

Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil

Antonio Nolla e Ibanor Anghinoni

Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
90001-970 Porto Alegre, RS

(Recebido: 10 de setembro de 2003)

Resumo: *A acidez do solo pode ser controlada com a aplicação de substâncias que liberam hidroxilas (OH^-), sendo mais utilizado o calcário. A amostragem do solo representa um parâmetro importante para a definição de dosagens corretas de corretivos a serem aplicadas, sendo fundamental determinar a profundidade adequada de coleta de solo. O modelo de recomendação de calcário baseia-se na decisão de aplicação ou não de calcário e na dosagem de calcário necessária para restabelecer o potencial produtivo do solo. O pH em água é um índice utilizado para indicar se existe a necessidade ou não de calagem. Alguns estados utilizam o pH CaCl_2 e o pH KCl , com índices de calagem. O alumínio trocável é outro índice de acidez utilizado na recomendação de calcário, e objetiva a aplicação de calcário até a neutralização do alumínio trocável no solo. Como métodos de recomendação da dose de calcário, a incubação com CaCO_3 tem sido utilizado como padronizador. Os métodos baseados em solução tampão (SMP), medem a depressão de pH do solo após a adição da solução tampão, e objetivam a neutralização da acidez potencial. O método do alumínio trocável baseia-se na aplicação de calcário até a sua neutralização no solo; porém, por recomendar pouco calcário, utiliza-se um critério complementar para garantir o suprimento de cálcio e magnésio. Em solos sob sistema plantio direto, há redução da toxidez do alumínio devido à sua complexação pelos radicais da matéria orgânica, o que pode promover alterações nas metodologias de calagem originalmente desenvolvidas para o sistema convencional. Assim, o modelo de recomendação de calagem a ser utilizado está condicionado ao comportamento dos índices de acidez no solo, à qualidade dos resultados de pesquisa e às condições climáticas, forma de manejo e histórico da área do solo.*

Palavras-chave: *modelo de recomendação de calagem, critérios de calagem, dosagem de calcário*

Abstract: Soil acidity may be controlled by substances application that release anions (OH^-), and lime is the product more used. Soil sampling is fundamental to correct lime application doses, being very important know the adequate depth sampling. Lime recommendation model is based in lime application decision and lime dose to restore the productive soil potential. The $\text{pH-H}_2\text{O}$ is a liming criteria. Some states use o pH CaCl_2 e o pH KCl with liming criteria. Aluminum exchange is other acidity index use in lime recommendation, and aim the lime application until aluminum neutralization. The calcium carbonate incubation is a lime dose recommendation, and has been used as pattern. Methods based in tampon solution measure soil pH depletion after tampon solution addition, and aim the potential acidity neutralization. Aluminum exchange method is based in lime application until aluminum neutralization, but it recommend not much lime. This it is used a supplementary criteria to warrant calcium and magnesium supply. In no tillage system, there are reduction in aluminum toxicity because the complexation with organic matter radicals, that may cause alterations in lime methodology originally developed to conventional system. Thus, the lime recommendation model to be used is conditioned to soil acidity index, quality of research, weather conditions, management and report surface.

Key words: liming recommendation model, liming criteria, lime dose

1 Introdução

A queda no rendimento das culturas comerciais, no decorrer dos cultivos, tem sido um motivo de preocupação constante para os agricultores. Segundo Quaggio (2000), aproximadamente 70% do Brasil é composto por solos ácidos, capazes de reduzir o potencial produtivo das culturas em cerca de 40%. Geralmente, a perda da potencialidade produtiva do solo ocorre devido à baixa disponibilidade de nutrientes no solo e à elevada concentração de alumínio em solução. A presença de alumínio tóxico em níveis elevados provoca menor crescimento e engrossamento das raízes (TAYLOR, 1988). Com isso, o sistema radicular limita-se a explorar uma menor área de solo, o que ocasiona uma menor absorção de nutrientes e água. De maneira geral, o efeito fitotóxico do alumínio em solução ocorre em solos com pH em água abaixo de 5,5. À medida que o pH do solo diminui aumenta a atividade do alumínio no solo e, conseqüentemente, ocorre potencialização dos efeitos nocivos e deletérios às culturas.

O calcário tem sido o material mais utilizado para a neutralizar o efeito tóxico do alumínio no solo, contribuindo significativamente para o aumento do rendimento de grãos e da renda agrícola, em função de sua ação de melhoria nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo. Para ser efetivo, o calcário deve ser aplicado em níveis e intervalos de tempo adequados, de modo que a resposta das culturas seja adequada.

Geralmente, a adoção de certo modelo de recomendação da necessidade e da dosagem de calcário é inerente às características do solo da região, aliado aos princípios adotados pelos pesquisadores, para eleger o procedimento que mais se adapta às condições de acidez reinantes no local. O processo de recomendação de calagem baseia-se em duas etapas. A primeira refere-se à tomada de decisão da necessidade de

aplicação, ou não, de calcário em determinada área. Para isso, são utilizados índices de acidez (pH, saturação por bases e por alumínio, alumínio trocável), que são estipulados valores referenciais pré-determinados que indicam a necessidade de correção da acidez do solo. A segunda etapa refere-se à dosagem de calcário necessária para restabelecer o potencial produtivo do solo. De maneira geral, o cálculo da dose de calcário necessária é baseada na acidez potencial, tem como objetivo a neutralização da acidez do solo. Para tal, são estudados os solos da região em estudo, relacionando-se condições de acidez do solo, com a aplicação de calcário, de modo a estabelecer tabelas e equações que indiquem, com confiabilidade, a dosagem de calcário necessária para corrigir o solo ao nível desejado.

As recomendações de calagem foram desenvolvidas originalmente para o sistema de cultivo convencional. Em função da manutenção de restos culturais e nutrientes na superfície do solo sob sistema plantio direto, alguns estados brasileiros têm estabelecido modificações na metodologia de recomendação de calagem, porque tem sido observado em solos cultivados, sob sistema de plantio direto, rendimentos adequados, após longos períodos sem reaplicação de calcário, em solos com pH baixo e alumínio trocável alto (*ANGHINONI e SALET, 2000*). Além disso, fatores dependentes da natureza do solo, das condições climáticas, do grau de acidez original e da capacidade de reter água e nutrientes no solo, também podem estar ocasionando respostas diferenciadas das culturas à prática da calagem. Assim, é importante ressaltar que as características locais da região e a qualidade dos dados de pesquisa disponíveis são importantes fatores que irão auxiliar na escolha do método de recomendação de calagem, que melhor se adapte às peculiaridades da região considerada.

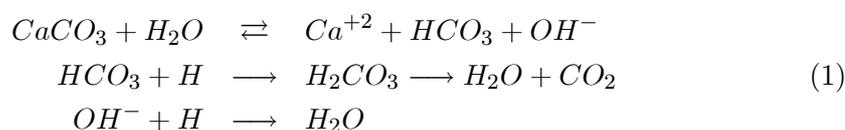
O trabalho procura descrever a origem, mecanismos e a forma de controle de acidez do solo, e detalhar os diferentes métodos utilizados pelos órgãos de pesquisas brasileiros, com o objetivo de definir a necessidade de dosagem de calcário em solo, a fim de reestabelecer sua capacidade produtiva.

2 Acidez do solo e calagem

A acidez é o principal fator de degradação química do solo e abrange áreas extensas de solos nas zonas temperadas e nos trópicos. Entre as causas químicas capazes de ocasionar a acidez do solo, destacam-se a água da chuva (dissociação do ácido carbônico - H_2CO_3), a decomposição de materiais orgânicos (dissociação de prótons de grupamentos carboxílicos e fenólicos da matéria orgânica e de restos culturais), a adição de fertilizantes nitrogenados (uréia, sulfato de amônio, etc.) e a lixiviação de cátions como cálcio, potássio e magnésio (*SÁ, 1993; WIETHÖLTER, 2000 e 2002*). O cultivo do solo, tanto manejado no sistema convencional como no sistema plantio direto, também gera um processo de acidificação, em função de perdas e absorção pelas plantas de cátions básicos, pela mineralização de materiais orgânicos e em função da nitrificação (*KAMINSKI, 1974; SÁ, 1993; PÖTTKER e BEN, 1998; WIETHÖLTER, 2002*).

De maneira geral, os solos nativos do Brasil apresentam pH baixo, concentração de alumínio e manganês em níveis tóxicos ($> 1,0 \text{ cmolc kg}^{-1}$ e $> 5,0 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente) e para as plantas e alta capacidade de adsorção de ânions, especialmente fosfatos (RAIJ e QUAGGIO, 1997, ERNANI *et. al.*, 1998; BOHNEN, 2000, ANGHINONI e SALET, 2000). O alumínio (Al^{3+}), presente na solução do solo, provoca inibição da expansão da raiz e, posteriormente, redução e engrossamento do sistema radicular da planta (TAYLOR, 1988), resultando em menor absorção de nutrientes e água devido ao menor volume de solo explorado. A disponibilidade de nutrientes é relacionada ao pH do solo. Em solos ácidos, com pH baixo ($< 5,5$), há menor disponibilidade de cálcio, magnésio e fósforo. Tais restrições prejudicam o desenvolvimento normal das plantas, afetando sua capacidade produtiva.

A acidez do solo pode ser controlada com a aplicação de substâncias que liberam hidroxilas (OH^-), capazes de neutralizar os prótons (H^+) presentes na solução do solo. O calcário é o material mais utilizado. Entretanto para ser efetivo, necessita dissolver-se em água, conforme a reação abaixo:



As bases (OH^-) reagem com o Al^{+3} , o Mn^{+2} e o H^+ presentes no solo, fazendo com que a reação química (1) se desloque para a direita, até a neutralização da acidez do solo ou quando todo calcário aplicado seja exaurido (BOHNEN, 2000). Além da neutralização da acidez do solo, a calagem proporciona aumento da concentração de cálcio e magnésio em solução, criando condições adequadas para o crescimento normal das culturas.

A estimativa correta da quantidade de calcário a ser aplicada no solo, é importante para a consolidação de qualquer programa de uso de corretivos. O termo “necessidade de calcário” indica a quantidade de corretivo de acidez necessária para a neutralização da acidez de um solo, até um determinado nível, partindo de certa condição inicial (RIBEIRO *et.al.*, 1999). Os critérios de recomendação de calagem são variáveis, segundo os princípios analíticos e os objetivos propostos. A escolha de um determinado índice está condicionado ao seu comportamento nos solos em questão, e a necessidade de calcário não depende apenas da concentração de hidrogênio, mas especialmente da capacidade tampão do solo, que se relaciona diretamente com os tipos e teor de argila e o conteúdo de matéria orgânica no solo (DEFELIPO *et. al.*, 1972).

3 Amostragem do solo

As recomendações de calagem e adubação são ferramentas básicas, na tomada de decisão e na determinação da quantidade de fertilizantes e corretivos necessários, para a obtenção da máxima performance das plantas. Por isso, o resultado analítico

das amostras coletadas é fator determinante do sucesso de uma recomendação. Assim, a amostragem do solo representa o ponto inicial, crítico e determinante para que todo um conjunto de atividades básicas, que compõe o sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes, seja corretamente utilizado, se for inadequadamente interpretado, ocasionará grandes prejuízos ao agricultor.

A adoção do sistema de semeadura direta, em função da não mobilização do solo, aumenta a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, tanto horizontalmente, em função da irregularidade de distribuição de nutrientes na superfície do solo, como verticalmente devido à distribuição desuniforme de matéria orgânica e nutrientes (destacando-se o fósforo) que se acumulam na superfície do solo (SOUSA, 1992; SCHLINDWEIN, 1999). De maneira geral, esta variabilidade presente no sistema de semeadura direta, pode ocasionar dificuldades para determinar a profundidade adequada de coleta de solo, que reflita o estado real da fertilidade do solo.

No Paraná, a metodologia de amostragem, para o sistema de semeadura direta, recomenda amostrar o solo na camada de 0-20 cm para a determinação da necessidade de calcário a ser aplicada, para elevar a saturação de bases a 65%. A amostragem do solo na camada de 0-5 cm é recomendada para definir se há a necessidade de aplicar ou não calcário, sendo o referencial a saturação de 65% e o pH CaCl₂ 5,6 (CAIRES *et. al.*, 2000). No entanto, é necessário o estudo das camadas a serem amostradas, pois uma amostra de solo retirada na camada arável, de 0-20 cm de profundidade, recomendada para o sistema convencional (COMISSÃO, 1995), pode não representar o estado de fertilidade real do solo no sistema de semeadura direta. Isso pode ser observado pelos resultados encontrados por Sá (1983) no qual as camadas superiores (0-2,5 ou 2,5-5,0 cm) apresentam um acúmulo de fósforo, sendo que as camadas inferiores, com concentração menor, resultam num decréscimo dos níveis extraídos.

Schlindwein (1999), estudando solos sob sistema de semeadura direta no Rio Grande do Sul, observou que o melhor ajuste e a profundidade de amostragem do solo se verificou na camada de 0-10 cm. No entanto, de maneira geral, a heterogeneidade dos solos, em função do tipo de manejo e sistema de culturas empregado e pelo material origem dos solos considerados, pode ser diferenciada e dependente da região, podem alterar a profundidade de coleta a ser amostrada nesse sistema.

4 Modelo de recomendação de calagem

De maneira geral, o modelo comumente utilizado para a recomendação de calagem compõe-se basicamente de duas etapas: a primeira refere-se à tomada de decisão de aplicação ou não de calcário. Para isso, utilizam-se índices de acidez do solo, destacando-se o pH, a saturação por bases, o alumínio trocável, a saturação por alumínio e a relação Al/Ca+Mg. Dentre esses índices, são estipulados valores referenciais pré-determinados, denominados critérios. Esses valores referenciais podem ser estabelecidos *a priori* ou então baseados em relações entre a produtividade

e/ou outros parâmetros de crescimento das culturas. Conforme a região, a escolha de um ou mais atributos químicos de acidez do solo (dependentes basicamente das características locais e dos resultados de pesquisa), irá recomendar a calagem (*ANGHINONI e SALET, 2000*). O sucesso dos critérios de tomada de decisão de calagem depende basicamente da quantidade e da qualidade dos dados de pesquisa disponíveis para a sua calibração e interpretação.

A segunda etapa refere-se à recomendação da dosagem de calcário a ser utilizada, a fim de atingir o índice de referência desejado (*ANGHINONI e SALET, 2000; PÖTTKER, 2002*). Os métodos de recomendação de doses de calcário baseiam-se na acidez potencial, tendo como meta a neutralização das fontes de acidez do solo. Para isso, são conduzidos estudos envolvendo os solos representativos da região considerada, relacionando os valores dos índices de acidez do solo, a dosagens crescentes de calcário. Assim, são estabelecidas tabelas e equações que relacionam a acidez potencial (através dos valores do índice SMP, V%, Al e %Al) com a dosagem de calcário necessária para atingir o nível de correção desejado. Dessa forma, conforme a condição de acidez do solo em questão, recomenda-se a dosagem de calcário a ser utilizada para estabelecer uma condição de solo desejada.

4.1 Métodos de recomendação da dose de calcário

Há inúmeros métodos de recomendação de calagem. A seguir, serão feitas considerações sobre os métodos mais utilizados no Brasil, entre eles o da incubação com $CaCO_3$, da solução tampão SMP e alumínio trocável.

4.1.1 Método de incubação com $CaCO_3$

O método de incubação com $CaCO_3$ pode ser utilizado na recomendação da dosagem de calcário necessária, para atingir os valores referenciais dos índices de acidez. Em função de sua precisão, é muito importante para a calibração de outros métodos mais práticos, sendo caracterizado como método padrão. Não é utilizado como rotina, em laboratórios de análise de solo, devido à grande demanda de mão-de-obra e tempo (pouca praticidade).

Para este método, devem ser utilizados solos com características representativas da região, aplicando-se doses crescentes de carbonato de cálcio. Assim, amostras devidamente umedecidas, dos diferentes solos, são incubadas pelo tempo necessário para a completa reação do carbonato com as fontes de acidez do solo. Com a determinação dos índices de acidez (pH, Al, %Al, V%), são elaboradas curvas de neutralização. Assim, pode-se, pelas curvas de calibração, determinar a dosagem de $CaCO_3$ necessária para atingir o critério de tomada de decisão de calagem no solo desejado (*RAIJ e QUAGGIO, 1997; QUAGGIO, 2000*).

4.1.2 Métodos baseados em soluções tampão

Os métodos baseados em solução tampão medem a depressão de pH de uma amostra de solo, após a adição de uma solução tampão. As soluções tampão mais

conhecidas são a do tampão SMP (*SHOEMAKER et. al., 1961*), a de Woodruff (1948) e a de Yuan (1974).

O método SMP, descrito por Shoemaker *et. al. (1961)*, tem sido o mais estudado no Brasil, para determinar a quantidade de corretivos a adicionar ao solo (*ERNANI e ALMEIDA, 1986; SOUSA et. al., 1989; WIETHÖLTER, 2002*). Por ser considerado um método barato, rápido, preciso e de elevada correlação com os valores da necessidade de corretivos obtidos na incubação do solo (*KAMINSKI, 1974; QUAGGIO, 1983*), tem sido utilizado para a recomendação da dosagem de calcário nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, desde a década de 60 (*KAMINSKI, 1974; WIETHÖLTER, 2002*). Nesse método, após a incubação do solo com CaCO_3 , para estabelecer a relação entre o pH estabilizado do solo e a dose de CaCO_3 adicionada (*SHOEMAKER et. al., 1961*), amostras dos solos originais são misturadas com uma solução tampão (SMP), determinando-se o pH da suspensão (solo : solução tampão), cujo valor denomina-se de pH SMP. Com os resultados do pH SMP e a necessidade de corretivo, são elaboradas tabelas para a recomendação de calagem, conforme as necessidade das culturas (*KAMINSKI, 1974; ERNANI e ALMEIDA, 1986; COMISSÃO, 1995; RAIJ et. al., 2001; PÖTTKER, 2002*). O método SMP baseia-se, então, no poder tampão do solo, determinando maiores quantidades de corretivo, à medida que aumentam os teores de matéria orgânica e alumínio trocável, que são as principais fontes de acidez do solo.

O método para a determinação da necessidade de calcário em alguns estados da região Centro-Oeste, em São Paulo e em parte do Paraná utiliza-se a fórmula:

$$NC = T(V_2 - V_1)/10.PRNT(3);$$

em que:

NC = necessidade de calagem, em Mg ha^{-1} (0-20 cm)

T = capacidade de troca de cátions a pH 7,0, obtida pelo somatório entre $\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + (\text{H}^+ + \text{Al}^{+3})$ em $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (4)

V_1 = saturação por bases atual no solo

V_2 = saturação por bases que se pretende alcançar (*SOUSA et. al., 1989; QUAGGIO, 2000; RAIJ et. al., 2001*).

Os teores de K, Ca e Mg são facilmente determinados em laboratório, e por cálculo obtém-se a soma de bases (*QUAGGIO, 2000*). No entanto, a determinação do $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$, pelo método do acetato de cálcio, é trabalhosa (*CATTANI e GALLO, 1955*). Raij *et. al. (1979)* obtiveram elevada correlação entre o pH SMP (relação 10:20:10 - solo-água-solução SMP) e os valores de $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$, de tal maneira que o $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$ passou a ser determinado no estado de São Paulo por leituras potenciométricas do pH de equilíbrio do tampão SMP. Assim, pode-se observar que da mesma forma como nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, os estados de São Paulo, Paraná e alguns estados do Centro-Oeste também utilizam, de forma indireta, o método SMP para indicar a quantidade de calcário a ser adicionada ao solo, na respectiva redução das condições de acidez até o nível estabelecido (*SOUSA et. al., 1989; QUAGGIO, 2000; RAIJ et. al., 2001*).

4.1.3 Método do alumínio trocável

O alumínio trocável é outro método utilizado para avaliar as condições de acidez do solo, e tem como princípio básico a aplicação de calcário até a neutralização do alumínio trocável no solo. Porém, há estudos comprovando que este método recomenda uma quantidade de calcário insuficiente para suprir as exigências das plantas, em função de não conseguir elevar o pH em água acima de 5,4 e a saturação por bases além de 40 a 50%. A neutralização do alumínio trocável, nessas condições, não demonstrou uma relação adequada com os rendimentos esperados das culturas (QUAGGIO, 1983). Assim, tornou-se usual a utilização de um critério complementar, o qual visa garantir a exigência das culturas quanto a cálcio e magnésio (RIBEIRO *et. al.*, 1999). Para o estado de Minas Gerais, por exemplo, a recomendação de calagem é obtida pela seguinte fórmula :

$$NC = \{Y \cdot [Al^{+3} - (m_t/1000)] + [x - (Ca^{+2} + Mg^{+2})]\}$$

em que:

NC = necessidade de calagem (Mg ha⁻¹)

Y = valor variável em função da capacidade tampão do solo

m_t = saturação máxima tolerada por determinada cultura

t = CTC efetiva em cmol_c dm⁻³

x = valor variável conforme os requerimentos de Ca e Mg pela cultura

4.2 Critérios de recomendação de calagem

4.2.1 Índice pH (água e sal)

Nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o pH do solo é o índice utilizado para indicar se existe a necessidade ou não de calagem, e o índice pH SMP indica a quantidade de calcário a ser adicionada ao solo, para a respectiva elevação do pH ao nível (QUAGGIO, 1983; WIETHÖLTER, 2000 e 2002).

Entretanto, a utilização do pH em água como índice de acidez pode apresentar algumas limitações. Os valores obtidos para este parâmetro são bastante instáveis, devido às grandes variações existentes entre os solos (QUAGGIO, 1983; RAIJ *et. al.*, 1983; KAMINSKI, 1989). Não é a concentração de íon hidrogênio no solo que, por si só, causa o mau rendimento das culturas, mas a toxidez de alumínio e/ou manganês e o nível inadequado de nutrientes a ele relacionados (KAMINSKI, 1989). O pH em que ocorre a toxidez do alumínio, por exemplo, depende do tipo de solo, do conteúdo de matéria orgânica armazenada, do nível global de fertilidade e do ambiente (SUMMER, 1997) e da época do ano. Assim, solos com valores de pH iguais, podem apresentar diferentes concentrações de alumínio na solução do solo (KAMINSKI, 1989). É possível, também, segundo Caires *et. al.* (1998), obter bons rendimentos mesmo em solos com pH baixo, desde que os teores de cálcio, magnésio e potássio sejam suficientes no perfil e o teor de alumínio não seja muito elevado (<6 mmol_c dm⁻³).

De maneira geral, as recomendações de calagem utilizadas no Rio Grande do Sul e Santa Catarina foram desenvolvidas para o sistema convencional de preparo e cultivo do solo (COMISSÃO, 1995), cujo critério de tomada de decisão é o pH 6,0, faixa de melhor desenvolvimento das culturas. No entanto, estão sendo utilizadas, com alterações, para o sistema plantio direto, pois tem sido observado que em solos sob esse sistema, há uma superestimação da necessidade de calcário, pois os rendimentos das culturas têm sido adequados, mesmo em pH menor do que 6,0 (PÖTTKER e BEN, 1998; ANGHINONI e SALET, 2000; WIETHÖLTER, 2002), e com alumínio trocável alto (ANGHINONI e SALET, 2000). Por este motivo, as recomendações, definidas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFS) - RS/SC (WIETHÖLTER, 2000 e 2002; PÖTTKER, 2002), estabelecem que os critérios de tomada de decisão da aplicação de calagem para o sistema plantio direto são o pH 5,5 e/ou a saturação por bases de 60%.

Sabe-se que, a calibração da dosagem de calcário, no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, foi desenvolvida para o sistema convencional de preparo e cultivo do solo (COMISSÃO, 1995), com o objetivo de aplicar o calcário, (método SMP) para elevar o pH do solo até 6,0. Em função do sistema convencional apresentar características distintas do sistema plantio direto, atualmente são estabelecidas dosagens de calcário para: a) elevação do pH do solo até 6,0, com incorporação do calcário (0-20 cm) para o estabelecimento do sistema plantio direto, quer de lavoura do sistema de cultivo convencional ou de campo natural; b) elevação do pH do solo até 5,5 (amostragem na camada de 0-10 cm), com reaplicação superficial de calcário no caso de lavouras no sistema plantio direto, provenientes do sistema de cultivo convencional; c) elevação do pH do solo até 6,0 (amostragem na camada de 0-10 cm), com reaplicação superficial de calcário no caso de lavouras no sistema plantio direto a partir do campo natural, sem mobilização do solo (WIETHÖLTER, 2000 e 2002; PÖTTKER, 2002). Alguns estados brasileiros utilizam o pH CaCl_2 e o pH KCl, para a tomada de decisão de calagem, considerando-os mais satisfatórios que o pH em água (KAMINSKI, 1974; QUAGGIO, 1983).

Entre as vantagens para a utilização do pH CaCl_2 , segundo Raij (1986), destacam-se: a) o pH medido é pouco afetado pela relação solo:solução; b) a quantidade de sal adicionada é suficiente para nivelar o efeito dos sais existentes no solo; c) como a solução do solo é floculada, os erros de potencial de junção líquida podem ser minimizados pela medida de pH em líquido sobrenadante límpido. Ernani e Almeida (1986) observaram que, para os solos de Santa Catarina, a determinação do pH CaCl_2 pode ser convertido para o pH em água, bastando acrescentar 0,5 unidades para o valor do índice obtido. No Paraná, o pH CaCl_2 é um dos índices utilizados na recomendação de calagem, tendo como critério de tomada de decisão de calagem o pH $\text{CaCl}_2 = 5,6$ (CAIRES *et. al.*, 1998 e 2000).

4.2.2 Saturação por bases

De maneira geral, a saturação por bases tem sido usada como critério de verificação da necessidade de calagem, devido à flexibilidade de adaptação para dife-

rentes culturas, conforme suas exigências (RAIJ, 1991) e por ser um método que sofre menores oscilações que o pH (QUAGGIO, 2000). Além disso, a possibilidade da comparação dos valores de pH com os de saturação por bases permite um controle bastante eficiente dos resultados de laboratório. Outro motivo da utilização da saturação por bases, como índice de calagem, é a sua fundamentação teórica mais completa, pois engloba importantes conceitos agronômicos para o desenvolvimento das plantas, tais como a soma de bases (englobando cálcio, magnésio e potássio), a capacidade de troca de cátions e a acidez potencial (RAIJ, 1991). No entanto, por ser mais completo, é considerado um índice de acidez mais complexo, demorado e caro, porque exige a determinação de cálcio, magnésio, potássio e da capacidade de troca de cátions para que seja possível uma avaliação das condições de acidez de determinado solo.

Em São Paulo, Paraná e alguns estados do Centro-Oeste brasileiro, a saturação por bases e o teor mínimo de magnésio no solo são os índices de acidez utilizados para indicar se existe a necessidade ou não de calagem (QUAGGIO, 1983; RAIJ, 1986; SOUSA *et. al.*, 1989; RAIJ *et. al.*, 1997; QUAGGIO, 2000; RAIJ *et. al.*, 2001).

Apesar das diferenças observadas, entre os índices de acidez baseados no pH e na saturação por bases, é correto observar que a estimativa das condições de acidez do solo, é bastante aproximada quando se compara os valores de pH e de saturação por bases.

Em São Paulo, os critérios de tomada de decisão para a calagem são estabelecidos conforme a tolerância à acidez ou a resposta do sistema de culturas à calagem. Para o feijão, milho, sorgo e trigo, o critério de calagem é de 70% da saturação por bases, para soja e batata 60%, e para arroz e café 50% (RAIJ e QUAGGIO, 1997). Entretanto, deve ser observado, de maneira geral, que se o teor de magnésio trocável for inferior a 5 mmolc dm⁻³, faz-se necessária a calagem, aplicando-se um máximo de 3 a 5 Mg ha⁻¹ de calcário. Assim, conforme o sistema de culturas a ser utilizado, o critério para a tomada de decisão de calagem é diferenciado.

Em parte do Paraná, as recomendações de calagem tem como meta elevar a saturação por bases a 70%, amostrando solo na camada de 0-20 cm (QUAGGIO, 1989). Uma opção de recomendação de calagem, atualmente utilizada para o sistema plantio direto no Paraná, estabelece como sendo os critérios de tomada de decisão de calagem, a saturação por bases = 65% e o pH CaCl₂ = 5,6, com amostragem do solo efetuada na camada de 0-5 cm (CAIRES *et. al.*, 1998 e 2000), utilizando-se, para solos argilosos, 1/3 a 1/2 da recomendação de calcário baseada no pH SMP para elevar a saturação por bases aos critérios estabelecidos (amostragem na camada de 0-20 cm), aplicando-se um máximo de 2,5 Mg ha⁻¹ de calcário, e 1/2 para solos argilo-arenosos, aplicando-se um máximo de 1,5 a 2,0 Mg ha⁻¹ de calcário (SÁ, 1997).

Em alguns estados do Centro-Oeste brasileiro, por sua vez, o critério de tomada de decisão de aplicação de calagem é a saturação por bases de 50%, que equivale ao pH 6,0 (SOUSA *et. al.*, 1989; SOUSA e LOBATO, 2000).

Percebe-se, claramente, que o critério para tomada de decisão de calcário, baseado nos valores de saturação por bases, é diferenciado entre os estados de São Paulo,

Paraná e do Centro-Oeste. Essas diferenças ocorrem, principalmente, devido ao tipo de solos, utilizados na calibração da recomendação e as respostas das culturas à calagem no sistema de manejo adotado.

4.2.3 Método do alumínio trocável

De maneira geral, a utilização do alumínio trocável, como índice de acidez do solo, apresenta algumas limitações. A acidez potencial do solo não depende apenas dos teores de alumínio trocável, mas também do alumínio adsorvido nos sítios de troca, da concentração de hidrogênio e dos ácidos orgânicos provenientes da matéria orgânica. Além disso, mesmo em solos com alumínio trocável alto ($>1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), podem ser obtidas condições satisfatórias para o crescimento de plantas, desde que haja um balanço adequado de nutrientes, em solos com maiores concentrações de cálcio e magnésio no solo, capazes de minimizar o efeito tóxico do alumínio que estiver em solução (CAIRES *et. al.*, 1998). Além disso, o manejo do solo em sistema plantio direto pode promover a redução do efeito fitotóxico do alumínio, devido a vários aspectos, conforme será visto descrito a seguir.

No sistema plantio direto, há redução do efeito fitotóxico do alumínio devido à sua complexação pelos radicais da matéria orgânica e pelos ligantes orgânicos de baixo peso molecular provenientes dos restos culturais. Além disso, o maior teor de cálcio e magnésio, no sistema plantio direto, em relação ao convencional (SÁ, 1993; KAMINSKI e RHEINHEIMER, 2000), pode diminuir a toxidez de alumínio, porque se concentram na superfície do solo (0-5 cm), estabelecendo uma relação Al/Ca+Mg mais baixa, que passa a ser importante no processo de geração de energia, plasticidade da membrana plasmática, germinação e estabelecimento da cultura, especialmente das espécies e/ou cultivares sensíveis ao alumínio (MARSCHNER, 1995).

O teor e a saturação por alumínio trocável e teores de cálcio e magnésio do solo constituem o conjunto de critérios para a tomada de decisão de calagem no estado de Minas Gerais. De fato, para sistemas de culturas com arroz irrigado e/ou sequeiro, milho, sorgo, trigo, feijão e soja, o critério de tomada de decisão de calagem é o teor de Ca+Mg de $2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, que corresponde à saturação por bases de 50%. Por outro lado, faz-se necessário a aplicação de calcário sempre que a saturação por alumínio estiver acima de 25% para arroz, 20% para feijão, soja e adubos verdes e 15% para milho, sorgo e trigo, respectivamente (RIBEIRO *et. al.*, 1999). A recomendação da dosagem de calcário a ser adicionada ao solo, por sua vez, é dependente dos teores de cálcio e magnésio no solo, da saturação por alumínio, da CTC efetiva e principalmente do tipo de solo, onde solos de textura média (15-35% de argila), argilosa (35-60%) e muito argilosa ($> 60\%$) necessitam da aplicação de calcário duas, três e quatro vezes superiores ao solo arenoso, respectivamente (RIBEIRO *et. al.*, 1999).

Solos no sistema plantio direto, os quais acumulam matéria orgânica e nutrientes na camada superficial do solo, podem apresentar níveis de alumínio considerados tóxicos ($> 1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) para o desenvolvimento normal das plantas no sistema

convencional de cultivo. Entretanto, como as culturas sob sistema plantio direto apresentam produtividades elevadas, mesmo em condições mais ácidas (ANGHINONI e SALET, 2000), o critério do alumínio trocável, para a recomendação de calcário no sistema plantio direto, pode não recomendar a real necessidade de calagem neste sistema.

5 Considerações finais

Os critérios de recomendação de calagem são variáveis, segundo os princípios analíticos e os objetivos propostos. A escolha de um determinado modelo de recomendação de calagem está condicionada ao comportamento dos índices de acidez nos solos em questão e à disponibilidade e qualidade dos resultados de pesquisa disponíveis. Assim, para obter uma correta recomendação da quantidade de calcário a ser aplicada no solo, é necessária uma amostragem representativa do solo considerado, uma adequada interpretação adequada da análise de solo, seguir a recomendação de calcário calibrada para a região de cultivo e considerar as condições climáticas, forma de manejo do solo e o histórico de produção dos cultivos da área estudada.

Referências

- ANGHINONI, I.; SALET, R. L. Reaplicação de calcário no sistema plantio direto consolidado. In: KAMINSKI, J. (Coord.). *Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto*. Pelotas: Núcleo Regional Sul, 2000. p. 41-59. (Boletim Técnico, 4).
- BOHNEN, H. Acidez do solo: Origem e correção. In: KAMINSKI, J. (Coord.). *Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto*. Pelotas: Núcleo Regional Sul, 2000. p. 9-19. (Boletim Técnico, 4).
- CAIRES, E. F.; BANZATTO, D. A.; FONSECA, A. F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.24, p. 161-169, 2000.
- CAIRES, E.F.; CHUEIRI, W.A.; MADRUGA, E.F. *et al.* 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, p. 27-34, 1998.
- CATTANI, R. A.; GALLO, J. R. Avaliação da exigência em calcário dos solos do Estado de São Paulo mediante correlação entre o pH e a porcentagem de saturação por bases. *Revista de Agricultura*, Piracicaba, v. 30, p. 49-60, 1955.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. *Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. 3. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 1995.

- DEFELIPO, B. V. BRAGA, J. M.; SPIES, C. Comparação entre métodos de determinação da necessidade de calcário de solos de Minas Gerais. *Experientiae*, Viçosa, v. 13, n. 4, p. 111-136, 1972.
- ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A. Comparação de métodos analíticos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do estado de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 10, p. 143-150, 1986.
- ERNANI, P. R.; NASCIMENTO, J. A. L.; OLIVEIRA, L. C. Increase of grain and green matter of corn by liming. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 22, p. 275-280, 1998.
- KAMINSKI, J. *Fatores de acidez e necessidade de calcário em solos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 1974. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, UFRGS.
- KAMINSKI, J. Acidez do solo e a fisiologia das plantas. In: KAMINSKI, J.; VOLKWEISS, S. J.; BECKER, F. C. (Eds.) SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO, 2., *Anais*, Santa Maria, UFSM, p. 39-61, 1989.
- KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. dos S. A acidez do solo e a nutrição de plantas. In: KAMINSKI, J. (Coord.). *Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto*. Pelotas: Núcleo Regional Sul, 2000. p.21-39. (Boletim Técnico, 4).
- MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. 2.ed. San Diego: Academic Press, 889 p., 1995.
- PÖTTKER, D. Correção da acidez do solo no sistema plantio direto. In: CURSO DE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 5., Guarapuava, 2002. *Resumos*. Guarapuava: Cooperativa Agrária, p. 54-62.
- PÖTTKER, D.; BEN, J. R. Calagem em solos sob plantio direto e em campos nativos do Rio Grande do Sul. In: NUERNBERG, N. J. *Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto*. Lages: SBCS/NRS, p. 77-92, 1998.
- QUAGGIO, J. A. *Critérios para calagem em solos no estado de São Paulo*. Piracicaba, 1983. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP.
- QUAGGIO, J. A. *Acidez e calagem em solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2000.
- QUAGGIO, J. A. Respostas das culturas a calagem em outros estados. In: KAMINSKI, J.; VOLKWEISS, S. J.; BECKER, F. C. (Eds.) SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO, 2., *Anais*, UFSM, p. 177-199, Santa Maria, 1989.
- RAIJ, B. van. *Fertilidade do solo e adubação*. Piracicaba: Ceres, 1991.

- RAIJ, B. van Propriedades eletroquímicas de solos. In: SIMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, *Anais.*, Campinas: Fundação Cargill, p. 9-39, Campinas, 1986.
- RAIJ, B. van.; , J. A.; CANTARELLA, H. *et al.* Os métodos de análise química no sistema IAC de análise de solo no contexto nacional. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H. *et al.* (Eds.). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, p. 5-39, 2001.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; ZULLO, M. A. T. O método tampão SMP para determinação da necessidade de calagem de solos do Estado de São Paulo. *Bragantia*, Campinas, v. 38, p. 57-69, 1979.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. Methods used for diagnosis and correction of soil acidity in Brazil: na overview. In: MONIZ, A. C.; FURLANI, A. M. C.; SCHAFFERT, R. E. *et al.* Plant-soil interactions at low pH: sustainable agriculture and forestry production. *Brasilian Soil Science Society*, p. 205-214, Campinas, 1997.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V. H. *Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais*. Viçosa: CFSEMG/UFV, 1999.
- SÁ, J. C. de M. *Manejo da Fertilidade do solo no plantio direto*. Castro: Fundação ABC, 1993.
- SÁ, J. C. de M. Parâmetros para recomendação de calagem e adubação no sistema plantio direto. In: CONFERÊNCIA ANUAL DE PLANTIO DIRETO 2, Pato Branco, 1997. *Resumos*. Pato Branco: Aldeia Norte, p. 63-82, 1997.
- SALET, R. L.; 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.
- SCHLINDWEIN, J. A. *Variabilidade da fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto*. Porto Alegre, 1999. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, UFRGS.
- 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 American Proceeding*, Madison, v. 25, p. 274-277, 1961.
- SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N. de; LOBATO, E. *et al.* Métodos para determinar as necessidades de calagem em solos dos cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 13, p. 193-198, 1989.

- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto: experiência no cerrado. In: FERTBIO 2000, 2, *Anais*, Santa Maria: UFSM, 2000. (CD-ROM).
- SUMNER, M. E. Procedures used for diagnosis and correction of soil acidity: A critical review. In: MONIZ, A. C.; FURLANI, A. M. C.; SCHAFFERT, R. E. *et. al.* Plant-soil interactions at low pH: sustainable agriculture and forestry production. Campinas: *Brasilian Soil Science Society*, p. 195-204, 1997.
- TAYLOR, G.J . The physiology of aluminum phytotoxicity. In: SIEGAL, H.; SIEGAL, A. (Eds.) *Metals Ions in Biological Systems*. New York: Marcel Dekker, p. 123-163, 1988.
- WIETHÖLTER, S. *Calagem no Brasil*. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 2000a.
- WIETHÖLTER, S. Revisão das recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. IN: REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO 4, *Resumos*. CD-ROM, UFRGS, Porto Alegre, 2002b.
- WOODRUFF, C. M. Testing soils for lime requeriment by means of a buffered solution and the glass electrode. *Soil Science*, Baltimore, v. 66, p. 53-63, 1948.
- YUAN, T. L. A double buffer method for the determination of lime requeriment of acid soils. *Soil Science Society of American Proceeding*, Madison, v. 38, p. 437-440, 1974.