mg e K são expressos em $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ (mg K/ dm^3 de solo dividido por 391 = $\text{cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3$). É interessante observar na Equação [8] que a quantidade de K_2O é diretamente proporcional à capacidade

Tabela 1. Interpretação de valores de pH e saturação por bases no solo.

Interpretação	pH	Ca	Mg	K	Bases	Al	H+Al	CTC ⁽¹⁾ a pH 7	$\text{K}/(\text{Ca}+\text{Mg})^{1/2}$
		----- % -----					----- $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ -----		$(\text{cmol}_c/\text{dm}^3)/(\text{cmol}_c/\text{dm}^3)^{1/2}$
Muito baixo	< 5,0	< 20	< 5	< 0,5	< 25	< 5 ⁽²⁾	< 2	< 5	-
Baixo	5,1 - 5,5	20 - 40	5 - 10	0,5 - 1,0	26 - 50	5 - 10	2 - 4	5 - 10	< 0,10
Médio	5,6 - 6,0	40 - 60	10 - 15	1,0 - 2,0	51 - 70	11 - 20	4 - 6	11 - 20	0,10 - 0,15
Alto	> 6,0	> 60	> 15	> 2,0	> 70	> 20	> 6	> 20	> 0,15

⁽¹⁾Ca+Mg+K+H+Al, expressos em $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$.
⁽²⁾Valor ideal; valor acima de 10% é considerado prejudicial para trigo e outras culturas.

Tabela 2. Interpretação da relação entre cátions trocáveis do solo.

Relação	Amplitude observada	Relação teórica ideal
Ca/Mg	1 - 5	4
Ca/K	10 - 30	20
Mg/K	3 - 7	5

tampão do solo e ao teor de Ca e de Mg no solo e inversamente proporcional ao teor de K que o solo contém. Dessa forma, quanto maior a CTC, maior o teor de K no solo necessário para atingir o nível de suficiência, algo contemplado na Tabela 5. A dose de K_2O é zero, ou seja, nenhuma resposta da planta é esperada, quando o teor de K no solo, em $cmol_c/dm^3$, é igual a $0,13(Ca+Mg)^{1/2}$. Isso aconteceria, por exemplo, quando o teor de K for $100\text{ mg}/dm^3$ ($= 0,26\text{ cmol}_c\text{ K}/dm^3$) e o teor de $Ca+Mg$ for igual a $4\text{ cmol}_c/dm^3$, pois $0,13(Ca+Mg)^{1/2} = 0,26$. Ainda deve ser levado em consideração que a expressão $K/(Ca+Mg)^{1/2}$ modifica-se numericamente no transcorrer do processo de absorção desses nutrientes, pois o teor de K trocável na rizosfera sofre depleção e os teores de Ca e de Mg, trazidos pelo fluxo de massa, tem seus teores significativamente aumentados, precipitando-se na rizosfera na forma de $CaCO_3$ e $MgCO_3$ (BARBER, 1995). Dessa forma, a Equação [8] auxilia na compreensão teórica do processo. Na prática, porém, o mais simples e adequado para suprir Ca, Mg e K ao solo é seguir as indicações das tabelas 3, 5, 6 e 7.

Pelas noções acima, denota-se quão importante é o entendimento dos princípios químicos cujos processos são observados na natureza do solo. Com isso, o manejo da adubação, baseado em análise de solo, pode ser conduzido de maneira racional e em bases científicas.

Formação de matéria orgânica no solo

Por serem acumulados em alta concentração nas plantas e também na MO do solo, o N e o C são elementos sobre os quais o sistema plantio direto pode estabelecer influência ao longo do tempo. Como exemplo, e para avaliar o tempo necessário para atingir certo aumento de MO no solo, pressupõe-se que o teor de C na palha e raízes de uma planta seja 50% e que a taxa de conversão de palha em MO é 20%, ou seja, 20% do C da planta ficará retido no solo para formar MO nova e o restante será devolvido à atmosfera, na forma de CO_2 . Pergunta-se: qual a quantidade de palha necessária para incorporar 1 t C/ha/ano? A resposta é a seguinte: $palha/ano = 1/0,5/0,2 = 10\text{ t}/ha/ano$ ($= 1\text{ kg palha}/m^2$). E, se o índice de colheita for 50%, será necessário colher 10 t de grãos/ha/ano. Se 1% de MO numa camada de 20 cm corresponde a 20 t de MO/ha e se o teor de C é igual ao teor de MO dividido por 1,724 (fator van Bemelen), então, para adicionar 1% de MO ao solo, na camada de 20 cm, serão necessários 12 anos.

Se a relação C/N da MO é igual a 10 e se uma tonelada de C é adicionada ao solo por ano e por hectare, então haverá necessidade de imobilizar cerca de 100 kg N/ha/ano. Este N poderá ser aportado ao solo pela fixação biológica simbiótica realizada por plantas leguminosas e pela fixação de N por microorganismos livres ou, ainda, ser adicionado através de fertilizantes nitrogenados minerais ou orgânicos. Assim, se em 12 anos o solo teve um acréscimo de 12 t de C por hectare, também teve um acréscimo de 1.200 kg de N/ha. Segundo este raciocínio, percebe-se que o teor de MO do solo só aumentará quando houver acréscimo de N ao sistema, na proporção de 10 de C para 1 de N. Como a MO contém cerca de 0,5% de P, 20 t de MO conterão cerca de 100 kg de P/ha,

ou 229 kg de P_2O_5 /ha. Desta forma, será necessário acrescentar também cerca de 20 kg de P_2O_5 /ha/ano para a nova MO. Mas, é provável que parte do P da nova MO poderá ser deslocada, por radicais orgânicos, dos sítios de adsorção de P dos óxidos de Fe e de Al. Neste caso, a adição de P poderia ser menor. No caso do enxofre (S), também serão necessários cerca de 100 kg/ha em 12 anos, pois seu teor na MO é 0,5%.

A quantidade de energia presente em 20 t de MO é equivalente à contida em 8.333 litros de óleo diesel⁽⁵⁾ (PARNES, 1990). Depreende-se, pois, quão importante é a conservação do solo, não somente pelo aspecto de manutenção das partículas minerais e orgânicas e os nutrientes adsorvidos, mas também em termos de manutenção da energia química acumulada no solo. Por essa razão, o sistema plantio direto é tão fundamental no processo de autorregeneração da fertilidade do solo, uma vez que, em grande parte, a qualidade do mesmo depende diretamente do teor de MO. Uma das maiores virtudes do sistema plantio direto adequadamente instalado é a possibilidade de aviventar o solo, pois o acréscimo paulatino de C permite criar uma camada de material que se assemelha à existente na floresta nativa ou nas pastagens naturais. Também é importante destacar que o aporte de adubos orgânicos, com o propósito de aumentar o teor de MO do solo, representa um custo energético elevado, sendo, portanto, mais racional

agregar MO ao solo mediante a palha deixada pelas culturas do que pela adição de material orgânico externo. O uso de dejetos de animais, no entanto, é uma importante forma de reciclar nutrientes na propriedade agrícola.

O princípio da resposta das culturas a fatores de produção

As leis naturais que determinam a produção das culturas têm relação direta com o funcionamento conjunto dos fatores responsáveis pelo crescimento das plantas. Nesse sentido, no decorrer do avanço científico sobre o entendimento do desenvolvimento de plantas, foram criadas leis que regem a importância de determinados fatores. De acordo com Wallace (1990, 1993), duas leis básicas sobre o efeito de fatores nutricionais foram propostas: a lei do mínimo e a lei do máximo.

A lei do mínimo: “O rendimento da cultura é determinado pelo fator em maior limitação”. Este preceito foi formulado por Liebig em 1843 e é válido somente para fatores muito limitantes. Em sequência, Mitscherlich, em 1909, propôs a lei do mínimo ampliada, indicando que “o rendimento das culturas é influenciado simultaneamente por todos os fatores limitantes”.

A lei do máximo: segundo Wallace (1990, 1993), em havendo uma lei do mínimo

⁽⁵⁾ A maioria da energia contida em compostos orgânicos está associada ao C. Esta energia é liberada quando o C é oxidado, ou seja, quando perde 4 elétrons, passando de C^0 para C^{4+} : $C(H_2O)_n + 2O \rightarrow CO_2 + \text{energia}$. Um mol de C pesa 12 g. A energia liberada por mol de C corresponde a 370 BTUs [acrônimo para British Thermal Unit, ou unidade térmica britânica, sendo uma unidade de energia de medida não-métrica e correspondente a 252,2 kcal e 1,06 kJ, sendo joules (J) a unidade de energia do Sistema Internacional de Medidas e $1 J = 1 \text{ kg/m}^2/\text{s}^2$]. Os compostos orgânicos (plantas, MO do solo, etc) contêm cerca de 50% de C. Em 1 hectare arável (20 cm de espessura), 1% de MO corresponde a 20.000 kg de MO ou 10.000 kg de C. Assim, 10.000 kg de C conterão cerca de 308 milhões de BTUs e 37.000 BTUs correspondem à energia contida em cerca de 1 L de óleo diesel. Com isso, 1% de MO corresponde, em equivalência energética, a 8.333 L de óleo diesel/ha arável ou 0,8 L/m² e se 1 L de óleo diesel custar R\$ 2,40, então o valor energético de 1% de MO equivale-se a R\$ 20.000,00/ha, ou US\$ 10.000/ha (2 reais/dólar). Dessa forma, cada kg MO ou de resíduo cultural (com 50% C) corresponderia a um valor energético de R\$ 1,00.

deve haver uma lei do máximo, que foi por ele assim enunciada: “O efeito de um dado fator é progressivamente maior à medida que outros fatores limitantes são corrigidos”. Nesta formulação, rendimento elevado só pode ser obtido mediante o concurso simultâneo de todos os fatores essenciais, havendo, portanto, interação positiva entre eles.

Wallace (1990) listou 35 fatores controláveis que interferem na produção vegetal. Com base na lei do máximo, ao corrigir a deficiência do solo em N, por exemplo, algo muito comum na cultura do trigo, o efeito da presença de P, em nível adequado, é ampliado. Da lei do máximo pode-se derivar que o rendimento potencial é obtido somente quando se usa o benefício que cada nutriente traz para os outros nutrientes. Em termos práticos, isso vale tanto para suprimento adequado (nível crítico) quanto para teor excessivo de nutrientes no solo. Dessa forma, em qualquer circunstância, deve ser considerado o risco econômico da aplicação de subdoses de fertilizantes, que gerará subprodução, mas também o risco da aplicação excessiva de fertilizantes, pois isso incorre na elevação do custo unitário de produção, principalmente quando o preço do fertilizante, em relação ao preço do grão de trigo, é elevado. Há também a questão das implicações ambientais do uso exagerado de fertilizantes orgânicos e minerais, mormente de N e de P, quando carregados para cursos d'água, podendo causar eutrofização (excesso de crescimento de algas que, ao se decomporem, promovem elevado consumo de oxigênio, tornando-se deficiente para os organismos aquáticos). Conclui-se, portanto, que o fertilizante deve ser usado com parcimônia, aplicando-o com base no estoque de nutrientes no solo

determinado pela sua análise, e na expectativa de rendimento da cultura (MANUAL..., 2004).

Segundo Wallace (1993), os rendimentos médios nos Estados Unidos de trigo, de soja e de milho são cerca de 35% do rendimento máximo já obtido, que são, respectivamente, 14,5 t/ha, 7,9 t/ha e 23,3 t/ha, cujos tetos são praticamente os mesmos desde 1980 (RITCHIE, 1980). No caso do trigo, o rendimento máximo obtido em um experimento conduzido pelo autor, na Fazenda Três Pinheiros, em Lagoa Vermelha, RS, no ano de 1988, foi de 6,8 t/ha com a cultivar BR 23, aplicando 120 kg N/ha em cobertura. Considerando que o rendimento médio máximo no Estado do Rio Grande do Sul é de 2,4 t/ha, conclui-se que as lavouras de trigo estão atingindo cerca de 1/3 do rendimento ambientalmente possível. No caso do arroz irrigado, a média de rendimento no RS é 6,8 t/ha e o teto de rendimento da cultura, em 1980, foi 10 t/ha (RITCHIE, 1980), valor que também já vem sendo obtido em algumas lavouras no RS. Denota-se, pois, o quanto há por ser feito no estudo da combinação de fatores de produção de trigo (GARCÍA; BERARDO, 2005) para minimizar a diferença entre o rendimento potencial, o rendimento atingido em experimento e o rendimento real obtido em larga escala em lavoura. O rendimento potencial depende da radiação solar, da temperatura do ar, da densidade de plantas e da adaptação da cultivar ao clima local. Já o rendimento atingível depende da disponibilidade de nutrientes e de água. Nosov e Ivanova (2009) definem o rendimento atingível como sendo a produtividade obtida em escala de lavoura mediante o uso de cultivares modernas e o suprimento adequado de nutrientes. O rendimento atingível não é em si influenciado por fatores econômicos,

mas varia em função de condições ambientais locais e com o grau de adoção de novas tecnologias. Por fim, o rendimento real depende da presença de fatores bióticos adversos, tais como a incidência de doenças, de plantas daninhas e de insetos-praga, que são fatores que inibem a expressão do rendimento em sua plenitude. O clima é altamente variável entre regiões e as condições meteorológicas são ainda imprevisíveis para mais de uma semana, resultando que os rendimentos variam de ano a ano e de região a região. Contudo, o uso de cultivares clima-adaptadas constitui sempre um fator de grande relevância. Dessa forma, os múltiplos fatores presentes em cada lavoura resultam numa possibilidade enorme de combinações que o agricultor necessita integrar num sistema único para atingir produção ótima econômica.

O método de cultivo que oferece maior sustentabilidade, ou capacidade de auto-manutenção, econômica e ambiental, é aquele que reúne o melhor uso conjugado de fatores ambientais e econômicos, tal como expresso pela lei do máximo. Um método de cultivo é sustentável quando pode ser usado por longo período sem causar problemas novos para os quais ainda não há solução adequada. Dessa forma, o foco principal de qualquer exploração agrícola deve ser rendimento econômico máximo sem que resíduos de insumos ocasionem danos ao solo do agrossistema e aos recursos hídricos do ecossistema natural entremeados na área agrícola.

O sistema plantio direto e as condições atuais do solo

A adoção do sistema plantio direto no Brasil ocorreu em larga escala em meados da década de 1990. Devido à essencialidade da presença de palha, o sistema, por ve-

zes, é denominado, com reforço de expressão, “sistema plantio direto na palha”. No manejo convencional do solo utiliza-se aração e gradagem antes de cada semeadura. Porém, como não há revolvimento do solo no sistema plantio direto e, decorridas algumas décadas, a maioria dos solos apresenta, atualmente, as seguintes características: adensamento da camada superficial e/ou subsuperficial e elevados gradientes verticais de teores de nutrientes, de pH e de Al. Em solos argilosos, a camada adensada pode ser tão compacta ao ponto de ser impeditiva à penetração de raízes. O adensamento do solo provém do tráfego de máquinas, mas também do impacto de chuva intensa, especialmente em períodos em que o dossel das plantas é pequeno e a presença de palha é escassa. Já a formação de gradientes químicos decorre da aplicação superficial de fertilizantes e de calcário, mas também devido ao fato de os nutrientes contidos nos resíduos culturais permanecerem na superfície do solo. No caso de K, e especialmente de P, em razão de sua imobilidade no solo, as raízes das plantas os absorvem nas diversas camadas e, juntamente com a palha, são depositados na superfície do solo, ou seja, ocorre mineração de nutrientes na camada subsuperficial e deposição na camada superficial. Em várias circunstâncias, os teores de P e de K são excessivamente altos nos 5 cm superficiais e, por vezes, baixos na camada de 10 cm a 20 cm e muito baixos na camada inferior a esta. Quanto ao pH, e principalmente devido à aplicação superficial de calcário, os valores são altos na superfície e muito baixos na subsuperfície, inclusive com a presença de Al em nível tóxico. A consequência prática do efeito conjugado do pH, nutrientes em nível baixo e compactação é desenvolvimento radicular num volume insuficien-

te de solo. A quantidade de água (o principal nutriente) presente no perfil do solo muitas vezes é adequada, mas a baixa taxa de fluxo ascendente, mormente através da camada adensada, impede que essa atinja as raízes em volume suficiente ao pleno desenvolvimento das plantas, causando-lhes déficit hídrico mesmo em breve estiagem. São preconizadas duas alternativas à compactação: a re-estruturação física do solo pelo método cultural (o cultivo frequente de plantas com raízes pivotantes ou que possuam elevada massa radicular) e o método mecânico, empregando-se escarificador, subsolador, arado ou semeadora com haste sulcadora. Porém, tem sido observado que o efeito benéfico do método mecânico, quando usado esporadicamente, parece ser efêmero em termos de melhoria da estrutura do solo. Por outro lado, benefícios do método cultural, especialmente em solos argilosos densos, demoram para se manifestar e também não se prolongam se aplicados ocasionalmente. Nesse sentido, um dos grandes desafios atuais de manejo do solo é encontrar alternativas econômicas para contornar as limitações citadas, agregando novos benefícios aos já auferidos pelo sistema plantio direto.

Amostragem do solo

Um dos requisitos básicos da análise química da fertilidade do solo é a coleta de amostras que representem determinada área de terra. Em sendo o solo, por natureza, um corpo heterogêneo, o seu cultivo e as adições de fertilizantes e de calcário ampliam a variabilidade espacial, nas direções vertical e horizontal. No sistema convencional de preparo do solo, a amostragem padrão é coletar a camada 0-20 cm, definida como a camada arável. Porém, no sistema plantio direto, a não incorporação de

fertilizantes e de calcário e a manutenção de palha na superfície do solo, ou a aplicação de fertilizantes na linha de semeadura, geram gradientes verticais acentuados de teores de nutrientes no solo entre a camada de 0 cm a 10 cm e de 10 cm a 20 cm. Se esses gradientes não forem corretamente incluídos nas amostras, o resultado da análise, mormente de P e de K, pode ser pouco representativo das condições médias do solo encontradas pelas raízes das plantas. Em geral, considerando uma probabilidade de erro de 5% e variação de 20% em torno da média, há necessidade de coletar no mínimo 15 subamostras para compor uma amostra representativa do solo de uma gleba. O número de subamostras por gleba homogênea depende também do fator analisado. Assim, para pH em água, índice SMP e matéria orgânica, o número de subamostras pode ser menor, mas, dependendo do grau de variação vertical e horizontal dos teores de P e de K, o número de subamostras pode aumentar (SCHLINDWEIN; ANGHINONI, 2000; NICOLodi; ANGHINONI, 2002). No sistema plantio direto, sugere-se amostrar a camada de 0 cm a 10 cm e, ocasionalmente, a de 10 cm a 20 cm, com o intuito de averiguar se há ou não deficiência de algum nutriente ou acidez na camada subsuperficial. A quantidade de corretivo a aplicar na recalagem pode ser a média dos valores das duas camadas.

Região Sul-brasileira de cultivo de trigo: Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC)

O estado natural do solo é estar recoberto por um manto de vegetação. Nesse sentido, o cultivo de trigo, além de se constituir numa das principais fontes de renda da produção agrícola no inverno no sul do País, é fundamental no sistema plantio di-

reto. A palha resultante da colheita do trigo cobrirá o solo até que a cultura de verão tenha dossel suficiente para oferecer cobertura vegetal. A área cultivada com trigo nas últimas safras foi cerca de 1 milhão de hectares no RS e 100 mil hectares em SC, tendo sido a média de rendimento no RS de 2.700 kg/ha em 2011, a mais alta de todas as safras.

O rendimento potencial de trigo no sul do Brasil depende, fundamentalmente, de variáveis climáticas, especialmente da incidência de radiação solar, da umidade do ar, do microclima entre plantas e da temperatura do ar em período anterior à antese. Após este estágio, e principalmente durante a maturação, o principal requisito ambiental é baixa precipitação pluvial e alta radiação solar. Para que a planta possa absorver adequadamente a energia solar disponível e formar biomassa e esta ser convertida em grãos, o aporte de nutrientes ao solo pela adubação, em quantidades proporcionais à deficiência do solo e à demanda da planta, é fundamental para possibilitar produção intensiva de trigo, proporcionando retornos econômicos semelhantes a outras atividades agrícolas. Por meio de análise química do solo e a interpretação agrônômica dos resultados, podem ser definidas doses economicamente adequadas de nutrientes e de calcário a aplicar ao solo. O controle de pragas, de doenças e de plantas daninhas, em momento adequado, auxiliará na eficiência de uso de fertilizantes, no processo de geração de biomassa e na formação do rendimento de grãos, constituindo o controle desses fatores bióticos importante prática para evitar perdas ocasionadas por tais fatores. Quanto à preservação do solo, o sistema plantio direto, com elevada produção de palha e a presença de terraços de base larga em nível em solos declivosos, pro-

porciona os melhores resultados práticos ao longo do tempo. Para obter bons rendimentos é necessário otimizar a combinação de todos os fatores de produção da própria cultura, bem como prever a realização de rotação de culturas, evitando-se, assim, a perpetuação de doenças que sobrevivem saprofiticamente em restos culturais de trigo e de outros cereais de inverno, bem como em plantas voluntárias. Dessa forma, o emprego conjugado das melhores práticas de campo e o uso de cultivares modernas de trigo permitirá usar, eficientemente, os fertilizantes e os recursos naturais disponíveis (solo, água, radiação solar e temperatura). A tecnologia atual de cultivo de trigo permite obter rendimentos superiores a 5 t/ha em parcelas experimentais e em algumas lavouras nas regiões mais frias. Já para lavouras comerciais extensivas, onde as práticas são otimizadas em termos de momento adequado de execução, um rendimento médio de 3 t/ha pode ser esperado. Assim, os fatores de produção referidos no presente capítulo objetivam um rendimento real em torno de 3 t/ha.

Calagem

Sabendo-se que a geração de acidez no solo é um processo natural e contínuo em clima úmido e considerando que a incorporação de corretivo é inviável em solo manejado no sistema plantio direto, há necessidade de aplicar periodicamente calcário na superfície de solos ácidos. Dependendo da dose aplicada, o efeito do corretivo perdurará por cerca de 3 a 4 anos e elevará o pH do solo na camada 0-10 cm e, em alguns casos, dado o devido tempo, até 20 cm de profundidade (CAIRES et al., 1998). A movimentação vertical de calcário e de seus efeitos, quando aplicado na superfície do solo, é da ordem de 1,3 cm/ano a 2,5 cm/ano (ABRÃO, 1979).

Mas, isso depende fundamentalmente da quantidade de água que percola o solo.

Um valor de pH em água superior a 5,5 e teor de alumínio (Al) menor de 0,5 cmol/dm³ na camada 0-10 cm é satisfatório para o desenvolvimento de trigo, exceto para cultivares que não apresentam nenhuma tolerância ao Al. Em geral, resposta à calagem não ocorre quando a porcentagem de saturação por Al em relação à capacidade de troca efetiva (CTCe = Ca + Mg + K + Al) é menor que 10% (Tabela 1), principalmente quando o teor de P é elevado, pois há certo grau de substituição entre os efeitos do calcário e do P no desenvolvimento das plantas. Tem sido verificado que o efeito prejudicial do Al é menor sob sistema plantio direto do que no sistema convencional (SALET et al., 1999), em razão da preferência de ligação do Al com complexos orgânicos recentes em vez de com P. Pela menor erosão do solo e, também, devido à tendência de acúmulo de MO nos primeiros anos de uso do sistema plantio direto, a geração de acidez é mais lenta nesse sistema, principalmente enquanto estiver ocorrendo aumento do teor de MO, pois acidez é gerada na decomposição de qualquer substância orgânica, conforme exemplificado na Equação [2]. O acúmulo de MO no solo obviamente tem limite, em função do ambiente climático, das características químicas do solo e do manejo dado a este. É comum observar menor efeito fitotóxico do Al em safras em que não ocorre déficit hídrico, provavelmente em função da diluição do teor de Al na solução do solo.

O Al talvez seja o elemento químico que mais causa prejuízo ao desenvolvimento das plantas em geral. Ele é tóxico às células e inibe o desenvolvimento radicular e, no caso de trigo, causa o sintoma denominado crestamento, descrito originalmente

por Araújo (1948, 1949, 1951). Resposta do trigo à calagem é observada em solos ácidos (MIELNICZUK, 1978, 1982), podendo haver um acréscimo de 25% no rendimento (SIQUEIRA, 1989). Dessa forma, as características de acidez do solo podem ser modificadas quimicamente para beneficiar a cultura do trigo e outras espécies que fazem parte do sistema de produção, envolvendo custos variáveis proporcionais aos atributos naturais do solo (LEMOS et al., 1967). Aliviar a acidez do subsolo ainda é um dos grandes desafios práticos em muitas regiões do Brasil e outros países (SANCHEZ, 1997; GOEDERT, 2006).

Quando o solo é manejado mediante o emprego do sistema plantio direto, no RS e em SC sugere-se manter o pH, determinado em água, em valor igual ou superior a 5,5 ou a saturação da CTC do solo por cátions de reação básica (Ca, Mg, K) em valor igual ou superior a 65%. A dose de calcário para atingir o pH desejado, em função do valor do pH SMP, consta na Tabela 3. O efeito da prática da calagem do solo na cultura do trigo depende fundamentalmente do grau de tolerância das cultivares à acidez e ao Al. As cultivares usadas no Brasil geralmente mostram tolerância ao Al, havendo, pois, menor efeito da calagem em termos de incremento no rendimento do que com outras culturas, exceto em solos muito ácidos. Por outro lado, as demais culturas do sistema de produção podem ser muito sensíveis ao Al, mormente a cevada e a canola. Por essa razão, recomenda-se manter o pH em água acima de 5,5, em cujo ambiente químico a presença de Al trocável é muito baixa ou inferior a 10% de saturação da capacidade de troca de cátions efetiva (Tabela 1), pois, com 20% de saturação por Al, pode haver redução do rendimento de grãos em mais de 10% (SIQUEIRA, 1983). Como o

corretivo aplicado na superfície tem efeito apenas no volume de solo dos primeiros 10 cm (CAIRES et al., 1998), a dose de calcário deve ser a metade da indicada na Tabela 3 para o solo atingir pH 5,5.

Quantidades de calcário inferiores a 2 t/ha dificultam a aplicação uniforme. Por essa razão, sugere-se protelar a aplicação de calcário quando a necessidade for < 2 t de produto/ha, até que o solo apresente suficiente acidez e haja maior probabilidade de resposta econômica das culturas à calagem. Apesar de a prática de calar a acidez de solos representar um ganho expressivo em termos de potencial de produção, o uso indiscriminado de corretivo de acidez, sem o prévio conhecimento do pH do solo, pode trazer prejuízos de longa duração, pois pH elevado (acima de 6,5) causa redução da disponibilidade de micronutrientes e outros efeitos prejudiciais. Um solo que teve seu pH elevado para acima de 6,5 levará muitos anos até atingir a faixa desejada de pH (5,5 a 6,0). Cuidados especiais devem ser tomados na regulação do distribuidor de calcário (BOLLER, 2009).

Por apresentar acidez elevada e baixo teor de P, solo de campo natural não deve ser cultivado com trigo na primeira safra, preferindo-se aveia-preta ou outra poácea (gramínea) forrageira semeada no outono, seguida pela soja no verão. No ano seguinte, em tendo sido obtido bom rendimento de soja, o trigo pode ser cultivado para a produção de grãos.

Em alguns casos tem-se verificado efeito benéfico da aplicação de gesso ao solo. Porém, em solos do RS e de SC isso não tem sido observado consistentemente, para trigo e outras culturas de lavoura, não sendo, portanto, economicamente indicada a sua aplicação. Por outro lado, a gessagem não prejudica as culturas, sendo o gesso uma

fonte solúvel de S e de Ca, permitindo que o subsolo também tenha gradativamente seu teor aumentado nesses elementos, bem como, possivelmente, diminuído o teor de Al. Além disso, dependendo da dose de gesso aplicada, a relação Ca/Mg pode ser aumentada com o uso de gesso, pois com 1 t de gesso (contendo 16% de Ca) por hectare, incorporado na camada 0-20 cm, o teor de Ca no solo pode ser aumentado em cerca de 0,4 cmol/dm³.

Cálculo de H+Al

Além da determinação direta da necessidade de calagem pelo índice SMP (Tabela 3), a porcentagem de saturação por bases também pode ser usada na tomada de decisão quanto ao emprego de calcário. Para isso, é necessário conhecer a estimativa de H+Al. O H+Al representa a acidez potencial do solo, que é constituído por Al³⁺ e H⁺ trocáveis eletrostaticamente e pelo H não dissociado, representado por H⁰. A estimativa da necessidade de calcário é a quantificação da acidez potencial. Estudos envolvendo muitos tipos de solo do RS e SC sugerem o uso da Equação [9] para calcular H+Al (cmol/dm³) (KAMINSKI et al., 2001):

$$H+Al = [e^{10,665 - 1,1483 \text{ SMP}}]/10 \quad [9]$$

em que $e = 2,7182818$.

A dose de calcário pode, então, ser calculada com a Equação [10].

$$NC \text{ (t/ha)} = \frac{CTC (V_2 - V_1)}{PRNT} \quad [10]$$

na qual,

CTC = Ca + Mg + K + H + Al, expresso em cmol/dm³ de solo;

V₂ e V₁ representam a porcentagem de sa-

Tabela 3. Indicação de calcário, em função do índice SMP, para correção da acidez dos solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, visando elevar o pH do solo a 5,5, 6,0 ou 6,5.

Índice SMP	Quantidade de corretivo de acidez para o solo atingir pH em água			Índice SMP	Quantidade de corretivo de acidez para o solo atingir pH em água		
	5,5	6,0	6,5		5,5	6,0	6,5
	----- t/ha ⁽¹⁾ -----				----- t/ha ⁽¹⁾ -----		
≤ 4,4	15,0	21,0	29,0	5,8	2,3	4,2	6,3
4,5	12,5	17,3	24,0	5,9	2,0	3,7	5,6
4,6	10,9	15,1	20,0	6,0	1,6	3,2	4,9
4,7	9,6	13,3	17,5	6,1	1,3	2,7	4,3
4,8	8,5	11,9	15,7	6,2	1,0	2,2	3,7
4,9	7,7	10,7	14,2	6,3	0,8	1,8	3,1
5,0	6,6	9,9	13,3	6,4	0,6	1,4	2,6
5,1	6,0	9,1	12,3	6,5	0,4	1,1	2,1
5,2	5,3	8,3	11,3	6,6	0,2	0,8	1,6
5,3	4,8	7,5	10,4	6,7	0,0	0,5	1,2
5,4	4,2	6,8	9,5	6,8	0,0	0,3	0,8
5,5	3,7	6,1	8,6	6,9	0,0	0,2	0,5
5,6	3,2	5,4	7,8	7,0	0,0	0,0	0,2
5,7	2,8	4,8	7,0	7,1	0,0	0,0	0,0

⁽¹⁾ Calcário com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 100%.

Fonte: Manual... (2004).

turação por bases atual e desejada, respectivamente, sendo igual a $(Ca + Mg + K)/(Ca + Mg + K + H + Al) \times 100$; e

PRNT = poder relativo de neutralização total do calcário, expresso em porcentagem. O PRNT é um índice de reação química do corretivo em relação ao $CaCO_3$ puro.

Considerando que há equivalência química entre a quantidade de acidez, expressa em $cmol_c/dm^3$, e a quantidade de base química contida em 1 t/ha de calcário com PRNT de 100%, os valores de H+Al calculados pela Equação [9] serão semelhantes aos valores de t/ha de calcário necessários para elevar o pH do solo a 6,5 (Tabela 3), pois, o solo ao atingir esse pH, praticamente não há mais acidez potencial a corrigir. Isso pode ser observado tanto na tabela adotada no RS e SC

(MANUAL..., 2004) como na adotada em São Paulo (RAIJ, 2011).

Calagem em solo sob cultivo convencional

Ao iniciar o sistema plantio direto e nos sistemas de preparo convencional (aração e gradagem) ou de cultivo mínimo (escarificação e gradagem), o calcário deve ser distribuído a lanço e incorporado uniformemente ao solo, até a profundidade de 20 cm.

Quando a quantidade de calcário indicada na Tabela 3 é aplicada integralmente, o efeito residual da calagem perdura por cerca de cinco anos, dependendo de fatores como manejo do solo, quantidade de N aplicado, práticas de conservação de solo e outros. Após esse período, indica-se realizar nova análise de solo para verificar se

há necessidade de calagem. Usualmente, a quantidade de corretivo necessária na recalagem é inferior à calagem anterior.

Nitrogênio

Sintomas de clorose (cor amarelo-esverdeada) nas folhas, devido à deficiência de N, são comuns em lavouras de trigo (Figura 1). A disponibilidade de N em quantidade adequada é o principal fator determinante do rendimento potencial de trigo (Figura 2). A capacidade do solo em suprir N às plantas depende diretamente do teor e da taxa de decomposição da MO presente no solo e nos restos culturais. Em geral, a matéria orgânica contém cerca de 5% de N e a taxa de decomposição por safra é cerca de 1% a 1,5% durante o inverno. Assim, um solo com 3% de MO conterá 60.000 kg de MO/ha na camada 0-20 cm de profundidade e, em consequência, 3.000 kg de N/ha. Se a taxa de decomposição por safra for 1,5%, a quantidade de N liberado será equivalente a 45 kg/ha, o que é suficiente para produzir apenas 1,5 t de grãos de trigo/ha. De outra parte, cada 1% a mais de MO no solo permitiria reduzir a adubação em

15 kg N/ha. Esta lógica está prevista na Tabela 4, porém, há muitos outros fatores que também afetam a mineralização de N no solo. Entre estes, a combinação do teor total de N do solo e a liberação de CO₂ durante 3 dias talvez venha ser um procedimento de laboratório útil para estimar o N potencialmente mineralizável (SCHOMBERG et al., 2009). A Figura 3 demonstra a relação existente entre o teor de MO do solo e o rendimento relativo de trigo (MIELNICZUK, 1982), mas, conforme detalhado abaixo, a MO não é um parâmetro que pode ser usado como único fator preditivo da disponibilidade de N. De forma análoga, Wiethölter et al. (1998), usando dados de 32 experimentos de trigo conduzidos durante cinco anos e em solos variando de 2,7 a 5,1% de MO, verificaram que os modelos que descreveram os dados de rendimento (Y) obtidos em experimentos após soja ou após milho eram distintos, conforme indicado nas equações [11] a [16]:

$$Y_{\text{soja}} = 2578,163 + 15,751N - 0,0643N^2$$

$$r^2 = 0,71 \quad [11]$$

$$Y_{\text{milho}} = 2239,262 + 22,749N - 0,0865N^2$$

$$r^2 = 0,86 \quad [12]$$

Com base nessas equações e para uma relação de preços insumo/produto igual a 5 (R\$ por kg N/R\$ por kg de trigo), as doses de N mais econômicas, seriam, respectivamente, 84 kg/ha e 103 kg/ha, tendo-se verificado, portanto, que a dose ótima econômica seria 19 kg N/ha a mais se a cultura anterior fosse milho.

Incluindo o teor de MO nos modelos, obtiveram-se as seguintes equações:

$$Y_{\text{soja}} = 2662,320 + 11,436N - 0,011.MO.N^2$$

$$r^2 = 0,64 \quad [13]$$

Foto: Sirio Wiethölter



Figura 1. Sintoma de deficiência de N em trigo.

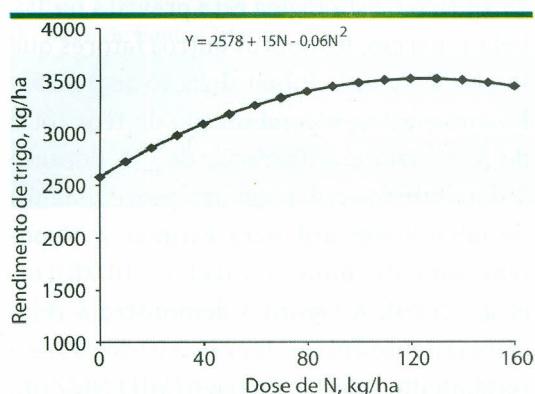


Figura 2. Rendimento de trigo em função da aplicação de N - equação média de 32 experimentos, RS.

Fonte: Wiethölter et al. (1998).

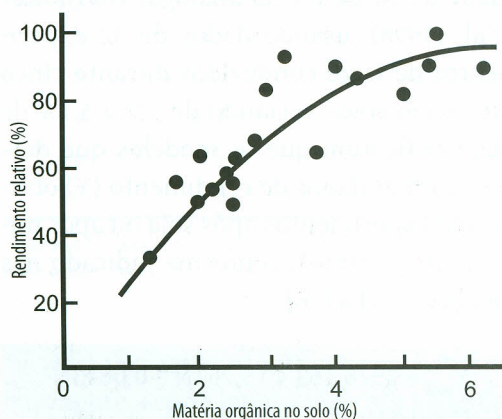


Figura 3. Relação entre o teor de MO do solo e o rendimento relativo de trigo.

Fonte: Mielniczuk (1982).

$$Y_{\text{milho}} = 2258,396 + 21,704N - 0,026.MO.N^2$$

$$r^2 = 0,85 \quad [14]$$

Tomando a segunda derivada dessas equações, obtém-se as equações [15] e [16]. Com base nesses modelos, fica evidente que, quanto maior o teor de MO no solo, menor é a dose de N necessária para rendimento ótimo econômico de trigo. Por outro lado, mas respeitando os naturais limites que as equações apresentam, os coeficientes da MO das equações [15] e [16] in-

dicam que o efeito unitário da MO é menor na resteva de soja (0,0220) do que na resteva de milho (0,0526), ou seja, na resteva de milho a disponibilidade de N é mais dependente da MO do que na resteva de soja.

$$N_{\text{soja}} = 6,436 / (0,0220.MO) \quad [15]$$

$$N_{\text{milho}} = 16,704 / (0,0526.MO) \quad [16]$$

Ressalta-se, no entanto, que as equações acima são válidas somente para a faixa de teor de MO usada nos estudos e tem o objetivo de tão somente indicar a tendência geral dos dados.

As equações [13] e [14] indicam que, na ausência de N, o rendimento médio de trigo nas áreas anteriormente cultivadas com soja foi 404 kg/ha maior (2.662 – 2.258 kg/ha) do que naquelas cultivadas com milho, algo que também pode ser observado nas figuras 4 e 5. Essas equações, constituem-se, portanto, em uma prova matemática sutil da importância da MO na disponibilidade de N para trigo e que a recomendação de N em função do teor de MO do solo tem razoável base experimental para os solos e condições dos experimentos analisados. De outra parte, a constatação acima é uma evidência de que o trigo responde diferentemente à aplicação de N em solos com características distintas, pelo menos com relação ao conteúdo de matéria orgânica e à cultura precedente. No entanto, o grau de associação da MO com a resposta à aplicação de N não foi alto, particularmente quando a cultura anterior foi a soja, pois o coeficiente de determinação (r^2) foi de apenas 0,64, que, no entanto, é satisfatório quando considerada a amplitude de características dos solos e das condições climáticas ocorridas nos cinco anos em que foram conduzidos os experimentos. Em consequência, trabalhos contínuos são necessários, visando a agregação

de outros índices de campo relacionados com o suprimento de N do solo para as plantas. Ainda deve ser considerado que o ajuste dos modelos de regressão superestimaram a dose de N de máximo retorno, especialmente para teor de MO inferior a 2%, o que é justificável, pois a amplitude dos solos do estudo era de 2,7% a 5,1% de MO.

As substâncias orgânicas do solo encontram-se em diversos graus de humificação - desde MO muito antiga até palha recentemente incorporada. O processo de mineralização de N, formando as formas químicas de N nítrico (NO_3^-) e amoniacal (NH_4^+), ocorre contínua e simultaneamente com a imobilização de N pelos micro-organismos decompositores de resíduos culturais. A maior parte do N absorvido pelas plantas provém do solo e o N na forma de amino açúcares, provenientes da parede celular de bactérias, talvez seja o fator mais diretamente responsável pela diferença entre os solos quanto à resposta das plantas ao aporte de N (KWON et al., 2009).

A palha da maioria das culturas após a colheita dos grãos, do grupo das poáceas (gramíneas), apresenta teor de N em torno de 0,6%, e as leguminosas, cerca de 1%. A MO é composta por cerca de 58% de C e

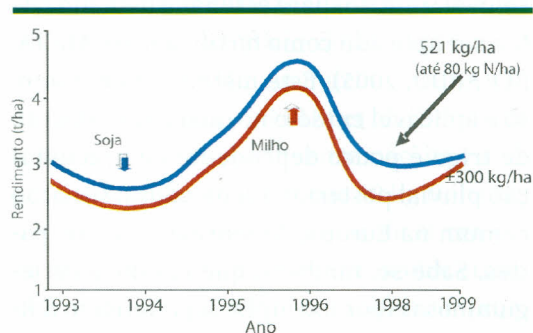


Figura 5. Rendimento de trigo em plantio direto em função da cultura precedente.

5% de N, conferindo uma relação C/N de 10 a 12. Para sintetizar MO, os micro-organismos que realizam a transformação dos resíduos culturais necessitarão absorver N mineral do solo para formar seu próprio tecido e para elaborar, posteriormente, nova MO. Assim, quanto maior a presença de N mineral e de palha, maior também será a chance de formar MO nova. Por essa razão, a quantidade de N disponível às plantas (NO_3^- e NH_4^+) durante uma safra é dificilmente diagnosticável com precisão, pois ela é função da umidade e da temperatura do solo, da taxa de decomposição dos resíduos culturais e da presença de raízes vivas que absorvem N mineral e que também influenciam o processo de mineralização, principalmente em sua rizosfera. Em geral, em Latossolos, a quantidade de N-NO_3^- e N-NH_4^+ raramente é superior a 15 mg N/kg de solo (mg N/kg de solo em 10 cm = kg N/ha), o que evidencia, em termos de necessidade da planta de trigo, que o solo, em geral, é deficiente em N prontamente disponível, sendo esta a causa da elevada resposta da cultura à adubação nitrogenada (Figura 2). Em muitas regiões, onde não ocorre excesso de chuva durante o período de cultivo de trigo, é viável coletar amostras de solo até 60 cm de profundidade e usar o N mineral

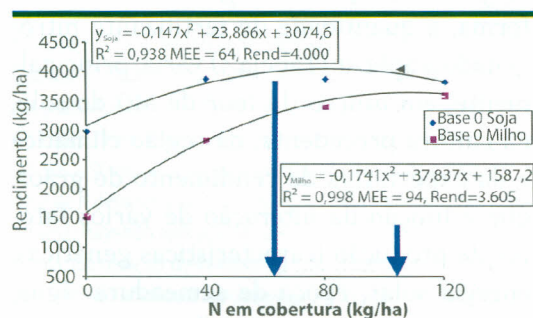


Figura 4. Efeito de N aplicado em cobertura no rendimento de trigo BRS Guamirim, resteva de soja e de milho/2008. MEE = máxima eficiência econômica.

solúvel (nitrato) para estimar a demanda de N a ser aplicado como fertilizante (GARCÍA; BERARDO, 2005). Este método, no entanto, só é aplicável em solo no qual o rendimento de trigo é pouco dependente de precipitação pluvial posterior à semeadura, situação comum na Europa, Argentina e outros países. Sabe-se, também, que resíduos de leguminosas (por exemplo, soja) tendem a liberar mais N (ou imobilizar menos)⁽⁶⁾ para a planta de trigo do que o milho (PÖTTKER; ROMAN, 1998), algo que está previsto na recomendação de N da Tabela 4. Na Figura 4 pode ser observado que a quantidade de N liberada pela palha de soja e expressa na forma de fertilizante, em comparação com a palha de milho, pode ser da ordem de 50 kg/ha ou 1.500 kg de grãos/ha. Em termos médios, o rendimento de trigo foi 300 kg/ha superior se cultivado após soja (Figura 5). Por último, raramente a liberação máxima de N nativo do solo ou de palha coincide com o período de máxima taxa de absorção de N pelas plantas, que ocorre em período anterior à antese (Figura 6), havendo, por-

tanto, necessidade de aportar N ao solo por meio da prática da adubação, especialmente em cobertura, por esta ser de duas a três vezes mais eficiente que a aplicação na semeadura (WIETHÖLTER, 2003).

Por conseguinte, a aplicação de N ao solo, no cultivo de trigo, é uma das práticas mais seguras em termos de retorno econômico, pois a experiência tem demonstrado que a eficiência de uso de N (EUN) varia em função da dose de N aplicada e seu valor oscila entre 12 (RAMOS, 1981) e 21 (WIETHÖLTER et al., 2007) kg de grãos produzidos por kg de N aplicado. Esta amplitude de valores é decorrente da variação entre safras e também da variação de resposta específica das cultivares ao aporte de N ao solo. Considerando que 1 kg de N custa cerca de 5 vezes mais que 1 kg de trigo, toda vez que a EUN é superior a 5 ocorre lucro com a aplicação de N. Por razões econômicas, a EUN costuma ser definida como sendo necessário um valor mínimo igual a 10, para caracterizar genótipos responsivos a N. Em parte, a alta EUN é causada por baixa temperatura do solo durante os estádios iniciais de desenvolvimento da planta no inverno, o que diminui a mineralização do N nativo do solo, gerando, assim, deficiência de N às plantas (Figura 1) e, por isso, resposta das plantas ao nutriente aplicado (figuras 2 e 4). Dessa forma, a quantidade de fertilizante nitrogenado a aplicar (Tabela 4) varia, principalmente, em função do teor de MO do solo, da cultura precedente, da região climática e da expectativa de rendimento de grãos, que é função da interação de vários fatores de produção (características genéticas, energia solar, época de semeadura, água, nutrientes, insetos-praga, doenças, plantas

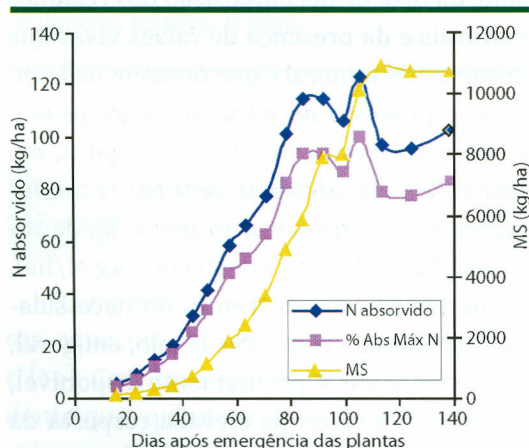


Figura 6. Absorção de N pela planta de trigo.

⁽⁶⁾A causa também pode ser outra: a palha de soja talvez induza aumento na atividade biológica do solo e a taxa de mineralização da matéria orgânica nativa do solo sendo maior, causará um efeito adicional (priming effect), liberando mais N nativo do solo do que se a palha de soja não estivesse presente.

daninhas, etc.), sendo, por isso, de difícil previsão. Dessa forma, em termos práticos, recomenda-se aplicar, na semeadura, 15 kg a 20 kg N/ha, a fim de propiciar um crescimento inicial adequado, lembrando que, nessa fase, as plantas podem conter 5% de N no tecido seco. Quando a fonte de N for ureia, recomenda-se uma distância mínima de 2,5 cm entre a semente e o grânulo de fertilizante. Para completar a dose indicada na Tabela 4, o restante deve ser suprido em cobertura, no estágio de afilhamento e alongamento do colmo. Doses elevadas de

Tabela 4. Doses de nitrogênio indicadas para o cultivo de trigo – RS/SC.

Matéria orgânica no solo ----- % -----	Cultura precedente	
	Leguminosa (soja)	Gramínea (milho)
	----- kg N/ha -----	
≤ 2,5	60	80
2,6 - 5,0	40	60
> 5,0	≤ 20	≤ 20

Observações: Para expectativa de rendimento maior que 3 t grãos/ha, acrescentar, aos valores da tabela, 20 kg de N/ha após leguminosa e 30 kg de N/ha após gramínea, por tonelada adicional de grão a ser produzido. Quando o trigo é cultivado somente para cobertura de solo, aplicar 20 kg N/ha em cobertura visando aumentar a produção de biomassa, especialmente após milho. Quando o trigo se destina à produção de pastagem e grãos, aplicar como adubação de reposição, imediatamente antes ou logo após o pastejo, em adição às doses acima, 1 kg N/3 kg de ganho de peso vivo. Assim, um ganho de peso de 100 kg/ha corresponde a demanda de adubação de cerca de 30 kg N/ha. Quando é cultivada uma cultura intercalar, da família das brássicas [nabo forrageiro (35% de óleo), canola (40% de óleo), etc.] (AQUINO, 2009), entre a cultura de verão e o trigo, durante cerca de 70 dias a 90 dias, e visando somente reciclagem de nutrientes, a dose de N deve ser aquela prevista para trigo cultivado após leguminosa. Havendo aplicação de adubo orgânico, a quantidade de N aplicada deve ser descontada da dose prevista na tabela acima, prevendo-se eficiência agrônômica, em relação aos fertilizantes minerais, de 50% do N do fertilizante orgânico durante a safra de trigo. Cultivares de trigo podem apresentar acentuadas diferenças na resposta ao aporte de N ao solo. O teor de N no grão de trigo é cerca de 20 kg/t a 25 kg/t, mas a demanda da planta é cerca de 30 kg N/t a 35 kg N/t de grão produzido.

N podem ser parceladas em duas aplicações em cobertura: no início do afilhamento e no alongamento até, no máximo, a emissão da folha bandeira (LALOUX et al., 1980). Em termos práticos, geralmente não há razão para aplicar dose menor que 30 kg N/ha em cobertura. Aplicações tardias de N em cobertura, após a fase de espigamento, visando completar as doses indicadas na Tabela 4, geralmente não elevam o rendimento, mas podem aumentar o teor de N no grão e melhorar a qualidade de panificação da farinha quando o suprimento de N no solo é muito baixo nesta fase (HALVORSON et al., 1987; BERGH et al., 2003; MIRANDA et al., 2009a, 2009b). Do total indicado na Tabela 4, a dose máxima a reservar e a ser aplicada por hectare, na antese, é cerca de 5 kg a 10 kg de N por tonelada de grão de expectativa de rendimento (HALLIDAY et al., 1992). Porém, como o valor comercial do trigo no Brasil depende somente do peso do hectolitro, a aplicação de N no espigamento não oferece, na condição atual, vantagem econômica ao produtor.

A maior parte da absorção de N pela planta de trigo ocorre entre o alongamento e o espigamento, atingindo acúmulo máximo na antese, que ocorre próximo a 100 dias (Figura 5). A partir desse estágio, continua ocorrendo absorção de N, mas também ocorre perda de N através da exsudação de compostos nitrogenados pelas raízes, bem como pela senescência e posterior queda de folhas, constituindo esses processos um dreno de N da planta. A época mais apropriada para aplicação de N em cobertura é nos estádios que precedem o período de maior demanda de N. Assim, o N deverá ser aplicado durante o afilhamento e alongamento do colmo, correspondendo, em geral, ao período entre 30 e 45 dias após a emergência, pois é nesse momento

que inicia o período de maior taxa de crescimento e de acúmulo de N.

O afilhamento ocorre durante um intervalo de cerca de 30 dias, entre a emissão da 4ª até a 8ª folha (surgimento da ponta da folha) do colmo principal. A partir desse estágio, inicia o alongamento do colmo, em que o primeiro entrenó torna-se visível (HAUN, 1973; SCHEEREN, 1986; MUNDSTOCK, 1999; BREDEMEIER; MUNDSTOCK, 2001). Existindo aplicação de N durante o afilhamento (4ª a 7ª folha do colmo principal), haverá tempo suficiente para que o N do fertilizante atinja o volume de solo de maior concentração de raízes e no período de maior demanda de N da planta. Na fase inicial desse período (4ª folha), a disponibilidade de N define o número de espiguetas por espiga e, na fase final (7ª folha) define-se o número de afilhos que formarão espiga fértil, ou seja, o número final de espigas por unidade de área. Deve ser levado em conta que são necessários de 5 dias a 10 dias para que a ureia (forma amídica, Tabela 8) seja convertida em amônio e, posteriormente, em nitrato e, assim, tornar o N passível de ser absorvido. Fatores como umidade do solo, precipitação após a aplicação de N, etc., controlarão o processo que tornará disponível para a planta o N aplicado em cobertura. Além disso, a temperatura do solo terá grande influência na mineralização ou imobilização de N contido na matéria orgânica do solo e na decomposição de resíduos culturais. Dessa maneira, o estágio fenológico exato da planta não é, na prática, o fator mais relevante a considerar na aplicação de N em cobertura, pois são as condições químicas do solo e a chuva que determinarão a disponibilidade do N aplicado e do N nativo do solo. A experiência de campo tem indicado que o período entre o afilhamento e o alongamento do colmo é o mais propício

para realizar essa prática. Deve-se considerar, ainda, que a aplicação de N na semeadura é muito importante para o desenvolvimento inicial da planta, mas a aplicação em cobertura é de duas a três vezes mais eficiente (efeito por unidade de N aplicado) que a aplicação em pré-semeadura (WIETHÖLTER, 2003).

Quando for cultivado trigo sobre resteva de milho e, especialmente quando há muita palha, convém antecipar parte ou toda a aplicação em cobertura (em momento que precede chuva), pois poderá ocorrer imobilização de N, bem como temperatura mais baixa do solo, que reduzirá a taxa de mineralização de N. Para cultivar de trigo cujo colmo seja suscetível ao acamamento (definido como alteração permanente da posição vertical do colmo), dose menor que a indicada na Tabela 4 pode ser empregada.

Nas regiões de clima quente e de menor altitude (por exemplo, Missões do RS) e quando o trigo é antecedido por soja, é recomendável, independentemente do teor de matéria orgânica do solo, restringir a aplicação de N a, no máximo, 40 kg/ha (base + cobertura), a fim de evitar danos por tombamento da planta. Já nas regiões frias e de maior altitude (por exemplo, Campos de Cima da Serra do RS) e quando o potencial de rendimento de grãos é elevado (> 4 t/ha), doses maiores que as indicadas na Tabela 4 podem ser empregadas em todas as faixas de teor de matéria orgânica do solo. Cultivares de trigo podem apresentar acentuadas diferenças na resposta à aplicação de N.

Além dos fatores usados na Tabela 4, é importante lembrar que a disponibilidade de N no solo depende de outros fatores, sobre os quais nem sempre há controle. Assim, o potencial de rendimento da cultivar, o histórico de cultivo da área, a época de se-

meadura, a incidência de doenças, as condições climáticas ocorrentes na safra (excesso de chuva promove lixiviação de nitrato e desnitrificação) e a estatura da cultivar podem afetar o grau de resposta da planta ao fertilizante nitrogenado. Os fatores climáticos são muito importantes no tocante à disponibilidade de N, pois temperatura elevada favorece a mineralização de matéria orgânica do solo e de resíduos culturais e temperatura baixa inibe parcialmente esse processo, mas favorece a formação de afilhos, o que é benéfico para a formação de biomassa. Em safras com precipitação muito acima da média, exemplo, em Passo Fundo, em agosto (269 mm) e setembro (490 mm) de 2009, a deficiência de N na fase de espigamento é bastante comum, independente da quantidade de N aplicada em cobertura. Além disso, quando a precipitação é muito recorrente, o número de horas de insolação por dia é baixo, inibindo substancialmente a expressão do potencial de rendimento.

No sistema plantio direto, convém cultivar trigo após soja em vez de após milho, pois o rendimento pode ser de 300 kg/ha a 500 kg/ha superior após soja do que após milho (Figura 5). Em alguns experimentos, já se observou diferença de 1.100 kg/ha, devida ao efeito do tipo de cultura precedente ao trigo. Somente em doses elevadas de N aplicadas em cobertura, o rendimento sob resteva de milho iguala-se ao sob resteva de soja.

A época de semeadura pode interferir no grau de acamamento do colmo do trigo. Semeadura precoce propicia aumento do período vegetativo das plantas e maior estatura e, em consequência, possibilidade de acamamento. De forma análoga, elevada densidade de plantas também as torna mais suscetíveis ao acamamento, devido ao efei-

to de sombreamento, que gera plantas estioladas e colmos menos resistentes.

Em adição à observância do estágio de desenvolvimento da planta, é importante considerar boas práticas de campo no momento da aplicação do fertilizante nitrogenado. A umidade do solo é especialmente importante, pois fertilizantes aplicados em cobertura necessitam ser solubilizados e transportados pela água no perfil do solo para atingir o sistema radicular das plantas. O momento ideal de aplicação é até um dia antes de precipitação pluvial de média intensidade (10 a 20 mm), pois a dissolução e o transporte de N para as raízes serão rápidos, evitando-se, assim, eventuais perdas de N por volatilização de amônia (NH_3), mormente de ureia. É mais propício ocorrer formação de NH_3 quando a hidrólise da ureia ocorre sobre resíduos de plantas na superfície do solo ou sobre folhas verdes. A quantidade de N volatilizado por esse processo é favorecida quando o fertilizante é colocado em contato com palha, quando a dose de N é alta, o solo da camada superficial está úmido e sua secagem é rápida (promove o arraste de NH_3 pelo vapor de água), o solo apresenta pH elevado, a CTC é baixa e a temperatura é elevada. Por esses motivos, a volatilização de NH_3 da ureia é geralmente pequena durante os períodos em que os fertilizantes são aplicados no trigo e em outros cereais de inverno, mas, devido ao efeito de vários fatores na volatilização de NH_3 , a sua previsão é incerta. De outra parte, precipitação pluvial prolongada ou de elevada intensidade pode propiciar perda de nitrato (NO_3^-) por lixiviação. No caso de N ser aplicado em solo seco e não chover nas semanas subsequentes, pode não ocorrer efeito da adubação. No momento da aplicação do fertilizante, as plantas não de-

verão apresentar água livre na superfície foliar, para evitar danos devido ao efeito salino dos fertilizantes nas folhas. Cuidados especiais devem ser tomados em termos de uniformidade de distribuição do fertilizante nitrogenado. Ajustes da dose de N devem ser realizados ao longo da lavoura quando o aspecto das plantas indicar acentuada variação na intensidade da cor verde das folhas.

A eficiência agrônômica de fertilizantes nitrogenados [ureia (45% N), nitrato de amônio (32% N) e sulfato de amônio (20% N e 22% S)] para trigo é idêntica. Ocasionais diferenças entre fontes resultam de efeitos ambientais (precipitação, temperatura e volatilização de amônia). Por essa razão, recomenda-se aplicar o fertilizante no momento ideal e usar a fonte que apresentar menor custo por unidade de N, que, em geral, é a ureia. Adubos orgânicos são fonte de N, devendo a dose ser estabelecida em função do teor de N e da taxa de mineralização na primeira safra após sua aplicação, que é da ordem de 50% do teor total. Grãos de trigo contêm, em geral, cerca de 20 kg a 25 kg de N/t (Tabela 12), perfazendo cerca de 12% a 14% de proteína bruta ($N \times 6,25$). A absorção de N pela planta, para produção de uma tonelada de grãos, varia entre 30 kg a 35 kg (HALVORSON et al., 1987).

Transmitância da folha e refletância do dossel

Nos últimos anos, dois novos procedimentos não destrutivos têm sido testados no sentido de obter uma indicação do estado nutricional da planta em relação a N. Estes procedimentos são a medida da densidade de clorofila do tecido foliar e a refletância de luz do dossel das plantas. No caso da densidade de clorofila (avaliada com o clorofilômetro SPAD-502), medida em fo-

lhas de trigo no estágio de afilamento/alongamento, o valor máximo, a partir do qual não é esperada resposta à adição de N, foi estimado em cerca de 40, correspondendo, numericamente, a cerca de 10 vezes a porcentagem mínima adequada de N no tecido foliar nesse estágio, que foi cerca de 4% (WIETHÖLTER, 2003). A leitura no clorofilômetro fornece um índice de transmitância de luz da folha, mas seu uso em escala de lavoura não tem sido indicado devido à imprecisão do método, pois a variação entre leituras costuma ser pequena em comparação com os gradientes de resposta das plantas ao aporte de N. Para medidas de refletância do dossel ainda não há dados suficientes, mas trabalhos em andamento (BREDEMEIER, 2010) podem, futuramente, servir de base para a aplicação de N em taxa variável com base na variabilidade espacial do crescimento de trigo e outras culturas (GARCÍA; BERNARDO, 2005; MENEZES et al., 2008; SCHARF; LORY, 2009).

Janela de observação do efeito da aplicação de N

Para observar o efeito da aplicação de N em cobertura (Figura 7), pode-se deixar uma “janela de observação”, ou seja, ao percorrer a lavoura fecha-se o distribuidor de fertilizante durante alguns segundos (percurso de 10 a 20 m). Decorridas duas semanas e se a coloração das plantas da janela de observação for menos intensa, então as plantas do entorno da janela terão se beneficiado da aplicação de N, indicando, portanto, que o solo apresentava deficiência de N em relação à demanda da planta. Para obter uma visão mais ampla do grau de deficiência do solo em N, é conveniente deixar várias janelas de observação na lavoura, em pontos que possam ser visualizados à distância.

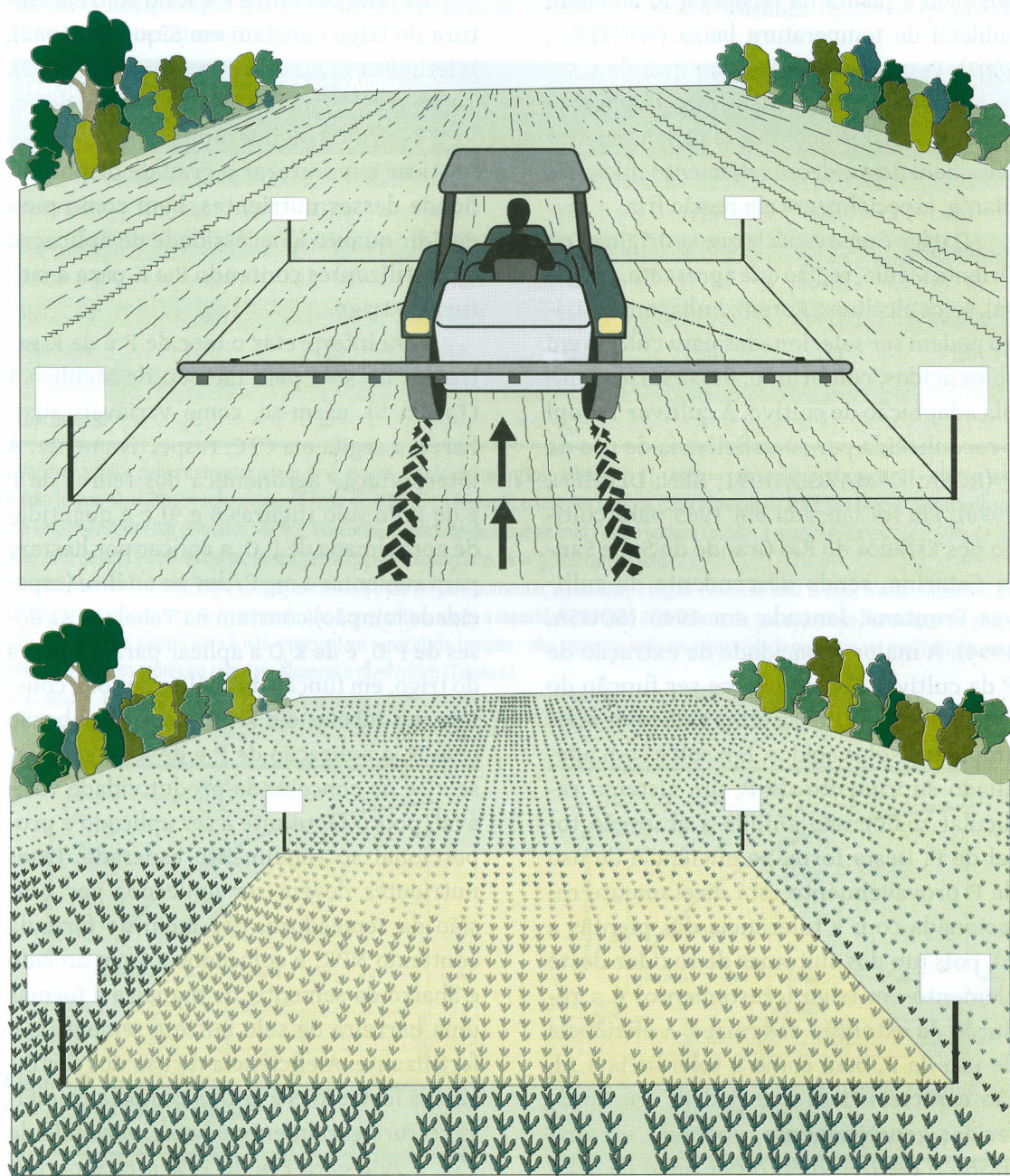


Figura 7. Janela de observação do efeito da aplicação de N.

Fonte: Adaptada de HALLIDAY et al. (1992).

Fósforo e potássio

A correção da deficiência do solo em P é um dos aspectos primordiais para o desenvolvimento da planta de trigo. Grandes

incrementos no rendimento podem ser obtidos ao aplicar P em solo deficiente nesse nutriente. Em adição, o adequado suprimento de P nas fases iniciais de desenvolvimento

auxiliam a planta na recuperação do efeito subletal de temperatura baixa (WINTER..., 2002). Por essa razão, mesmo quando o solo já apresenta teor adequado, a aplicação de uma pequena quantidade de P na semeadura beneficia o desenvolvimento inicial da planta, especialmente em região fria.

O trigo é uma espécie que se originou no Oriente Médio, região que apresenta, em geral, solos alcalinos. Porém, linhagens de trigo podem ser selecionadas para cultivo em solos ácidos, conferindo, dessa forma, ampla adaptação de cultivo. A cultivar Toropi é reconhecida por sua eficiência de uso de P (ROSA; CAMARGO, 1991; BEN; DECHEN, 1996). Ela foi lançada em 1965 para cultivo nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, sendo descendente da cultivar Frontana, lançada em 1940 (SOUSA, 1994). A maior capacidade de extração de P da cultivar Toropi parece ser função do crescimento de um sistema radicular mais amplo em solos ácidos. Em solos com adequado suprimento de P, um sistema radicular maior não amplia a absorção total de P. Desta forma, a eficiência de uso de P provavelmente está diretamente relacionada com a tolerância das plantas a Al, pois um dos sintomas de toxidez deste elemento em trigo (crestamento) é a redução da extensão das raízes. A eficiência de uso de P, bem como a tolerância a Al, são características que podem ser transferidas geneticamente, podendo ser realizado o melhoramento por meio da seleção de plantas para essas características. A tolerância do trigo a Al está relacionada à exsudação de malato no ápice radicular, induzida pela presença de Al (KOCHIAN, 1995). O malato apresenta propriedades de quelação do Al, tornando-o menos disponível às raízes de trigo e, com isso, permitindo maior absorção de P.

As relações entre P e K no solo e a cultura do trigo constam em Siqueira (1982), Wiethölter (2004) e Lantmann et al. (2005). Tanto para P como para K, a análise do solo é o principal instrumento para diagnosticar e monitorar o grau de disponibilidade desses nutrientes, bem como para decidir quanto à necessidade de aplicação de fertilizantes contendo P e K para a cultura do trigo.

Para interpretar o teor de P e de K extraídos do solo pelo método de Mehlich-1 (Tabela 5), usam-se, como variáveis auxiliares, a argila e a CTC, respectivamente. A interpretação agrônômica dos teores de P e de K do solo (figuras 8 e 9) e a quantidade aproximada de P_2O_5 a aplicar por hectare para aumentar 1 mg P/dm³ na análise (capacidade tampão) constam na Tabela 5. As doses de P_2O_5 e de K_2O a aplicar para a cultura do trigo, em função da análise do solo, constam nas tabelas 6 e 7. Tal qual a adubação com N, a aplicação de P e de K ao solo baseia-se no conceito da produtividade variável, pois o montante a ser aplicado é proporcional ao rendimento esperado. Esses nutrientes devem ser aplicados por ocasião da semeadura, por meio de fórmula contendo NPK, e colocados 2,5 cm ao lado e abaixo da semente, de maneira a formar uma barreira de solo entre a semente e o fertilizante. A eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados e potássicos pela primeira cultura geralmente é baixa, variando de 15% a 20% para P e de 20% a 80% para K (HALVORSON et al., 1987). Isso indica que a planta se nutre mais do P e do K já presente no solo do que do P e K do fertilizante. Porém, dado o devido tempo, a recuperação do P proveniente do fertilizante é quase integral nas sucessivas safras. A pequena absorção na primeira cultura é motivada pela baixa concentração de P na solução do

Tabela 5. Interpretação dos teores de fósforo (P) e de potássio (K) no solo (Mehlich 1), no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina.

Teor de P ou de K no solo	Argila ⁽¹⁾ , %				CTC _{pH 7,7} cmol/dm ³		
	> 60	41 - 60	21 - 40	≤ 20	< 5	5 - 15	>15
	mg P/dm ³				mg K/dm ³		
Muito baixo	≤2,0	≤3,0	≤4,0	≤7,0	≤15	≤20	≤30
Baixo	2,1 - 4,0	3,1 - 6,0	4,1 - 8,0	7,1 - 14,0	16 - 30	21 - 40	31 - 60
Médio	4,1 - 6,0	6,1 - 9,0	8,1 - 12,0	14,1 - 21,0	31 - 45	41 - 60	61 - 90
Alto	6,1 - 12,0	9,1 - 18,0	12,1 - 24,0	21,1 - 42,0	46 - 90	61 - 120	91 - 180
Muito alto	>12,0	>18,0	>24,0	>42,0	>90	>120	>180
Cap. tampão ⁽²⁾	30	20	15	8,5	4	3	2

⁽¹⁾Variável auxiliar para interpretar o teor de P: > 60% = solo muito argiloso (classe 1); 41 - 60% = solo argiloso (classe 2); 21 - 40% = solo médio (classe 3); ≤ 20% = solo arenoso (classe 4). A título de exemplo, o solo dos campos experimentais da Embrapa Trigo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico húmico, Haplorthox, Unidade de Mapeamento Passo Fundo, e contém a seguinte composição: 50% de argila, 20% de silte e 30% de areia, sendo, portanto, um solo argiloso. % = g/100 cm³ de solo.

⁽²⁾Quantidade de P₂O₅ (kg/ha) a aplicar na camada 0-20 cm para aumentar, na análise, 1 mg de P/dm³ de solo. O valor é uma estimativa e é válido para solos com teor de P menor do que o nível crítico, sendo a capacidade tampão dependente da quantidade de P previamente adsorvida pelo solo. Os valores para K não representam capacidade tampão - eles somente indicam a quantidade que deve ser multiplicada pela diferença entre os teores no solo para alcançar o nível crítico (Tabela 6).

Fonte: Manual... (2004).

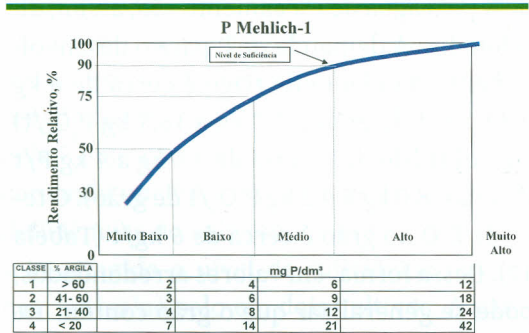


Figura 8. Relação entre o rendimento relativo e o teor de P no solo, RS e SC.
Fonte: Adaptada de Manual... (2004).

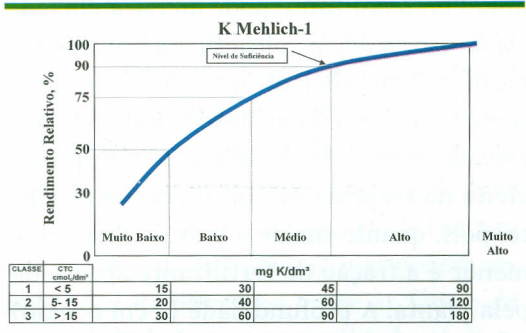


Figura 9. Relação entre o rendimento relativo e o teor de K no solo, RS e SC.
Fonte: Adaptada de Manual... (2004).

Tabela 6. Adubação de correção no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina.

Teor de P ou K no solo	Fósforo (kg P ₂ O ₅ /ha)	Potássio (kg K ₂ O/ha)
Muito baixo	120	120
Baixo	60	60
Médio	30	30

A coincidência numérica entre as doses de P₂O₅ e K₂O resulta da amplitude dos valores da análise de P e de K, da conversão de P em P₂O₅ e de K em K₂O, e da capacidade tampão do solo (Tabela 5).

Fonte: Manual... (2004).

Tabela 7. Quantidades de fósforo e de potássio a aplicar ao solo para a cultura de trigo no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina.

Teor de P ou de K no solo	Fósforo (kg P ₂ O ₅ /ha)		Potássio (kg K ₂ O/ha)	
	1º cultivo	2º cultivo	1º cultivo	2º cultivo
Muito baixo	125	85	110	70
Baixo	85	65	70	50
Médio	75	45	60	30
Alto	45	45	30	30
Muito alto	0	≤45	0	≤30

Observações: Para rendimento superior a 3 t/ha, acrescentar 15 kg P₂O₅/ha e 10 kg K₂O/ha por tonelada adicional de grãos a serem produzidos. Nos teores “Muito baixo” e “Baixo”, a dose indicada inclui 2/3 da adubação de correção (Tabela 6) no 1º cultivo e 1/3 da adubação de correção no 2º cultivo. No teor “Médio”, a adubação de correção (30 kg/ha de P₂O₅ e K₂O) está inclusa no 1º cultivo. As quantidades para o teor “Alto” são aquelas indicadas para a obtenção do rendimento referência de 3 t/ha de trigo. O teor de P₂O₅ e de K₂O no grão de trigo é cerca de 10 e 6 kg/t, respectivamente; porém, a demanda da planta é cerca de 15 kg P₂O₅ e 20 kg K₂O/t de grão produzido.

Fonte: Adaptada de Manual... (2004).

solo, o que torna a disponibilidade de P difusão-dependente. O coeficiente de difusão de P no solo é muito baixo, permitindo que este nutriente seja deslocado somente de poucos milímetros distante da raiz.

O método de aplicação (a lanço ou na linha) do fertilizante pode afetar a eficiência de uso, sendo a aplicação na linha de semeadura mais eficiente quando o solo apresenta teor baixo ou médio. Quando o teor é elevado, o método de aplicação tem pouco efeito na resposta da cultura ao fertilizante, pois, quanto maior o teor de P no solo, menor é a fração do fertilizante absorvida pela planta. A profundidade (2 cm a 5 cm) e a uniformidade de semeadura são muito importantes, porque elas influenciam o tempo necessário para que o coleóptilo (pseudofolha) se expanda o suficiente para atingir a superfície do solo e iniciar a fotossíntese. Um a 2 cm abaixo da superfície do solo forma-se a coroa, que é onde ocorre a divisão celular antes do alongamento do colmo (RITCHIE, 1991). Devido à pequena distância entre fileiras de trigo (17 cm), dose elevada de P e de K, se necessária, pode ser aplicada ao lado e abaixo (no mínimo 2,5 cm)

da linha de semeadura do trigo, sem causar dano à emergência das plantas e, com isso dispensar a aplicação desses nutrientes na cultura de verão, pois os fertilizantes ficarão adequadamente diluídos no solo e riscos de dano salino à semente e de perda de P e de K pela água de escoamento são, assim, diminuídos. A demanda de P para o desenvolvimento da planta de trigo é cerca de 6 kg a 8 kg P/t de grão (13,7 kg a 18,3 kg P₂O₅/t) e o conteúdo de P varia de 3,5 kg a 4 kg P/t de grão (8,0 kg a 9,2 kg P₂O₅/t de grão). O teor de K₂O no grão é cerca de 6 kg/t (Tabela 12). Dessa forma, em valores arredondados, pode-se generalizar que o grão contém 1% de P₂O₅ e 0,6% de K₂O. Já a demanda total de absorção desses nutrientes pelas plantas é cerca de 1,5 e 3 vezes superior ao exportado pelos grãos, respectivamente de P₂O₅ e de K₂O, resultando em uma demanda de cerca de 30 kg de N, 15 kg de P₂O₅ e 20 kg de K₂O para produzir 1 t de grãos.

As principais fontes de fertilizantes contendo N, P e K constam na Tabela 8. Para suprir P ao solo podem ser usados fosfatos solúveis [superfosfato simples, superfosfato triplo, fosfato monoamônico

(MAP) ou fosfato diamônico (DAP)] ou fosfato natural reativo, devendo-se dar preferência aos produtos solúveis quando o teor de P no solo estiver abaixo do nível de suficiência (Figura 8). Já as fontes de K podem ser KCl ou K_2SO_4 , preferindo-se KCl pelo menor custo. Adubos orgânicos devem ser usados em quantidades de acordo com os seus teores de N, de P e de K, limitando-se a dose ao nutriente que for primeiro atendido, a fim de evitar a aplicação excessiva de fertilizante.

Para solos apresentando teores de P e de K classificados como muito baixo, baixo e médio, indica-se adubação de correção (Tabela 6). Para adubação de manutenção, recomenda-se 15 kg de P_2O_5 /ha e 10 kg de K_2O /ha para a produção de 1 t de grãos/ha (Tabela 7). No caso de K, apesar de ser baixa a exportação pelos grãos de trigo (6 kg K_2O /t), o consumo interno desse nutriente pelas plantas é elevado, bem como perdas por escoamento superficial e lixiviação são levemente superiores que para P, mormente em solos arenosos. Deve ser considerado que as doses para o 1º cultivo da Tabela 7 objetivam simultaneamente suprir a demanda imediata das plantas e corrigir as deficiências do solo em P e em K, para que seja atingido o nível de suficiência desses nutrientes no solo em dois cultivos. A partir desse ponto somente a adubação de manutenção será necessária e, quando o teor de P e de K é muito elevado, doses menores que a manutenção são indicadas. Quando o teor é excessivamente alto, as doses de P_2O_5 e K_2O podem ser equivalentes ou inferiores à exportação, cuja prática denomina-se adubação de reposição. Já para solos com teores de P e de K superiores a duas vezes o teor muito alto, a adubação pode ser suprimida em uma ou mais safras, pois não se esperaria resposta econômica da abuba-

ção neste caso, conforme indicado nas figuras 8 e 9. Em qualquer circunstância, as quantidades de N, P_2O_5 e K_2O aplicadas através de adubos orgânicos devem ser descontadas das doses das tabelas 4, 6 e 7. Dessa forma, evita-se que sejam aplicados insu-
mos desnecessários, bem como limitam-se perdas de nutrientes por lixiviação ou escoamento superficial, pois esses processos ocorrem principalmente quando os teores no solo são excessivamente altos. Implicações ambientais decorrentes do excesso de N e P em águas superficiais (eutrofização) podem ocorrer em lagos e açudes, mas este ainda é um processo raro nas nossas condições. Já o K é considerado um elemento que não traz prejuízos ambientais, mesmo em altas concentrações.

A quantidade de P_2O_5 (kg/ha) a aplicar para aumentar 1 mg P/dm³ na análise (Mehlich-1), constante na Tabela 5 (capacidade tampão), varia em função do teor de argila. Estes valores relacionam-se inversamente com os níveis críticos para as diferentes classes texturais. Por mera coincidência numérica, o valor da capacidade tampão de P da camada de solo de 20 cm é aproximadamente igual à metade do teor de argila. Os valores da capacidade tampão de P são apenas estimativas, mas podem ser deduzidos da diferença entre as faixas de teores da Tabela 5 e as quantidades de P_2O_5 indicadas na Tabela 6.

Micronutrientes e enxofre

Os solos do RS e de SC apresentam, em geral, teores adequados de micronutrientes para produção de trigo, não havendo necessidade de sua aplicação, exceto quando o potencial de rendimento de grãos é elevado e a análise do solo indicar nível inferior ao teor médio (Tabela 9). De forma semelhante, a maioria dos solos apre-

senta teor adequado de S. Mas, no caso de comprovação de deficiência por meio da análise do solo (< 5 mg S/dm³), sugere-se aplicar cerca de 10 kg a 20 kg S/ha. Em geral, solos arenosos e com baixo teor de matéria orgânica apresentam maior probabilidade de ocorrência de deficiência de S e também de micronutrientes. Alguns fertilizantes (sulfato de amônio, superfosfato simples, sulfato de potássio, Tabela 8) ou fórmulas de fertilizantes NPK com teor baixo ou médio de P₂O₅ contêm enxofre (pro-

vindo do SFS), fornecendo esse nutriente em quantidades apropriadas às necessidades das plantas. Adubos orgânicos, usados em quantidades suficientes para suprir as doses de N, P e K das tabelas 4 e 7, em geral suprem quantidades suficientes de micronutrientes e de enxofre para a cultura do trigo. Os fertilizantes e o calcário também contêm pequena quantidade de micronutrientes (MANUAL..., 2004). Quando o solo é deficiente em algum micronutriente, a quantidade usualmente recomendada

Tabela 8. Principais fontes de fertilizantes contendo N, P e K e outros nutrientes.

Fertilizante	Composição	Fórmula química	Teor mínimo de nutrientes previsto na legislação ⁽¹⁾	Eq. CaCO ₃ , kg CaCO ₃ /kg N ⁽²⁾	Índice salino ⁽³⁾
N					
Ureia	ureia ⁽⁴⁾	CO(NH ₂) ₂	45% N	1,8	75,4
Nitrato de amônio	nitrato de amônio	NH ₄ NO ₃	32% N	1,8	104,7
Sulfato de amônio	sulfato de amônio	(NH ₄) ₂ SO ₄	20% N e 22% S	5,4 ⁽⁵⁾	69,0
P ⁽⁶⁾					
Superfosfato simples ⁽⁷⁾	fosfato monocalcico gesso	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ ·2H ₂ O CaSO ₄ ·2H ₂ O	18% P ₂ O ₅ , 16% Ca e 8% S 50%	neutro	7,8
Superfosfato triplo ⁽⁷⁾	fosfato monocalcico	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	41% P ₂ O ₅ e 10% Ca	neutro	10,1
MAP	fosfato monoamônico	NH ₄ H ₂ PO ₄	48% P ₂ O ₅ e 9% N	5,4 ⁽⁸⁾	34,2
DAP	fosfato diamônico	(NH ₄) ₂ HPO ₄	45% P ₂ O ₅ e 17% N	1,8	29,9
Fosfato natural reativo	apatita de origem sedimentar, fosfato tricálcico	Ca ₁₀ (PO ₄ CO ₃) ₆ (F,OH) ₂₋₃ Ca ₃ (PO ₄) ₂	28% de P ₂ O ₅ total, 9% P ₂ O ₅ em ácido cítrico, 30% a 35% Ca	-	-
K					
Cloreto de potássio	cloreto de potássio ⁽⁹⁾	KCl	58% K ₂ O, 45% de Cl solúvel em água	neutro	116,3
Sulfato de potássio	sulfato de potássio ⁽¹⁰⁾	K ₂ SO ₄	48% K ₂ O e 15% S solúvel em água	neutro	46,1
S					
Enxofre elementar	Enxofre	S	95% S	-	-
Gesso ⁽¹¹⁾	sulfato de cálcio	CaSO ₄ ·2H ₂ O	16% Ca e 13% S	neutro	8,1

⁽¹⁾Brasil (2006a,b).

⁽²⁾Equivalente em CaCO₃, (LORENZ; MAYNARD, 1988). A nitrificação de fertilizantes contendo N amoniacal gera H⁺, provocando a acidificação do solo. O valor indicado corresponde à quantidade de base (CaCO₃) necessária para neutralizar a acidez gerada na nitrificação do fertilizante.

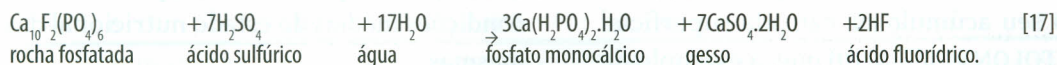
⁽³⁾Usando como referência o valor do índice salino do NaNO₃ de 100 (LORENZ; MAYNARD, 1988).

⁽⁴⁾Na fabricação de ureia é usado gás natural (CH₄), como fonte de H e de C, e o ar atmosférico (78% N₂) como de fonte N. Emprega-se, ainda, calor e pressão. Para a fabricação de uma tonelada de NH₃ são empregados 1.230 m³ de gás natural (FIXEN, 2009a).

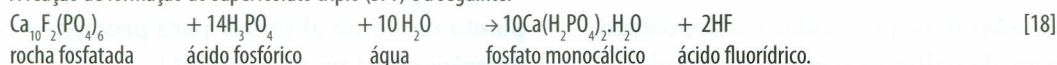
⁽⁵⁾Segundo Gearhart e Collamer (2009), o valor variaria entre 2,7 e 4,1.

⁽⁶⁾Os fertilizantes fosfatados são elaborados a partir de fosfato tricálcico, que é convertido, mediante acidulação, em fosfato monocalcico. As principais fontes de P são rochas com a seguinte composição: carbonato-apatita $[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCO}_3]$, hidróxido-apatita $[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2]$ e flúor-apatita $[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2]$. A origem geológica pode ser ígnea (estrutura cristalina definida, resultante da solidificação de magma de atividades vulcânicas) ou sedimentar (estrutura amorfa, resultante da sedimentação de organismos marinhos). As rochas sedimentares são usadas em 4/5 da produção de compostos fosfatados, apresentando maior solubilidade que as rochas apatitas (NOVAIS; SMYTH, 1999). As reservas mundiais de P e de K são estimadas, com base no consumo atual, em 696 e mais de 500 anos, respectivamente (FIXEN, 2009b).

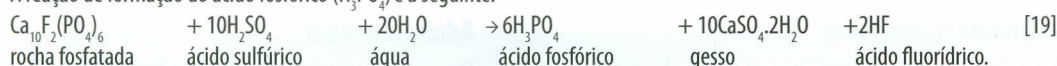
⁽⁷⁾Soma da quantidade de P solúvel em água e em citrato neutro de amônio. O superfosfato simples (SFS) contém cerca de 50% de gesso e, por isso, o teor máximo de S no superfosfato simples é 9,3%. A reação básica de formação do SFS é a seguinte (CALIFORNIA..., 1980):



A reação de formação do superfosfato triplo (SFT) é a seguinte:



A reação de formação do ácido fosfórico (H_3PO_4) é a seguinte:



O ácido fosfórico é separado por filtração e apresenta 30% de P_2O_5 . Posteriormente ele é concentrado para 50% a 54% de P_2O_5 (CALIFORNIA..., 1980; GLOBAL..., 2008). O gesso é descartado do processo e a quantidade formada é cerca de 5 t a 6 t por t de P_2O_5 . As rochas fosfatadas costumam apresentar pequenas quantidades de elementos radioativos (U, Th, Ra e Po) e metais pesados indesejáveis (Cd). Cerca de 90% do rádio (Ra) e do polônio (Po) e parte do cádmio (Cd) alojam-se no gesso e o urânio (U) e o tório (Th) unem-se ao ácido fosfórico (LAEGREID et al., 1999). Para a produção de 3 t H_2SO_4 é necessária cerca de 1 t de S. Três t de H_2SO_4 permitem a produção de 2 t H_3PO_4 contendo 50% a 54% de P_2O_5 , que, por sua vez, permite a produção de mais de 2 t de DAP. A maioria do S é extraído do petróleo (0,1% a 2,8% de S) e do gás natural (GLOBAL..., 2008; FIXEN, 2009a).

⁽⁸⁾1,8 do NH_4 e 3,6 do H_2PO_4 .

⁽⁹⁾Obtido através do tratamento do minério silvinita ou carnalita, por dissolução e cristalização ou flotação.

⁽¹⁰⁾Obtido através do tratamento de KCl com H_2SO_4 , ou de minério de K_2SO_4 .

⁽¹¹⁾O gesso puro com duas moléculas de água ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) pode conter até 23% de Ca e 18,6% de S. Como fertilizante, a legislação exige um teor mínimo de 16% de Ca e de 13% S. Cada tonelada de gesso, incorporada num hectare e a 20 cm de profundidade, pode aumentar teoricamente o teor de Ca trocável no solo em até 0,4 cmol/dm^3 (LOPES et al., 2004). Semelhante acréscimo de Ca e Mg pode ser obtido teoricamente com uma tonelada de calcário que contenha 38% de $\text{CaO} + \text{MgO}$ (ou, no mínimo, 27% de Ca se fosse calcário calcítico), mas o teor trocável de Ca atingido no solo depende do tempo de dissolução do calcário, da intensidade de adsorção de Ca pelo solo e da quantidade lixiviada. Em muitos casos, obtém-se, com calcário, aproximadamente a metade do incremento de Ca obtido com gesso, na mesma quantidade de produto aplicado (RAIJ, 2011).

Tabela 9. Interpretação dos teores de enxofre e de micronutrientes em solo - RS e SC.

Teor no solo	Enxofre ⁽¹⁾	Cobre	Boro	Zinco	Manganês ⁽²⁾	Ferro
	-----mg/dm ³ -----					g/dm
Baixo	< 2	0,2	< 0,1	< 0,2	< 2,5	-
Médio	2 - 5	0,2 - 0,4	0,1 - 0,3	0,2 - 0,5	2,5 - 5	-
Alto	> 5	> 0,4	> 0,3	> 0,5	> 5	> 5

⁽¹⁾Para leguminosas, brássicas e liliáceas, o teor mínimo é 10 mg/dm³.

⁽²⁾Teores baixos geralmente são associados a valores elevados de pH e baixos de argila.

Métodos de análise: enxofre, fosfato monocalcico $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ contendo 500 mg de P/L; cobre e zinco, HCl 0,1 mol/L; boro, água quente; manganês, KCl 1 mol/L; e ferro (Fe^{3+}), oxalato de amônio 0,2 mol/L pH 3. Raramente o trigo é cultivado em solo de várzea, mas, no caso do arroz, o bronzeamento (bronzing) das folhas inferiores, causado pelo excesso de Fe^{2+} decorrente da inundação, geralmente ocorre quando o teor de Fe no solo é superior a 5 g/dm³.

Fonte: Manual... (2004).

consta na Tabela 18. Porém, se o teor no solo de qualquer micronutriente estiver acima do teor muito alto, não se recomenda a sua aplicação, pois prejuízos podem advir desta prática. No sistema plantio direto, os resíduos culturais, ao se decomporem, liberam Zn ao solo e podem promover o seu acúmulo na camada superficial (BORTOLON et al., 2010) que, a exemplo de P e de K, decorre da absorção pelas raízes em camadas mais profundas e a deposição posterior da palha na superfície do solo.

Análise de tecido foliar

O teor de nutrientes na planta de trigo varia em função do estágio de seu desenvolvimento (tabelas 10, 11 e 12). Assim, por exemplo, durante o afilhamento, plantas de trigo bem nutridas podem apresentar até 5% de N na matéria seca, podendo haver diferença entre o colmo principal e os afilhos. No estágio de afilhamento, o teor de N-NO_3^- da base dos afilhos (sem folhas) varia entre 2,5 g a 7,9 g N/kg de matéria seca, usando 0,05N de K_2SO_4 como extrator (STRADA et al., 2000). No espigamento, quando grande parte da biomassa já foi formada, o teor de N varia de 2% a 3% e, na maturação, o teor de N na planta inteira é cerca de 1%. Já o grão apresenta cerca de 2% a 2,5% e a palha, 0,6% de N (Tabela 12). Dessa forma, para cada estágio fenológico há um teor mínimo de um nutriente, que, no entanto, pode variar em relação a vários fatores, entre os quais o teor dos demais nutrientes e, por isso, apresentar pouca relação com o estado nutricional da planta e com o potencial de rendimento. Por essas razões, a análise de tecido não tem sido largamente usada na prática para ajustar o fornecimento de nutrientes via adubação. O teor de N na planta e dos demais elementos essenciais e não essenciais

constam na Tabela 11. Devido à variabilidade de teores encontrados e que nem sempre se refletem em diferenças no rendimento, indica-se amostrar separadamente plantas com e sem sintomas visuais de deficiência ou toxidez de nutrientes. Em geral, 30 plantas por amostra representam as condições médias do estado nutricional das mesmas.

As quantidades de nutrientes que a planta necessita absorver para produzir 3 t de grãos constam na Tabela 13.

Adubação foliar

Poucos estudos sobre aplicação foliar de nutrientes têm sido realizados na cultura do trigo no Brasil. Devido às incertezas gerais inerentes à prática, há riscos em termos de vantagem econômica da aplicação foliar de fertilizantes em culturas anuais, apesar de haver absorção pelas folhas e colmos de nutrientes quando dissolvidos em água ou também na forma gasosa, como é o caso de NH_3 (amônia), SO_2 (dióxido de enxofre) e NO_2 (óxido nítrico). Estes gases podem ser absorvidos através dos estômatos, presentes nas espécies anuais em número de 100 a 200/mm² de folha (MARSCHNER, 1995). Segundo Black (1993), os resultados com adubação foliar em culturas de lavoura, em geral, são erráticos, sendo um assunto complexo, havendo promessas de benefícios ainda não comprovados. As principais limitações da prática da adubação foliar estão relacionadas aos seguintes fatores: solubilidade do fertilizante, grau de mobilidade do nutriente no floema da planta, temperatura do ar (deve ser < 25 °C) e umidade relativa do ar (deve ser alta) durante e após a aplicação, idade da folha (as mais velhas têm maior capacidade de absorção do fertilizante foliar) e quantidade de nutriente que pode ser suprida

Tabela 10. Teores de nutrientes considerados adequados na matéria seca da planta de trigo no início do alongamento do colmo.

Macronutrientes, %					
Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio	Enxofre
3,5 - 5,0	0,3 - 0,5	2,0 - 3,0	0,2 - 0,5	0,2 - 0,5	0,2 - 0,5
Micronutrientes, mg/kg					
Cobre	Boro	Zinco	Ferro	Manganês	Molibdênio
6	6	30	40	40	0,3

Fonte: Sillanpää (1982); Westfall et al. (1990); Halliday et al. (1992); Gianello et al. (1995); Wolf (1996); Barbosa Filho et al. (2001) e dados obtidos no Laboratório de Solos da Embrapa Trigo.

Tabela 11. Teores de nutrientes considerados adequados na matéria seca da planta de trigo no início do espigamento.

Macronutrientes, %					
Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio	Enxofre
2,0 - 3,0	0,3 - 0,5	1,5 - 3,0	0,2 - 0,5	0,15 - 0,5	0,15 - 0,4
Micronutrientes, mg/kg					
Cobre	Boro ⁽¹⁾	Zinco	Ferro	Manganês	Molibdênio ⁽²⁾
5 - 15	6 - 12	25 - 70	25 - 100	25 - 100	0,1 - 0,3
Elementos não essenciais, mg/kg					
Alumínio	Cobalto	Cromo	Selênio		
< 200	0,03	5	15		

⁽¹⁾No emborrachamento, o teor adequado é 8 mg/kg (GUPTA, 2007). Na maturação do grão, o nível crítico nas folhas é cerca de 25 mg/kg (FURLANI et al., 2003) e 17 mg/kg na palha (GUPTA, 2007).

⁽²⁾Para planta inteira, no estádio de emborrachamento, o teor suficiente varia entre 0,09 mg a 0,18 mg Mo/kg de matéria seca (HAMLING, 2007). Observação: plantas verdes apresentam em torno de 80% de água e 20% de matéria seca; 95% da matéria seca é composta por C, O e H e somente 5% dos demais 13 nutrientes essenciais. Desta forma, apenas 1% da planta viva é formada por N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, B, Zn, Fe, Mn, Cl e Mo.

Fonte: Bergmann (1983); Reuter (1986); Westfall et al. (1990); Halliday et al. (1992); Wolf (1996); Barbosa Filho et al. (2001) e dados obtidos no Laboratório de Solos da Embrapa Trigo.

Tabela 12. Composição do grão e da palha de trigo.

Macronutrientes	Nitrogênio	P ₂ O ₅ ⁽¹⁾	K ₂ O ⁽²⁾	Cálcio	Magnésio	Enxofre		
Grão, kg/t	20 - 25	8,0 - 9,2	5,4 - 6,0	1,1	2,7	1,6		
Palha, kg/t	6	5	12	2	0,7	1,3		
Micronutrientes	Cobre	Boro	Zinco	Ferro	Manganês	Molibdênio	Cloro	
Grão, g/t	3 - 10	2 - 3	30 - 80	40 - 90	50 - 80	0,2 - 0,5	550	
Palha, mg/kg	3,4±1,2	2,2±0,8	31±26	69±21	87±43	0,45±0,43	-	
Elementos não essenciais	Sódio	Silício	Arsênio	Bromo	Cobalto	Níquel	Prata	Selênio
Grão, g/t	80	60	0,1	2,0	0,01	0,35	0,4	0,07

⁽¹⁾Dividido por 2,29 = P. ⁽²⁾Dividido por 1,2 = K. (kg/t)/10 = %; g/t = mg/kg = ppm.

Fonte: Sillanpää (1982); Aldrich et al. (1986); Malavolta et al. (1989); Vivancos (1997); Lægheid et al. (1999); Barbosa Filho et al. (2001); Garcia e Berardo (2005) e dados obtidos no Laboratório de Solos da Embrapa Trigo.

Tabela 13. Quantidades de nutrientes absorvidos por plantas de trigo para produção de 3 t de grãos.

Macronutrientes:						
Nitrogênio	P ₂ O ₅	K ₂ O	Cálcio	Magnésio	Enxofre	
----- kg/ha -----						
100 - 110	34 - 46	60 - 72	30 - 40	20 - 30	12 - 15	
Micronutrientes:						
Cobre	Boro	Zinco	Ferro	Manganês	Molibdênio	Cloro
----- g/ha -----						
50 - 100	70 - 100	200 - 300	330 - 480	100 - 200	20	2.000

Fonte: Bergmann (1983); Halliday et al. (1992); Guia... (1997); Vivancos (1997); Lægread et al. (1999); Barbosa Filho et al. (2001) e Garcia e Berardo (2005).

pela pulverização (ERNANI, 2006). A absorção de nutrientes pelas folhas pode levar de horas a vários dias (CARVALHO et al., 2004). Estudos envolvendo formulações comerciais contendo N, P, K, micronutrientes e hormônio de crescimento indicaram não haver resposta significativa do trigo a esses nutrientes, exceto em determinadas condições (ABRÃO, 1976; SIQUEIRA et al., 1977; Siqueira, 1988). Em termos de participação no mercado de fertilizantes foliares, a cultura do trigo é inexpressiva (POZZAN, 2008). Na aplicação de N via pulverização foliar, indica-se concentração máxima de 10% de ureia na calda, visando a evitar dano às plantas pelo efeito salino (VIVANCOS, 1997), que pode ocorrer a partir de 12% de ureia (NAKAYAMA et al., 1984). A qualidade da ureia também é importante, não devendo conter mais do que 0,1% de biureto (condensação de duas moléculas de ureia). Pequeno dano salino nas folhas de plantas durante o afilhamento e o alongamento geralmente não tem efeito no rendimento, mas dano salino na folha bandeira (que é importante para enchimento do grão) deve ser evitado (HALLIDAY et al., 1992). Segundo Siqueira (1988), solução com 5% de ureia não causa danos às plantas de trigo. O aporte de N via foliar, em relação à aplicação ao solo, só é plausível quan-

do o solo apresentar déficit hídrico e não há previsão de chuva, ou seja, trata-se de uma opção para situações específicas. Deve ser considerado, ainda, que essa prática permite aplicar pequena quantidade de N (no máximo 9 kg/ha em 200 litros de calda/ha), havendo, portanto, necessidade de realizar sucessivas aplicações para suprir a quantidade de N demandada pela planta (30 a 35 kg/t de grãos) e indicada na adubação via solo (Tabela 4). Em termos práticos, a adubação foliar é indicada somente para lavouras de alto potencial de rendimento, em períodos de estiagem, ou em solo com teor muito baixo de MO e no qual um suprimento elevado e contínuo de N não seria possível somente pelo solo. A adubação foliar deve ser evitada se há previsão de geada, bem como durante a antese (HALLIDAY et al., 1992). Para observar visualmente se houve efeito da aplicação foliar de N, convém deixar algumas janelas de observação em diversos pontos da lavoura, desligando o pulverizador durante alguns segundos, a exemplo do indicado para a aplicação de N ao solo (Figura 7).

O uso de fertilizantes e suas implicações ambientais

Por razões lógicas, fertilizante e corretivo de acidez somente devem ser usa-

dos para compensar a deficiência que o solo apresenta. O uso excessivo destes insumos tem duas implicações: aumento do custo de produção e perda de nutrientes da lavoura, podendo, quando usados em alta quantidade, afetar negativamente os recursos hídricos. Por essa razão, é importante restringir as doses de corretivos da acidez e de fertilizantes às indicadas nas Tabelas 3, 4, 6, 7 e 18.

Cultivo de trigo visando a cobertura do solo

Quando trigo é cultivado com o objetivo único de cobrir o solo por um manto de vegetação, não há necessidade de adubá-lo, pois estar-se-á apenas promovendo a ciclagem de nutrientes e evitando que o nitrato seja lixiviado. Porém, quando se deseja produzir elevadas quantidades de matéria seca e se os teores de P e de K no solo forem baixos, convém adubar a cultura com esses nutrientes. Quando o teor de MO é médio ou menor, e devido a deficiência de N ser muito comum no inverno, sugere-se aplicar 20 kg/ha em cobertura, especialmente quando o trigo é cultivado após milho. A quantidade de P e de K aplicada pode ser descontada da adubação da próxima cultura.

Cultivo de trigo para pastejo e produção de grãos

Quando o trigo é cultivado com o propósito de propiciar forragem para bovinos de corte ou de leite e, posteriormente, produção de grão (FONTANELI et al., 2006), o N removido pelo corte das plantas para produção de feno ou consumido pelos animais durante o pastejo deverá ser repostado antes ou logo após a presença dos animais. Visando assegurar adequada nutrição com relação a N e propiciar satisfatória produção de grão, sugere-se aplicar, em adição às doses sugeridas na Tabela 4, 1 kg N por cada 3 kg de ga-

nho de peso vivo animal/ha (HALVORSON et al., 1987), o que equivale a cerca de 30 kg de N por 100 kg de ganho de peso vivo/ha. Esta relação está baseada na concepção de que bovinos têm ganho de peso de 1 kg por cada 10 kg de matéria seca consumida e que o teor de N na matéria seca do trigo é cerca de 3%. Mas o teor de N nas plantas de trigo, na fase anterior ao alongamento, pode ser até 5% na matéria seca. Porém, dependendo do manejo do gado, parte do N ingerido pelos animais será retornada ao solo por meio da urina (principalmente na forma de ureia) e fezes, mas isso ocorre espacialmente de forma desuniforme, bem como a disponibilidade desse N é aleatória. Estima-se que, numa lotação de 2,5 animais/ha, a área coberta pelos dejetos de bovinos seja cerca de 1.000 m²/ano, ou seja, são necessários cerca de 10 anos para que toda área seja coberta com pelo menos uma deposição de urina ou de esterco (KING, 1990). Ocorrem também perdas por volatilização de amônia (NH₃) das fezes e da urina, a desnitrificação (N₂O, N₂) e a lixiviação de nitrato (NO₃⁻), principalmente nos locais de deposição de urina, em cujos sítios podem ser depositados centenas de kg de N/ha e volatilizado de 30% (temperatura baixa e ambiente úmido) a 70% (temperatura alta e ambiente seco). O N é o único elemento perdido desta forma (BALL et al., 2002). Em geral, quando há bom desenvolvimento do trigo, a disponibilidade de forragem é cerca de 1 t de matéria seca/ha na fase de pastejo (afilhamento), permitindo a alimentação de, no máximo, 10 animais adultos por hectare durante 10 dias. Quando o trigo é cultivado com o duplo propósito de fornecer forragem e grão, a semeadura deverá ser realizada em abril até início de maio, ou seja, 20 dias a 40 dias antes da época normal, empregando-se cultivares de ciclo tardio-precoces (sub-pe-

ríodo longo entre a semeadura e o espigamento e curto entre o espigamento e a maturação) e adequadas para essa finalidade. Dependendo da época de semeadura, o pastejo pode ser realizado até duas vezes, mas somente durante o estágio de afilamento (até 5 folhas), pois, após este estágio, a colheita maior de forragem não compensa a perda de rendimento de grão (ZAMBRANO, 1996). Cuidados devem ser tomados no tocante à lotação de animais, especialmente em dias de chuva, pois o excesso de pisoteio compacta sobremaneira o solo, dificultando a semeadura das culturas de verão. Em qualquer circunstância, o uso de haste sulcadora na semeadura das culturas de verão é quase sempre necessário em solo no qual houve pastejo.

Rotação de cereais de inverno com trigo

Em razão de as espécies cultivadas apresentarem diferentes graus de suscetibilidade a doenças, recomenda-se programar a alternância do cultivo de cereais de inverno na mesma gleba. Quanto às doenças do sistema radicular, as aveias branca e preta são pouco suscetíveis à podridão comum e são imunes ao ofióbulo (espiga branca, mal-do-pé ou podridão negra da raiz), enquanto trigo, cevada e tritcale são espécies suscetíveis a essas doenças e o azevém perpetua o mal-do-pé. Outras espécies não suscetíveis ao ofióbulo são: nabo forrageiro, ervilhaca, serradela, chícharo, tremoço e canola (REIS et al., 2001). A única prática eficaz para o controle de ofióbulo é a rotação de culturas ou a aração profunda (WIETHÖLTER, 1978). A rotação de espécies também favorece o controle de manchas foliares. Evitando-se o surgimento dessas doenças, a planta torna-se mais eficiente no uso de nutrientes existentes no solo ou aplicados através de fertilizante.

Cultivo intercalar entre culturas de verão e trigo

Em algumas regiões há um interstício de cerca de 70 a 90 dias entre a colheita das culturas de verão e a semeadura de cereais de inverno. Visando propiciar cobertura vegetal ao solo e ciclagem de nutrientes, mormente de N, recomenda-se o cultivo de espécies que apresentem rápido crescimento no outono. Por se tratar de um cultivo sem fim econômico direto, não há necessidade de aplicar fertilizantes. Entre as espécies mais propícias, o nabo forrageiro (*Raphanus sativum* L. var. *oleiferus*) apresenta crescimento inicial rápido, e tem proporcionado aumento no rendimento de trigo em níveis superiores ao custo da prática, podendo agregar, em equivalência de fertilizante, cerca de 20 kg a 40 kg N/ha (WIETHÖLTER, 2002).

Região Centro-sul-brasileira de cultivo de trigo: Paraná (PR), São Paulo (SP) e Mato Grosso do Sul (MS)

Em termos gerais, as indicações técnicas dos estados do RS e SC aplicam-se aos demais estados. Por essa razão, os tópicos a seguir referem-se apenas aos diagnósticos e indicações específicos para cada estado ou região, relacionados à calagem, N, P, K, micronutrientes e cultivo de sequeiro e irrigado.

Calagem

Nos estados do PR, SP e MS, a dose de calcário é estimada em função da porcentagem de saturação do solo por cátions de reação básica (Ca, Mg e K). Conforme indicado na Equação [10], a necessidade de calagem (NC) é calculada em função da porcentagem de saturação por bases presente

no solo (V_1) e a que se deseja obter (V_2). Para fins de monitoramento do índice de acidez, recomenda-se analisar o solo a cada três anos.

Paraná

Indica-se calagem quando o valor da porcentagem de saturação por bases encontrado na análise do solo (V_1) for menor que 50%. A dose de corretivo de acidez é calculada para o solo atingir 60% (V_2) de saturação por bases, empregando a Equação [10].

O valor de H+Al, expresso em cmol/dm^3 , é calculado com as equações [20] e [21] (PAVAN et al., 1992):

a) para solo com teor de MO < 8,6%,

$$\text{H+Al} = e^{6,0687 - 0,7444 (\text{SMP})} \quad [20]$$

b) para solo com teor de MO > 8,6%,

$$\text{H+Al} = e^{6,9056 - 0,8824 (\text{SMP})} \quad [21]$$

c) para solos arenosos da formação Caiuá – Noroeste do Estado do Paraná (SAMBATTI et al., 2003) e com menos de 20% de argila:

$$\text{H+Al} = 20,1925 - 2,6484 (\text{SMP}) \quad [22]$$

A máxima saturação por bases a atingir nesses solos é 50%. Este grupo de solos não é indicado para cultivo intensivo, em razão de sua elevada suscetibilidade à erosão (TECNOLOGIAS..., 2006).

São Paulo

Para cultivares sensíveis à acidez indica-se calagem para elevar a saturação por bases a 70%. Para cultivares tolerantes à acidez (IAC 24 e IAC 120), a dose de cor-

retivo pode ser calculada para elevar a saturação por bases a 60%, empregando-se a Equação [10].

O valor de H+Al é obtido pela seguinte equação (RAIJ; QUAGGIO, 1983):

$$\text{H+Al} = e^{7,76 - 1,053 (\text{SMP})} \quad [23]$$

Mato Grosso do Sul

Indica-se aplicar corretivo de acidez quando a porcentagem de saturação por Al (m) da CTC efetiva for superior a 10%, sendo esta calculada como segue:

$$m = \frac{\text{Al}}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Al}} \times 100 \quad [24]$$

Al, Ca, Mg e K são expressos em cmol/dm^3 de solo.

A necessidade de corretivo de acidez, em t/ha, é calculada por meio da seguinte equação:

$$\text{NC} = \text{Al} \times 2 \times f \quad [25]$$

$$\text{sendo } f = 100/\text{PRNT} \quad [26]$$

A constante 2 da Equação [25] é denominada “fator de calagem”. Este fator é derivado da equivalência numérica existente entre a quantidade de base química existente em 1 t/ha de CaCO_3 (corretivo de referência) e 1 $\text{cmol}_c \text{ Al}/\text{dm}^3$ de solo (= 1 meq Al/100 g de solo). O procedimento, teoricamente, é correto conquanto somente o Al estaria sendo neutralizado. Devido às imperfeições de incorporação do calcário ao solo e outros fatores, entre os quais tempo de reação do corretivo, é necessário aplicar uma quantidade maior que o valor teórico. No caso da Equação [25], emprega-se o fator de calagem 2 em vez de 1,

atingindo-se, na prática de campo, a neutralização desejada. O critério do alumínio para determinar a necessidade de calagem é adequado para solos em que a demanda de calcário é baixa (RAIJ, 2011).

Se a soma de Ca e Mg for inferior a 2 cmol_c/dm³, a necessidade de corretivo é calculada pela seguinte equação:

$$NC = [(Al \times 2) + 2 - (Ca + Mg)]f$$

[27]

No caso da análise de solo fornecer o teor de acidez potencial (H+Al), a necessidade de corretivo pode ser calculada por meio do método da saturação por bases. Usando esse critério, aplica-se corretivo quando a porcentagem de saturação por bases for inferior a 50%, calculando-se a quantidade de corretivo para atingir 60%, conforme a Equação [10]. O teor de H+Al é calculado no Estado do Mato Grosso do Sul pela seguinte equação (MAEDA et al., 1997):

$$H+Al = e^{8,085 - 1,062(SMP)}$$

[28]

No Estado do Mato Grosso do Sul e também na região do Cerrado, diversas formas de cálculo da necessidade de calagem têm sido usadas (SOUSA; LOBATO, 2002c; REUNIÃO..., 2001), envolvendo os teores de Al, Ca, Mg, argila e a CTC. No Cerrado, indica-se elevar a saturação por bases a 50% para cultivo de trigo em sequeiro, e 60%, quando irrigado (SOUSA; LOBATO, 2002c). Conforme Sousa et al. (1989), o teor de H+Al nos solos do

Cerrado pode ser calculado com a seguinte equação:

$$H+Al = e^{7,719 - 1,068(SMP)}$$

[29]

Nitrogênio no Paraná

A aplicação de N deverá ser parcelada, aplicando-se parte na linha de semeadura, ao lado e abaixo da semente, e o restante em cobertura a lanço, por ocasião do afilhamento. As doses mais elevadas indicadas na Tabela 14 devem ser usadas somente em cultivares resistentes ao acamamento e que apresentem alto potencial de rendimento.

Fósforo e potássio no Paraná

Os critérios de interpretação dos teores de P e de K na análise de solo e as doses de P₂O₅ e K₂O a aplicar constam na Tabela 15.

Enxofre e micronutrientes no Paraná

A exemplo de P e de K, o grau de disponibilidade de S e de micronutrientes pode ser avaliado pela análise do solo ou pelo tecido foliar. Em geral, os solos do Paraná apresentam adequada disponibili-

Tabela 14. Doses de N para trigo em função da cultura precedente - Paraná.

Cultura anterior	Semeadura	Cobertura
----- kg N/ha -----		
Soja	10 - 30	30 - 60
Milho	25 - 50	30 - 90

Fonte: Reunião... (2008).

Tabela 15. Teores de P e de K no solo e respectivas doses de P₂O₅ e de K₂O para a cultura de trigo – Paraná.

Teor no solo ⁽¹⁾	P, mg/dm ³	kg P ₂ O ₅ /ha	K, cmol _c /dm ³	kg K ₂ O/ha
Muito baixo/baixo	< 5	60 - 90	< 0,1 ⁽²⁾	60 - 80
Médio	5 - 9	40 - 60	0,1 - 0,3	40 - 60
Alto/muito alto	> 9	20 - 40	> 0,3	30 - 40

⁽¹⁾Extrator de Mehlich-1 para P e K. ⁽²⁾cmol_c K/dm³ x 391 = mg K/dm³.

Fonte: Reunião... (2008).

dade de enxofre, boro, cobre, zinco e manganês, não sendo esperados acréscimos de rendimento com a aplicação de fertilizantes contendo esses nutrientes. No entanto, ao ser constatado teor insuficiente no solo, esses nutrientes podem ser aplicados, em doses normalmente recomendadas para outras culturas de lavoura (Tabela 18). Porém, seu uso deve ser criterioso, não sendo necessária sua aplicação em cada safra.

Os teores de S, para solos argilosos e arenosos, considerados suficientes, constam na Tabela 16.

Considerando que o grão de trigo contém cerca de 0,2% de S (Tabela 12), a demanda de aplicação de S é pequena. Os fertilizantes que contém S constam na Tabela 8.

Para os demais micronutrientes (B, Cu, Mn e Zn), a interpretação dos teores no solo, para os solos do Estado do Paraná, consta na Tabela 17.

As quantidades usualmente indicadas de micronutrientes, em qualquer região de cultivo de trigo, são as que constam

na Tabela 18. É importante considerar que a aplicação de micronutrientes nem sempre confere resposta da cultura do trigo e, em adição, uma única aplicação pode conferir disponibilidade adequada por 4 a 5 anos (TECNOLOGIAS..., 2008), pois a exportação desses nutrientes pelos grãos é pequena (Tabela 12). A adubação com boro em cada safra, mormente na região do Cerrado, talvez tenha mais chances de resposta em rendimento de grão do que qualquer um dos demais micronutrientes, devido ao efeito positivo no tocante ao controle do chochamento do grão de trigo, um processo decorrente da esterilidade do pólen, causada concomitantemente por baixa umidade e temperatura elevada do ar (GALRÃO, 1988).

Ainda deve ser levado em consideração que adubos orgânicos, calcário e fertilizantes contêm micronutrientes. Na prática, com base no teor usual de micronutrientes em adubos orgânicos (MANUAL..., 2004), a aplicação de 5 t/ha aporta, no mínimo, 50 g de qualquer micronutriente.

Tabela 16. Teor suficiente de enxofre no solo - Paraná.

Profundidade, cm	mg S/dm ³	
	Solo argiloso (> 40% de argila)	Solo arenoso (< 40% de argila)
0 - 20	> 10	> 3
20 - 40	> 20	> 9

Fonte: Oliveira et al. (2008).

Tabela 17. Interpretação dos teores de micronutrientes no solo - Paraná.

Teor no solo	Métodos							
	Água quente	Mehlich-1				DTPA		
	B	Cu	Mn	Zn	Cu	Fe	Mn	Zn
-----mg/dm ³ -----								
Baixo	< 0,3	< 0,8	< 15	< 0,8	< 0,5	< 5	< 1,2	< 0,5
Médio	0,3 - 0,5	0,8 - 1,7	15 - 30	0,8 - 1,5	0,5 - 1,1	5 - 12	1,2 - 5	0,5 - 1,1
Alto	> 0,5	1,8 - 10	31 - 100	1,6 - 10	1,2 - 7	> 12	6 - 20	1,2 - 10
Muito alto	-	> 10	> 100	> 10	> 7	-	> 20	> 10

Fonte: Oliveira et al. (2008).

Nitrogênio em São Paulo

No Estado de São Paulo, a adubação nitrogenada é baseada na expectativa de resposta da cultura em relação ao tipo de manejo dado à água na cultura do trigo (sequeiro ou irrigado) e ao histórico de cultivo da gleba. Há três tipos de resposta ao aporte de N (RAIJ et al., 1996):

- a) **alta resposta**, cultivares de porte baixo, solo com pH corrigido e com teor satisfatório de P e de K, cultivo de gramíneas ou culturas não fixadoras de N, solo arenoso e solo com adoção recente do sistema plantio direto;
- b) **média resposta**, solo ácido e no qual far-se-á calagem, cultura precedente fi-

Tabela 18. Adubação com micronutrientes em trigo, em função do teor no solo, para qualquer região.

Teor no solo	B	Cu	Mn	Zn
	kg/ha			
Baixo	1,5	2,5	6,0	6,0
Médio	1,0	1,5	4,0	5,0
Alto	0,5	0,5	2,0	4,0
Muito alto	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Oliveira et al. (2008).

Tabela 19. Adubação nitrogenada na semeadura e em cobertura, de acordo com a expectativa de rendimento de trigo - São Paulo.

Rendimento t/ha	Na semeadura	Classe de resposta a N em cobertura		
		Alta	Média	Baixa
Sequeiro	kg N/ha			
1 - 2	20	20	0	0
2 - 3	30	40	20	0
Irrigado				
2,5 - 3,5	20	60	40	20
3,5 - 5,0	30	90	50	20

Fonte: Raij et al. (1996); Reunião... (2008).

Tabela 20. Adubação com P, K e S na semeadura, de acordo com a expectativa de rendimento de trigo e o teor de P e de K no solo - São Paulo.

Rendimento t/ha	P no solo (resina), mg/dm³				K no solo (resina), mmol/dm³				S
	0 - 6	7 - 15	16 - 40	> 40	0 - 0,7	0,8 - 1,5	1,6 - 3,0	> 3,0	
Sequeiro ⁽¹⁾	P ₂ O ₅ , kg/ha				K ₂ O, kg/ha				kg/ha
1 - 2	80	50	30	20	40	30	20	10	10
2 - 3	90	60	40	20	60	40	20	10	10
Irrigado ⁽¹⁾									
2,5 - 3,5	80	60	40	20	60	40	20	10	20
3,5 - 5,0	90	60	40	20	90	60	40	20	20

⁽¹⁾Em solo com teor baixo de Zn (método DTPA < 0,6 mg/dm³), aplicar 3 kg Zn/ha. Em solo com teor baixo de B (água quente, < 0,3 mg/dm³), aplicar 1 kg B/ha. DTPA = ácido dietilenotriaminopentacético = C₁₄H₂₃N₃O₁₀⁻. (mmol_e K/dm³)/10 = cmol_e K/dm³.

Fonte: Raij et al. (1996); Reunião... (2008); Tecnologias... (2008).

xadora de N, ou solo em pousio por um ano;

- c) **baixa resposta**, cultivar de porte alto, solo em pousio por dois ou mais anos, cultura precedente fixadora de N ou solo cultivado com espécie destinada à adubação verde.

A estratificação dos tipos de solo e das condições de cultivo acima são bastante semelhantes às da Tabela 4. As doses de N a serem aplicadas em cobertura, para as diferentes situações de cultivo, constam na Tabela 19.

A adubação de cobertura deve ser realizada entre 30 dias a 40 dias após a emergência. No caso de lavoura irrigada, dose maior que 40 kg/ha pode ser parcelada, especialmente em solo arenoso, sendo a primeira parte aplicada 30 dias após a emergência e o restante 20 dias após. Em solo com déficit hídrico, pode não haver resposta à aplicação de N em cobertura. A aplicação de N na semeadura deve ser feita juntamente com P e K (Tabela 20).

Fósforo, potássio e enxofre em São Paulo

No Estado de São Paulo, o trigo é cultivado em sistema sequeiro e irrigado e as indicações de adubação são baseadas em faixas de expectativa de rendimento. As doses de P, K e S recomendadas constam na Tabela 20. Emprega-se o método da resina na extração de P e K.

Região Centro Brasileira de cultivo de trigo: Distrito Federal (DF), Goiás (GO), Minas Gerais (MG), Mato Grosso (MT) e Bahia (BA)

Calagem

Nestes estados, considera-se o teor de argila para calcular a dose de corretivo (REUNIÃO... 2008). Para solos com mais de

20% de argila, emprega-se a Equação [27]. Já para solos arenosos e com teor de argila menor que 20%, empregam-se as equações [25] ou [30].

$$NC = [2 - (Ca + Mg)]f \quad [30]$$

Outro procedimento empregado nestes estados é realizar calagem quando a saturação por bases for inferior a 50%, calculando-se a dose pela seguinte equação:

$$NC = [(CTC \times 0,5) - S]f \quad [31]$$

$$\text{Sendo } S = Ca + Mg + K \quad [32]$$

Para lavouras irrigadas, a dose é calculada pela seguinte equação:

$$NC = [(CTC \times 0,6) - S]f \quad [33]$$

Com base no exposto, em termos gerais, recomenda-se calagem para o cultivo de trigo quando o valor da saturação por bases encontrado na análise do solo (V_1) for menor que 50%. Para lavoura de sequeiro, ajusta-se a porcentagem de saturação por bases para 50% e, para lavoura irrigada, para 60%. Quando é cultivada uma cultivar de trigo sensível ao Al, a porcentagem de saturação da CTC efetiva por este elemento (Equação [24]), em qualquer camada de solo, não deveria exceder a 5%.

No sistema plantio direto, tanto sob cultivo sequeiro como irrigado, a reaplicação de calcário deve ser feita a lanço e sem incorporação ao solo. No sistema convencional de preparo do solo, o corretivo deve ser incorporado com arado e grade de disco.

Devido ao usual baixo teor de Mg dos solos da região do Cerrado, recomenda-se que seja usado, preferencialmente, calcário dolomítico.

Acidez do subsolo – gessagem

Para minimizar o efeito da acidez sub-superficial do solo, sugere-se amostrar o solo nas camadas 20-40 cm e 40-60 cm de profundidade. Se a saturação da CTC efetiva por Al for maior que 20% e o teor de Ca inferior a 0,5 cmol_c/dm³ em qualquer uma dessas camadas, há possibilidade de resposta à aplicação de gesso. A dose a aplicar varia em relação à textura do solo: 700 kg/ha, 1.200 kg/ha, 2.200 kg/ha e 3.200 kg/ha para solo arenoso (< 15% de argila), médio (16% a 35% de argila), argiloso (36% a 60% de argila) e muito argiloso (> 60% de argila), respectivamente (REUNIÃO..., 2008; VITTI et al., 2008). A necessidade de gesso (NG) também pode ser estimada em função do conteúdo de argila da camada superficial do solo, empregando a seguinte equação (SOUSA; REIN, 2009):

NG (kg/ha) = % de argila x 50, [34]

ou seja, a dose máxima é 5 t/ha. O efeito residual do gesso no solo perdura, a exemplo do calcário, por vários anos.

Nitrogênio, fósforo e potássio em solo do Cerrado

A interpretação dos teores de P e de K, extraídos pelo método de Mehlich-1 para solo do Cerrado, consta nas tabelas 21 e 22, respectivamente, para sistema de cultivo sequeiro e irrigado.

As doses de N, P₂O₅ e K₂O a aplicar em função da expectativa de rendimento e dos teores de P e de K no solo constam na Tabela 23. A aplicação de N em cobertura deverá ser realizada no estágio de afilhamento, cerca de 14 dias após a emergência das plantas de trigo, pois o crescimento da fa-

Tabela 21. Interpretação do teor de P para solos do Cerrado em sistema de cultivo sequeiro.

Interpretação do teor de P no solo	Argila, %			
	> 60	36 - 60	16 - 35	≤ 15
	----- mg P/dm ³ -----			
Muito baixo	≤ 2,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 6,0
Baixo	2,1 - 3,0	3,1 - 5,0	5,1 - 10,0	6,1 - 12,0
Médio	3,1 - 4,0	5,1 - 8,0	10,1 - 15,0	12,1 - 18,0
Adequado	4,1 - 6,0	8,1 - 12,0	15,1 - 20,0	18,1 - 25,0
Alto	> 6,0	> 12,0	> 20,0	> 25,0

Fonte: Sousa et al. (2002a).

Tabela 22. Interpretação do teor de P para solos do Cerrado em sistema de cultivo irrigado.

Interpretação do teor de P no solo	Argila, %			
	> 60	36 - 60	16 - 35	≤ 15
	----- mg P/dm ³ -----			
Muito baixo	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 10,0	≤ 12,0
Baixo	3,1 - 4,0	5,1 - 8,0	10,1 - 15,0	12,1 - 18,0
Médio	4,1 - 6,0	8,1 - 12,0	15,1 - 20,0	18,1 - 25,0
Adequado	6,1 - 9,0	12,1 - 18,0	20,1 - 35,0	25,1 - 40,0
Alto	> 9,0	> 18,0	> 35,0	> 40,0

Fonte: Sousa et al. (2002a).

se inicial da cultura é muito rápido. Nas lavouras onde não se prevê irrigação, o N também pode ser aplicado integralmente na semeadura, pois é comum não ocorrer chuva em quantidade adequada para a dissolução do fertilizante deixado na superfície do solo e, dessa forma, não haver efeito da aplicação de N. Em áreas com sucessivo cultivo de soja, a dose de N pode ser reduzida em 40%. Em área recém desbravada, a dose de N pode ser aumentada em 20%. No caso de cultivares de baixa resistência do colmo ao acamamento, a dose total não deve ser superior a 60 kg/ha.

Enxofre e micronutrientes em solo do Cerrado

Devido à deficiência natural dos solos do Cerrado em S, no caso em que ainda não tenha sido feita gessagem da área, recomenda-se aplicar 10 kg S/ha para lavoura de sequeiro e 20 kg S/ha para lavoura irrigada, em cada cultivo.

A interpretação dos teores de micronutrientes em solos do Cerrado consta nas tabelas 24 e 25. A adubação corretiva com micronutrientes geralmente é necessária para obter bons rendimentos em áreas novas.

Tabela 23. Doses de N, P_2O_5 e K_2O a aplicar para trigo no Cerrado.

Expectativa de rendimento ⁽¹⁾	N		Teor de P no solo		Teor de K no solo	
	Base	Cobertura	≤ Adequado	Alto	≤ Adequado	Alto
----- t/ha -----	----- kg/ha -----		----- kg P_2O_5 /ha -----		----- kg K_2O /ha -----	
3	20	10	60	30	30	15
4	20	40	70	35	40	20
5	20	70	80	40	50	25

⁽¹⁾Quando a expectativa de rendimento for inferior a 3 t/ha, usar somente as doses de P_2O_5 e K_2O indicadas para adubação corretiva (SOUSA; LOBATO, 2002b; VILELA et al., 2002).

Fonte: Sousa e Lobato (2002b).

Tabela 24. Interpretação dos teores de micronutrientes em solos do Cerrado.

Teor no solo	B	Cu	Mn	Zn
	----- mg/dm ³ -----			
Baixo	≤ 0,2	≤ 0,4	≤ 1,9	≤ 1,0
Médio	0,3 - 0,5	0,5 - 0,8	2,0 - 5,0	1,1 - 1,6
Alto	> 0,5	> 0,8	> 5,0	> 1,6

B extraído com o método da água quente e Cu, Mn e Zn extraídos com o método Mehlich-1, na relação solo:solução 1:10 e com cinco minutos de agitação.

Fonte: Galvão (2002).

Tabela 25. Interpretação dos teores de micronutrientes em solo, determinados pelo método do DTPA.

Teor no solo	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- mg/dm ³ -----			
Baixo	≤ 0,2	≤ 4,0	≤ 1,2	≤ 0,5
Médio	0,3 - 0,8	5,0 - 12,0	1,3 - 5,0	0,6 - 1,2
Alto	> 0,8	> 12,0	> 5,0	> 1,2

Fonte: Raij et al. (1996).

Quando as análises dos micronutrientes são realizadas mediante o agente quelante DTPA, a interpretação dos teores pode ser feita com base na Tabela 25, que é também usada no Estado de São Paulo.

Resumo

A cultura do trigo tem importância econômica em 9 estados brasileiros (RS, SC, PR, SP, MS, GO, MG, MT e BA) e no Distrito Federal. O manejo da fertilidade do solo diferencia-se entre as regiões em alguns aspectos, sendo a calagem e a adubação práticas comuns em razão da deficiência usual dos solos em termos de pH e conteúdo de nutrientes. A gessagem é prática usada, ocasionalmente, em solos do Cerrado. No tocante a N, na Região Sul, em função do clima úmido e frio, os solos geralmente apresentam deficiência nesse nutriente, sendo a adubação com N, na base e em cobertura, uma prá-

tica usual e de expressivo efeito no rendimento de grão. Já nas regiões em que a irrigação é indispensável para a obtenção de rendimentos satisfatórios, a adubação com N é imprescindível. Apenas nas regiões do Brasil Central, e no sistema sequeiro de cultivo, a adubação com N necessita ser feita por ocasião da semeadura, não havendo, usualmente, em virtude da deficiência hídrica, resposta à aplicação em cobertura, levando-se em consideração os baixos rendimentos obtidos. Quanto a P e K, a adubação com esses nutrientes depende da reserva do solo, sendo a quantidade função da expectativa de rendimento e de características químicas do solo. A adubação com micronutrientes não é comum na região sul do país em razão do suprimento natural do solo atender à demanda do trigo. Já na região do Brasil Central, a aplicação de S e de micronutrientes pode ser necessária.

Referências

- ABRÃO, J. R. Avaliação preliminar da eficiência da adubação foliar em trigo. **Trigo e Soja**, Porto Alegre, v. 2, n. 14, p. 9-11, 1976.
- ABRÃO, J. R. Considerações sobre métodos de aplicação e incorporação de calcário em cultivos anuais. **Trigo e Soja**, Porto Alegre, v. 38, p. 3-19, 1979.
- ALDRICH, S. R.; SCOTT, W. O.; HOEFT, R. G. **Modern corn production**. Champaign: A & L Publications, 1986. 358 p.
- AQUINO, B. F. A produção de bioenergia: culturas, solos e meio ambiente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 22-25, 2009.
- ARAÚJO, J. E. G. A reação do solo - sua possível influência no "crestamento" do trigo. **Agros**, Pelotas, v. 1, n. 2, p. 81-94, 1948.
- ARAÚJO, J. E. G. Comunicações complementares a respeito do problema do "crestamento" do trigo. **Archivo Fitotécnico del Uruguay**, v. 4, p. 377-386, 1951.
- ARAÚJO, J. E. G. O alumínio trocável, possível causa do crestamento do trigo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2., 1949, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1949. p. 328-337.
- BALL, D. M.; HOVELAND, C. S.; LACEFIELD, G. D. **Southern forages - modern concepts for forage crop management**. Norcross: Potash & Phosphate Institute, 2002. 322 p.
- BARBER, S. A. Chemistry of soil-nutrient interactions and future agricultural sustainability. In: HUANG, P. M.; SPARKS, D. L.; BOYD, S. A. **Future prospects for soil chemistry**. Madison: Soil Science Society of America, 1998. p. 179-189. (Special publication, 55).
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2. ed. New York: John Wiley, 1995. 414 p.
- BARBOSA FILHO, M. P.; CANTARELLA, H.; WIETHÖLTER, S. Arroz, milho e trigo. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B.; ABREU, C. A. **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq: FAPESP: POTAFOS, 2001. p. 285-318.
- BEN, J. R.; DECHEN, A. R. Comportamento de genótipos de trigo em relação a fósforo no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 77-82, 1996.
- BERGH, R.; ZAMORA, M.; SEGHEZZO, M. L.; MOLFESE, E. Fertilización nitrogenada foliar en trigo en el centro-sur de la Provincia de Buenos Aires. **Informaciones Agronómicas**, Acassuso, n. 19, p. 15-21, 2003.
- BERGMANN, W. **Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen - Entstehung und Diagnose**. Jena: VEB Gustav Fisher Verlag, 1983. 614 p.
- BLACK, C. A. **Soil fertility evaluation and control**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. 746 p.
- BOLLER, W. Máquinas para distribuição de calcário. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 111, p. 26-33, 2009.
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; MANTOVANI, A. Disponibilidade de zinco e cobre em diferentes sistemas de preparo do solo. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 116, p. 26-28, 2010.
- BRASIL. Instrução Normativa nº 27, de 5 de junho de 2006. Dispõe sobre fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes, para serem produzidos, importados ou comercializados, deverão atender aos limites estabelecidos nos Anexos I, II, III, IV e V desta Instrução Normativa no que se refere às concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 9 jun. 2006a. Seção 1, p. 15.
- BRASIL. Instrução Normativa nº 35, de 4 de julho de 2006. Dispõe sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 12 jul. 2006b. Seção 1, p. 32.
- BREDEMEIER, C. Trigo. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. V. 3, p. 137-159.
- BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. Estádios fenológicos do trigo para a adubação nitrogenada em cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 317-323, 2001.
- CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 27-34, 1998.
- CALIFORNIA FERTILIZER ASSOCIATION. **Western fertilizer handbook**. Sacramento, 1980. 269 p.
- CARVALHO, J. G.; BASTOS, A. R. R.; ALVARENGA, M. A. R. Nutrição mineral e adubação. In: ALVARENGA, M. A. R. **Tomate: produção em campo, em casa-de-vegetação e em hidroponia**. Lavras: Ed. UFLA, 2004. p. 61-120.

- CASTRO, A. F.; MENEGHELLI, N. A. As relações K/(Ca+Mg)^{3/2} e K/(Ca+Mg) no solo e as respostas à adubação potássica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 24, n. 6, p. 751-760, 1989.
- DABBERT, S. **Ökonomik der Bodenfruchtbarkeit**. Hohenheim: Eugen Ulmer, 1994. 201 p.
- ERNANI, P. R. Adubação foliar. In: FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. Guarapuava: FAPA, 2006. p. 151-160.
- FIXEN, P. E. Reservas mundiais de nutrientes dos fertilizantes. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 126, p. 8-14, 2009a.
- FIXEN, P. E. World fertilizer nutrient reserves – a view to the future. **Better Crops with Plant Food**, Norcross, v. 93, n. 3, p. 8-11, 2009b.
- FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; PIRES, J. L. F.; RODRIGUES, O. Estabelecimento e manejo de cereais de inverno de duplo propósito. In: SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S. **Cereais de inverno de duplo propósito para a integração lavoura-pecuária no Sul do Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. p. 15-35.
- FURLANI, A. M. C.; CARVALHO, C. P.; FREITAS, J. G.; VERDIAL, M. F. Wheat cultivar tolerance to boron deficiency and toxicity in nutrient solution. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 20, n. 2, p. 359-370, 2003.
- GALRÃO, E. Z. Micronutrientes. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. p. 185-226.
- GALRÃO, E. Z. Respostas das culturas aos micronutrientes boro e zinco. In: BORKERT, C. M.; LANTMANN, A. F. (Ed.). **Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira**. Londrina: EMBRAPA-CNPSo: IAPAR: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p. 205-237.
- GARCÍA, F. O.; BERARDO, A. Trigo. In: ECHEVERRÍA, H. E.; GARCÍA, F. O. **Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos**. Balcarce: Ediciones INTA, 2005. p. 233-253.
- GEARHART, M. M.; COLLAMER, D. J. **New acidification values change profile of ammonium sulfate**. Hopewell: Honeywell Resins & Chemicals, 2009. 5 p. Research Bulletin. Disponível em: <http://www51.honeywell.com/sm/sulfn/na/common/documents/soil_acidification_jan09.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2009.
- GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; TEDESCO, M. J. **Princípios de fertilidade de solo**. Porto Alegre: UFRGS - Faculdade de Agronomia - Departamento de Solos, 1995. 277 p.
- GLOBAL shortage of sulfuric acid contributes to rising fertilizer costs. **IFDC Report**, Muscle Shoals, v. 33, n. 3, p. 5, 2008.
- GOEDERT, W. Avanços e desafios em pesquisa, desenvolvimento e inovação em fertilidade do solo e nutrição mineral das plantas. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 33-37, 2006.
- GUIA practica para el cultivo del trigo. Buenos Aires: INTA, 1997. 182 p.
- GUPTA, U. C. Boron. In: BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. **Handbook of plant nutrition**. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 241-277.
- HALLIDAY, D. J.; TRENKEL, M. E.; WICHMANN, W. **IFA world fertilizer use manual**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 1992. 632 p.
- HALVORSON, A. D.; ALLEY, M. M.; MURPHY, L. S. Nutrient requirements and fertilizer use. In: HEYNE, E. G. **Wheat and wheat improvement**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy - Crop Science Society of America - Soil Science Society of America, 1987. p. 345-383.
- HAMLING, R. L. Molybdenum. In: BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. **Handbook of plant nutrition**. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 275-394.
- HAUN, J. R. Visual quantification of wheat development. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, n. 1, p. 116-119, 1973.
- JONES, C. A.; SHARPLEY, A. N.; WILLIAMS, J. R. Modeling phosphorus dynamics in the soil-plant system. In: HANKS, J.; RITCHIE, J. T. **Modeling plant and soil systems**. Madison: American Society of Agronomy, 1991. p. 323-339.
- KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; BARTZ, H. R.; GATIBONI, L. C.; BISSANI, C. A.; ESCOSTEGUY, P. A. V. Proposta de nova equação para determinação do valor de H+Al pelo uso do índice SMP em solos do RS e de SC. In: REUNIÃO ANUAL DA REDE OFICIAL DE LABORATÓRIOS DE ANÁLISE DE SOLO E DE TECIDO VEGETAL DOS ESTADOS DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA, 33., 2001, Frederico Westphalen. **Anais...** Frederico Westphalen: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul - Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo e de Tecido Vegetal dos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, 2001. p. 21-26.
- KING, L. D. Sustainable soil fertility practices. In: FRANCIS, C. A.; FLORA, C. B.; KING, L. D. **Sustainable agriculture in temperate zones**. New York: John Wiley, 1990. p. 144-177.
- KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminium toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 46, p. 237-260, 1995.
- KWON, H.; HUDSON, R. J. M.; MULVANEY, R. L. Characterization of the organic nitrogen fraction determined by the Illinois soil nitrogen test. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 3, p. 1033-1043, 2009.

- LÆGREID, M.; BØCKMAN, O. C.; KAARSTAD, O. **Agriculture, fertilizers and environment**. Cambridge: CABI Publishing, 1999. 294 p.
- LALOUX, R.; FALISSE, A.; POELAERT, J. Nutrition and fertilization of wheat. In: HÄFLIGER, E. **Wheat documenta**. Basle: Ciba-Geigy, 1980. p. 19-24.
- LANTMANN, A. F.; CASTRO, C.; WIETHÖLTER, S. O potássio na cultura do trigo. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 723-744.
- LEMOES, R. C.; ABRÃO, P. U. R.; AZOLIN, M. A. D.; CARVALHO, A. P.; SANTOS, M. C. L. **O solo na cultura do trigo no Brasil**. Rio de Janeiro: Serviço de Informação Agrícola, 1967. 80 p. (Estudos técnicos, 37).
- LOPES, A. S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: ANDA, 2004. 110 p.
- LORENZ, O. A.; MAYNARD, D. N. **Knott's handbook for vegetable growers**. 3. ed. Wiley, 1988. 456 p.
- MAEDA, S.; KURIHARA, C. H.; HERNANI, L. C.; FABRÍCIO, A. C.; SILVA, W. M. Estimativa da acidez potencial de solos do Mato Grosso do Sul pelo método do pH SMP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro: SBCS, 1997. p. 184.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201 p.
- MANUAL de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10 ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul - Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 400 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1995. 889 p.
- MENEZES, G. B.; BREDEMEIER, C. MUNDSTOCK, C. M.; GROHS, D. S. Variação do comportamento espectral em trigo ao longo do ciclo afetado pela disponibilidade de nitrogênio. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 2., 2008, Passo Fundo. **Ata e resumos...** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008. p. 1-3. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/rcbptt/2rcbptt/index.htm>>. Acesso em: 13 nov. 2009.
- MIELNICZUK, J. Adubação do trigo no Brasil. In: OSÓRIO, E. **Trigo no Brasil**. Campinas: Fundação Cargill, 1982. p. 291-317.
- MIELNICZUK, J. A calagem e a cultura do trigo. **Trigo e Soja**, Porto Alegre, v. 29, p. 10-15, 1978.
- MIRANDA, M. Z.; WIETHÖLTER, S.; NICOLAU, M.; GUARIENTI, E. M. **Qualidade tecnológica da cultivar BRS 194 cultivada após milho e soja, e adubada com diferentes doses de nitrogênio**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009a. 9 p.
- MIRANDA, M. Z.; WIETHÖLTER, S.; SCHEEREN, P. L.; CAIERÃO, E.; NICOLAU, M.; GUARIENTI, E. M. **Parâmetros de avaliação da qualidade tecnológica de trigo relacionados com doses de nitrogênio em cobertura**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009b. 5 p.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 92, p. 1-8, 2000. (Encarte técnico).
- MUNDSTOCK, C. M. **Planejamento e manejo integrado da lavoura de trigo**. Porto Alegre: Ed. Autor, 1999. 227 p.
- NAKAYAMA, L. H. I.; AOKI, R. T.; SANTOS, R. F.; FUJII, K.; AKAMINE, P. **Resposta do trigo ao fornecimento de nitrogênio em cobertura por pulverização foliar com solução de uréia**. Dourados: Embrapa UEPAE Dourados, 1984. p. 138-142. Relatório do Projeto 004.82.032-0.
- NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; SALET, R. L. Alternativa à coleta de uma secção transversal, com pá-de-corte, na largura da entrelinha, na amostragem do solo em lavouras com adubação na linha no sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 69, p. 22-28, 2002.
- NOSOV, V.; IVANOVA, S. Progress in wheat, sunflower, and sugarbeet cultivation in Russia. **Better Crops with Plant Food**, Norcross, v. 93, n. 3, p. 4-6, 2009.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa - Departamento de Solos, 1999. 399 p.
- OLIVEIRA, F. A.; CASTRO, C.; SFREDO, G. J.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA JUNIOR, A. **Fertilidade do solo e nutrição mineral da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2008. 8 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 62).
- PARNES, R. **Fertile soil – a grower's guide to organic & inorganic fertilizers**. Davis: AgAccess, 1990. 190 p.
- PAVAN, M. A. Mobilização orgânica do calcário no solo através de adubo verde. In: PAULETTI, V.; SEGANFREDO, R. **Plantio direto: atualização tecnológica**. São Paulo: Fundação Cargill: Fundação ABC, 1999. p. 45-52.
- PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Londrina: IAPAR, 1992. 39 p. (IAPAR. Circular, 76).
- PÖTTKER, D.; ROMAN, E. S. Efeito do nitrogênio em trigo cultivado após diferentes sucessões de culturas.

Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF, v. 33, p. 501-507, 1998. Número especial.

POZZAN, G. Panorama da adubação foliar: mercado, produção e logística. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 123, p. 11-12, 2008.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1996. 285 p. (IAC. Boletim técnico, 100).

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: IAC, 1983. 39 p. (IAC. Boletim técnico, 81).

RAMOS, M. Caracterização da curva de resposta do trigo à aplicação de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 16, n. 5, p. 611-615, 1981.

REIS, E. M.; CASA, R. T.; MEDEIROS, C. A. **Diagnose, patometria e controle de doenças de cereais de inverno**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2001. 94 p.

REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 2., 2008, Passo Fundo. **Informações técnicas para a safra 2009**: trigo e tritcale. Passo Fundo: Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale: Embrapa Trigo: Embrapa Transferência de Tecnologia, 2008. 172 p.

REUNIÃO DA COMISSÃO CENTRO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO, 11., 2000, Rio Verde. **Informações Técnicas para a cultura do trigo na região do Brasil central – safra 2001 e 2002**. Rio Verde: Universidade de Rio Verde, 2001. 69 p. (Documentos, 1).

REUTER, D. J. Temperate and sub-tropical crops. In: REUTER, D. J.; ROBINSON, J. B. **Plant analysis – an interpretation manual**. Melbourne: Intaka Press, 1986. p. 36-99.

RITCHIE, J. T. Climate and soil water. In: MURPHY, L. S.; DOLL, E. C.; WELCH, L. F. **Moving up the yield curve: advances and obstacles**. Madison: American Society of Agronomy - Crop Science Society of America - Soil Science Society of America, 1980. p. 1-23. (Special publication, 39).

RITCHIE, J. T. Wheat phasic development. In: HANKS, J.; RITCHIE, J. T. **Modeling plant and soil systems**. Madison: American Society of Agronomy, 1991. p. 31-54.

ROSA, O. S.; CAMARGO, C. E. O. Wheat breeding for better efficiency in phosphorus use. In: SAUNDERS, D. A. (Ed.). **Wheat for the non-traditional warm areas**. México: CIMMYT, 1991. p. 333-351.

SALET, L. R.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN, R. A. Atividade do alumínio na solução de solo do sistema plantio direto. **Revista Científica UNICRUZ**, Cruz Alta, v. 1, n. 1, p. 9-13, 1999.

SAMBATTI, J. A.; SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; TORMENA, C. A. Estimativa da acidez potencial pelo método do pH SMP em solos da formação Caiuá – Noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 257-264, 2003.

SANCHEZ, P. A. Changing tropical soil fertility paradigms: from Brazil to Africa and back. In: MONIZ, A. C.; FURLANI, A. M. C.; SCHAFFERT, R. E.; FAGERIA, N. K.; ROSOLEM, C. A.; CANTARELLA, H. **Plant-soil interactions at low-pH: sustainable agriculture and forestry production**. Viçosa: Brazilian Soil Science Society, 1997. p. 19-28.

SCHARF, P. C.; LORY, J. A. Calibrating reflectance measurements to predict optimal sidedress nitrogen rate for corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 3, p. 615-625, 2009.

SCHEEREN, P. L. **Informações sobre o trigo *Triticum spp.***. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1986. 34 p. (EMBRAPA-CNPT. Documentos, 2).

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 85-91, 2000.

SCHOMBERG, H. H.; WIETHÖLTER, S. GRIFFIN, T. S.; REEVES, D. W.; CABRERA, M. L. FISHER, D. S.; ENDALE, D. M.; NOVAK, J. M.; BALKCOM, K. S.; RAPER, R. L.; KITCHEN, N. R.; LOCKE, M. A.; POTTER, K. N.; SCHWARTZ, R. C.; TRUMAN, C. C.; TYLER, D. D. Assessing indices for predicting potential nitrogen mineralization in soils under different management systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 5, p. 1575-1586, 2009.

SHOEMAKER, H. E.; MCLEAN, E. O.; PRATT, P. F. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 25, p. 274-277, 1961.

SILLANPÄÄ, M. Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study. Rome: FAO, 1982. 444 p.

SIQUEIRA, O. J. F. **Adubação foliar em trigo**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1988. 48 p. (EMBRAPA-CNPT. Documentos, 10).

SIQUEIRA, O. J. F. Calagem para trigo no Brasil. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 15.; SIMPÓSIO SOBRE ACIDEZ E CALAGEM, 1982, Campinas. **Acidez e calagem no Brasil**. Campinas: Sociedade Brasileira e Ciência do Solo: Instituto Agrônomo, 1983. p. 187-215.

SIQUEIRA, O. J. F. Nutrição e adubação potássica do trigo no Brasil. In: YAMADA, T.; IGUE, K.; MUZILLI,

- O.; USHERWOOD, N. R. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1982. p. 449-486.
- SIQUEIRA, O. J. F. Resposta das culturas à calagem e a fósforo em solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina e seus reflexos técnico-econômicos. In: KAMINSKI, J.; VOLKWEISS, S. J.; BECKER, F. C. **Corretivos da acidez do solo**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria – Centro de Ciências Rurais, 1989. p. 151-176.
- SIQUEIRA, O. J. F.; SCHOLLES, D.; BARTZ, H. R. Resposta do trigo à aplicação de fertilizantes foliares. In: REUNIÃO ANUAL CONJUNTA DE PESQUISA DE TRIGO, 9., 1977, Londrina. **Solos e técnicas culturais**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1977. v. 2, p. 30-39.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. Washington: USDA-NRCS, 2010. 338 p.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002a. p. 147-168.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002b. 416 p.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002c. p. 81-96.
- SOUSA, C. N. A. **Cultivares de trigo recomendadas no Brasil - 1922 a 1992**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1994. 82 p. (EMBRAPA-CNPT. Documentos, 16).
- SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; LOBATO, E.; CASTRO, L. H. R. Métodos para determinar as necessidades de calagem em solos dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 193-198, 1989.
- SOUSA, D.M.G.; REIN, T.A. Manejo da fertilidade do solo para culturas anuais: experiências no Cerrado. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 126, p. 1-7, 2009.
- STRADA, R. A.; ECHEVERRÍA, H. E.; STUDDERT, G. A. Relaciones entre la producción de grano y la concentración de nitratos en los seudo tallos de variedades de trigo. **Ciencia del Suelo**, Buenos Aires, v. 18, n. 1, p. 64-68, 2000.
- STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters**. New York: John Wiley, 1981. 780 p.
- TECNOLOGIAS de produção de soja - Paraná 2007. Londrina: Embrapa Soja, 2006. 217 p. (Embrapa Soja. Sistemas de produção, 10).
- TECNOLOGIAS de produção de soja - região central do Brasil 2009 e 2010. Londrina: Embrapa Soja; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2008. 262 p. (Embrapa Soja. Sistemas de produção, 13).
- VILELA, L.; SOUSA, D. M. G.; SILVA, J. E. Adubação potássica. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. p. 169-183.
- VITTI, G. C.; LEITE, F. F.; PRIORI, J. C.; AQUILANTE, B. P. Manejo para aumento da eficiência da adubação. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 107, p. 38-42, 2008.
- VIVANCOS, A. D. **Tratado de fertilización**. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1997. 613 p.
- WALLACE, A. Crop improvement through multidisciplinary approaches to different types of stresses – law of the maximum. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 13, n. 3/4, p. 313-325, 1990.
- WALLACE, A. The law of the maximum. **Better Crops**, Norcross, v. 77, n. 2, p. 20-22, 1993.
- WESTFALL, D. G.; WHITNEY, D. A.; BRANDON, D. M. Plant analysis as an aid in fertilizing small grains. In: WESTERMAN, R. L. **Soil testing and plant analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p. 495-519.
- WIETHÖLTER, S. **Calagem no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 104 p. (Embrapa Trigo. Documentos, 22).
- WIETHÖLTER, S. Cultivo intercalar de nabo forrageiro entre milho e trigo e resposta de trigo a nitrogênio. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 4., 2002, Porto Alegre. **Solos e qualidade ambiental: resumos expandidos**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul; UFRGS - Departamento de Solos, 2002. 3 p. 1 CD-ROM.
- WIETHÖLTER, S. Fósforo no solo e a cultura do trigo. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004. p. 457-494.
- WIETHÖLTER, S. **Índices de disponibilidade de nitrogênio no solo no sistema plantio direto para cereais de inverno e milho**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2003. 98 p. Relatório técnico final do Subprojeto 04.1999.360.01 vinculado ao Projeto Manejo do nitrogênio no sistema plantio direto. Não publicado.
- WIETHÖLTER, S. Limitações no uso da relação K/(Ca+Mg)^{1/2} no solo na recomendação de potássio. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 25., 1997, Passo Fundo. **Ata e resumos...** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1997. p. 136.
- WIETHÖLTER, S. **Parâmetros de difusão de potássio no solo - relatório de andamento do período de setembro de 1990 a março de 1992**. Passo Fundo:

EMBRAPA-CNPq; Brasília, DF: CNPq, 1992. 142 p.

WIETHÖLTER, S. **Pousio e lavra profunda e seu efeito na ocorrência de mal-do-pé em trigo**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPq, 1978. 13 p.

WIETHÖLTER, S.; PERUZZO, G.; TOMM, G. O. Efeito da matéria orgânica do solo e da cultura precedente na resposta do trigo à aplicação de nitrogênio no sistema plantio direto. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2., 1998, Santa Maria.

Resumos expandidos... Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1998. p. 1-4. 1 CD-ROM.

WIETHÖLTER, S.; SCHEEREN, P. L.; CAIERÃO, E.; GUARIENTI, E. M.; SILVA JUNIOR, J. P. Efeito da aplicação de nitrogênio ao solo na qualidade do grão e no rendimento de cultivares de trigo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira

de Ciência do Solo, 2007. 3 p. 1 CD-ROM.

WINTER wheat growers calendar. In: WINTER production manual. Saskatoon: University of Saskatchewan, 2002. Chap. 6. Direct-seeding equipment. Disponível em: <http://www.usask.ca/agriculture/plantsci/winter_cereals/Winter_wheat/contents.php>. Acesso em: 31 mar. 2010.

WOLF, B. **Diagnostic techniques for improving crop production**. New York: Food Products Press, 1996. 426 p.

ZAMBRANO, M. M. Mechanical cutting or grazing of bread wheat (*Triticum aestivum*) and its association with forage species in the South-Central Chile. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON FACULTATIVE AND DOUBLE PURPOSE WHEATS, 1995, La Estanzuela/Colonia. **[Proceedings...]** La Estanzuela/Colonia: INIA; Mexico: CIMMYT, 1996. p. 53-61.