

Correção da acidez de solos cultivados com cana-de-açúcar

Cristiano Alberto de Andrade | Fernando José Freire | Fábio Cesar da Silva | Thomaz Adolpho Rein

Introdução

Solos de regiões tropicais, naturalmente ácidos, sustentam historicamente algo entre 30 e 40% da produção mundial de cana-de-açúcar. A acidez nesses solos é função do ambiente de formação, com elevado intemperismo químico e lixiviação de cátions básicos (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}). A denominação cátions básicos ou bases do solo, entretanto, é somente em razão de estarem associados a óxidos e/ou hidróxidos, que, sob o ponto de vista químico, são bases verdadeiras.

As principais características mineralógicas e suas consequências em termos de cargas elétri-

cas no solo, acidez e disponibilidade de bases e alumínio em solos brasileiros são ilustradas na Figura 9.1.

Na América sob clima tropical, há elevada proporção de solos com características químicas originais desfavoráveis ao estabelecimento da cultura da cana-de-açúcar (Sanches; Salinas, 1981). Essas condições relacionadas à baixa fertilidade de solos ácidos (Figura 9.2) proporcionam baixos rendimentos agrícolas, comprometem a longevidade dos canaviais e representam desafio à expansão da cultura sobre áreas de pastagens extensivas, uma tendência atual.



Figura 9.1. Localização do Brasil entre a Linha do Equador e o Trópico de Capricórnio; características mineralógicas e químicas predominantes em solos de ambiente tropical cultivados com cana-de-açúcar.

Fonte: Adaptado de Sá (1999).

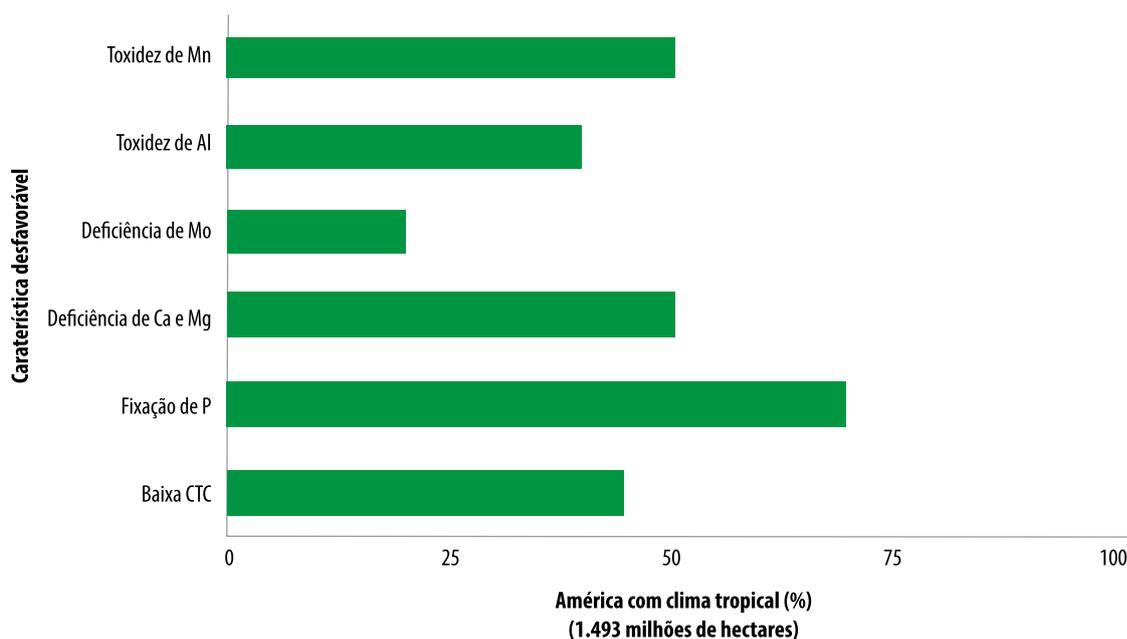


Figura 9.2. Características químicas desfavoráveis ao cultivo de cana-de-açúcar em solos da América de clima tropical.

Fonte: Adaptado de Sanches e Salinas (1981).

Embora a cana-de-açúcar se desenvolva em solos com valores de pH entre 4,0 e 8,3, o que indica sua relativa tolerância a condições de elevada acidez e baixa alcalinidade, respectivamente (Schmehl; Humbert, 1964), seu rendimento é comprometido sob condição de acidez extrema do solo, determinando a necessidade de correção química.

Ao iniciar um programa de adubação para a cultura da cana-de-açúcar, um ponto fundamental é a criteriosa avaliação das condições de acidez do solo e a estruturação de estratégia de manejo para correção da acidez e manutenção de condições favoráveis à cultura. Ressalta-se que o manejo da acidez representa baixo impacto na planilha de custos de produção da cana-de-açúcar, porém, seu impacto positivo na produtividade da cultura é dos mais elevados, principalmente pelo uso adequado de nutrientes e de água.

O presente capítulo apresenta conceitos básicos sobre acidez e corretivos de acidez de solos, visando à capacitação de estudantes e técnicos;

além de trazer informações organizadas a partir da literatura especializada para a atualização dos critérios de recomendação de calcário e gesso para a cultura da cana-de-açúcar no Brasil, com vistas à adoção pelo setor sucroenergético, contribuindo, dessa forma, para uma produção eficiente e sustentável.

Acidez do solo

Origem da acidez do solo

Solos são formados a partir do material de origem (rochas e minerais) sujeito à ação do clima e de organismos, num determinado horizonte temporal (tempo) e numa determinada posição na paisagem (relevo). Esses são os cinco fatores do intemperismo. Sob condição tropical, a ação do clima e dos organismos é mais intensa e o intemperismo químico é forte, resultando em rotas naturais de acidificação. O manejo do solo e da cultura também contribui para a acidificação do sistema.

Acidificação natural e antrópica do solo

O intemperismo dos minerais primários promove a formação de silicatos ácidos, óxidos e hidróxidos de Ferro (Fe) e óxidos de alumínio (Al) (Figura 9.3). Nessa pedogênese há liberação de cátions básicos, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ , dependendo da composição química dos minerais primários intemperizados, além da formação de argilominerais de caráter ácido.

Solos muito intemperizados de ambiente tropical possuem cargas variáveis com as condições do meio, principalmente o pH. Os constituintes inorgânicos predominantes na fase sólida (caulinita e/ou óxidos e hidróxidos de Fe e Al) desses solos e a matéria orgânica possuem cargas variáveis.

A caulinita e os óxidos e hidróxidos de Fe e Al formam cargas positivas a baixos valores de pH do solo, o que reforça a necessidade de manejo da acidez do solo, de forma a reduzir a formação de cargas positivas desses constituintes e favorecer o balanço de cargas negativas, que se reflete na capacidade de troca de cátions (CTC) do solo.

Os constituintes da matéria orgânica do solo (grupos carboxílico, fenólico, alcoólico, etc.) apresentam cargas negativas até os limites inferiores de pH (2,5 a 3,5) geralmente encontrados em solos agrícolas.

Em solos ácidos há hidrólise do alumínio, e a forma tóxica Al^{3+} aparece em solução (Figura 9.4) e ocupa parte da CTC dos solos, caracterizando-se uma reserva ácida do sistema.

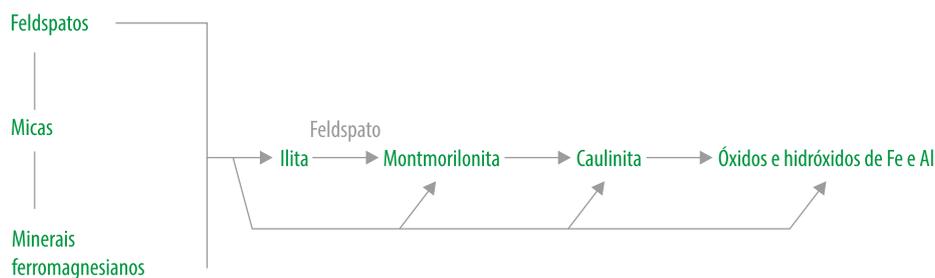


Figura 9.3. Representação esquemática do processo de intemperismo dos minerais primários, passando pela formação de minerais 2:1, 1:1 e culminando com a formação de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

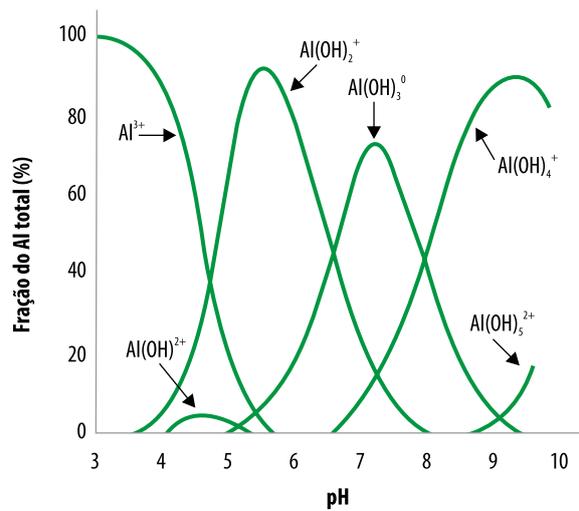


Figura 9.4. Distribuição relativa das espécies químicas de alumínio de acordo com o pH da solução.

Fonte: Marion et al. (1976).

Elevadas precipitações pluviais promovem a lixiviação desses cátions básicos do complexo de troca do solo, os quais são substituídos por outros de caráter ácido, como H_3O^+ e Al^{3+} . Tanto o íon hidrônio ou hidroxônio (H_3O^+ , que simplificada é representado como H^+) quanto o alumínio em sua forma tóxica trivalente (Al^{3+}) são ácidos verdadeiros.

O H^+ origina-se, naturalmente, pela difusão do gás carbônico da atmosfera para a água (solução do solo), passando à formação de ácido carbônico (H_2CO_3), que, após dissociação parcial aos valores de pH geralmente encontrados no solo, libera H^+ no sistema (Figura 9.5), que ocupará os sítios de troca da CTC liberados pela lixiviação ou absorção dos cátions básicos Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} .

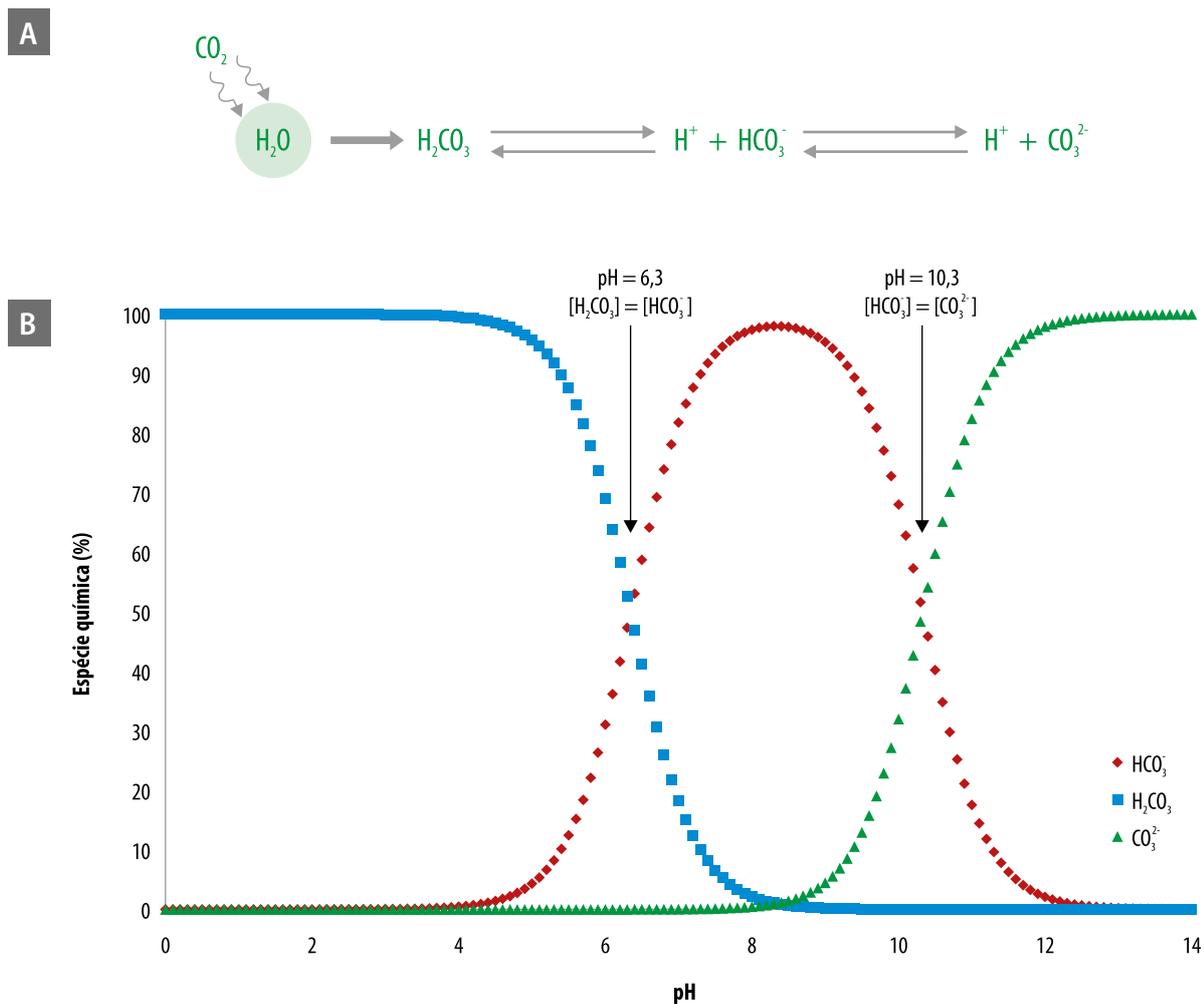


Figura 9.5. Representação da difusão do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico para a solução do solo, com formação de ácido carbônico (H_2CO_3) e posterior dissociação parcial em bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}), liberando H^+ no meio (A); e diagrama de distribuição relativa das espécies químicas H_2CO_3 - HCO_3^- - CO_3^{2-} em função do pH (B).

A absorção de cátions nutrientes pelas plantas também acidifica o solo. Geralmente, a quantidade de cátions absorvidos supera a de ânions absorvidos, fazendo com que a planta libere prótons (H^+) no sistema para manutenção de sua neutralidade elétrica (Figura 9.6).

Cátions básicos como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ são absorvidos e exportados em quantidades elevadas pela cultura da cana-de-açúcar (Tabela 9.1). Uma fração dos cátions é exportada nos colmos e outra parte retorna ao solo via cinzas, quando a cana é colhida com uso de despalha a fogo, ou via palhada no sistema de colheita de cana sem queima (cana crua). A despalha da cana a fogo, antecedendo à colheita, proporciona perda parcial

de cátions por meio de erosão eólica das cinzas. Além disso, o fogo mineraliza elevada quantidade de cátions que não serão de imediato demandados pela cultura, ficando sujeitos a perdas por lixiviação. Dessa forma, espera-se uma acidificação mais acentuada dos solos em cultivos submetidos à colheita com queima da palhada.

A fertilização nitrogenada com formas orgânicas de nitrogênio (N), ou N amídico (NH_2 da ureia) ou N na forma amoniacal (NH_4^+), é uma das principais fontes de acidificação em solos manejados, uma vez que, em condições de boa drenagem, há tendência de nitrificação do N, que resulta num balanço com liberação líquida de H^+ no sistema (Figura 9.7).

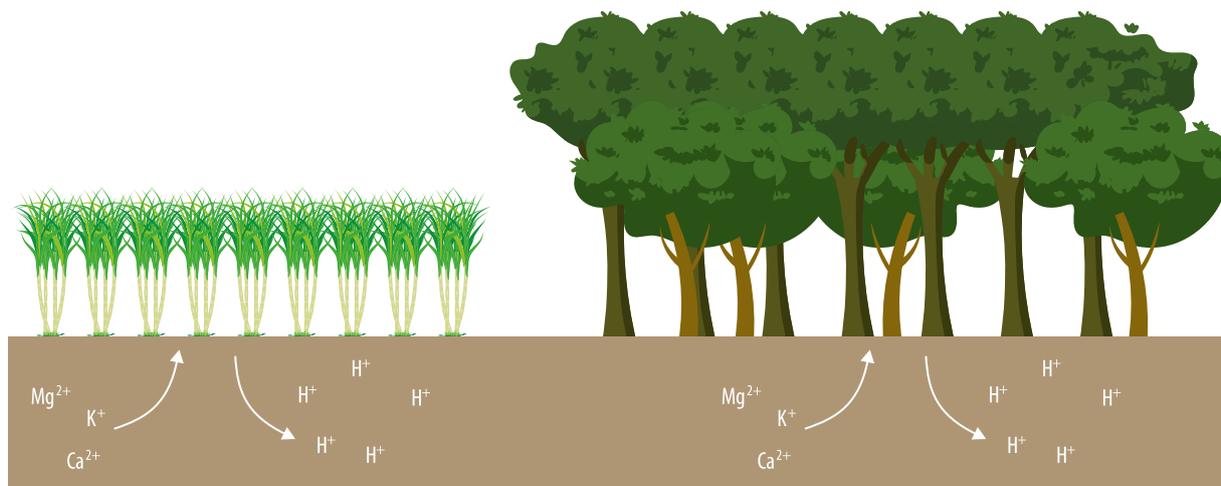


Figura 9.6. Representação esquemática da absorção de cátions suplantando a absorção de ânions, que resulta na acidificação do solo pela liberação de prótons (H⁺) pelas plantas.

Tabela 9.1. Extração e exportação de cálcio, magnésio e potássio para algumas variedades de cana-de-açúcar.

Variedade	Extração Exportação		Variedade	Extração Exportação		Variedade	Extração Exportação	
	(kg ha ⁻¹)			(kg ha ⁻¹)			(kg ha ⁻¹)	
	Ca			Mg			K	
RB72454	201,6	185,2	RB72454	80,2	60,8	RB72454	295,0	171,7
RB763710	320,3	265,0	RB763710	103,8	99,0	RB763710	368,0	225,2
RB813804	199,6	148,8	RB813804	66,9	36,1	RB813804	249,5	96,8
RB863129	192,6	172,7	RB863129	73,3	54,0	RB863129	229,1	136,8
RB867515	271,7	202,3	RB867515	121,4	67,9	RB867515	361,8	222,3
RB872552	230,9	192,6	RB872552	88,9	64,1	RB872552	344,2	285,7
RB92579	259,6	196,2	RB92579	83,4	66,8	RB92579	344,8	197,7
RB943365	228,9	193,9	RB943365	82,1	64,5	RB943365	299,5	165,4
SP78-4764	241,9	192,6	SP78-4764	94,7	63,0	SP78-4764	359,1	219,2
SP79-1011	170,7	184,1	SP79-1011	61,2	51,9	SP79-1011	276,6	109,4
SP81-3250	209,2	191,3	SP81-3250	79,7	62,1	SP81-3250	297,4	190,3
Média	229,7	193,1	Média	85,0	62,7	Média	311,4	183,7

Fonte: Oliveira (2008).

A cana-de-açúcar é a terceira cultura que mais consome fertilizantes no Brasil (11% do total consumido em 2019) (Globalfert, 2020), e o manejo da adubação nitrogenada com fontes amídicadas e amoniacais acelera a acidificação do solo, função do caráter acidificante desses adubos (Tabela 9.2).

O manejo inadequado do solo favorece a erosão e expõe camadas subsuperficiais mais ácidas, principalmente em cultivos conduzidos em condição de maior declive e sem manutenção de palhada (Bezerra; Cantalice, 2006) (Figura 9.8). Em sistema de colheita de cana queimada, a quantidade de resíduo de palhada

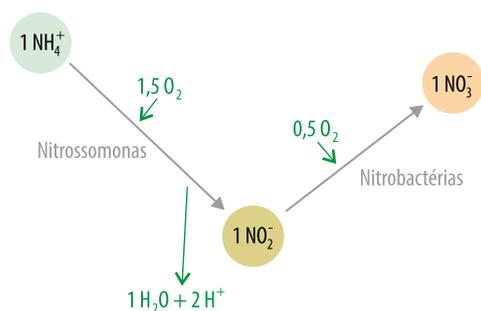


Figura 9.7. Processo de nitrificação a partir do nitrogênio amoniacal no solo (NH_4^+), mostrando a formação de nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-), pela ação de bactérias dos gêneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*, respectivamente, e liberação de 2 mols de H^+ para cada mol de nitrogênio nitrificado.

Tabela 9.2. Quantidade de carbonato de cálcio (CaCO_3) para neutralizar 1.000 kg de fertilizante.

Fertilizante (1.000 kg)	CaCO_3 (kg)
Amônia anidra	1.480
Sulfato de amônio	1.100
Fosfato diamônico	880
Ureia	840
Sulfonitrato de amônia	840
Fosfato monoamônico	600
Nitrato de amônio	600
Nitrocálcio	280
Superfosfatos simples ou triplo	0
Cloreto de potássio	0
Sulfato de potássio	0
Sulfato de potássio e magnésio	0

Fonte: Adaptado de Malavolta (1980) e Tisdale et al. (1985).

é significativamente diminuída, favorecendo a erosão e remoção de cátions básicos do solo.

O uso de vinhaça e da torta de filtro recicla importantes quantidades de cálcio (Ca) e de potássio (K), que contribuirão para a saturação de cátions no complexo de troca do solo. No entanto, materiais orgânicos, de forma geral, tendem a acidificar o sistema em função de alguma con-

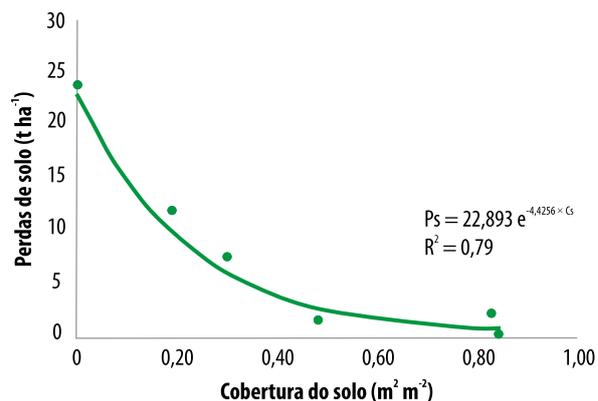


Figura 9.8. Perdas de solo (P_s) em função da cobertura do solo (C_s) entre sulcos em cultivo de cana-de-açúcar.

Fonte: Bezerra e Cantalice (2006).

tribuição de N para mineralização e posterior nitrificação no solo, além da liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular.

Determinação da acidez do solo

Acidez ativa

A acidez ativa do solo corresponde à atividade do íon H^+ em solução, medida por meio de leitura do pH. Define-se pH como:

$$pH = \log 1/(H^+) \text{ ou } pH = -\log (H^+)$$

em que (H^+) = atividade de H^+ , em mol L^{-1} .

Para determinação da acidez ativa, podem ser utilizados métodos mais simples como o dos indicadores, que, por meio de uma escala de cores e faixas de pH, indicam, aproximadamente, o pH da solução. Em determinações analíticas, utilizam-se métodos potenciométricos, com eletrodo específico (calomelano). Essas determinações são realizadas a partir de suspensões de solo + água ou solo + eletrólito. Os métodos potenciométricos mais utilizados encontram-se apresentados na sequência, de acordo com o descrito no *Manual de Métodos de Análise de Solo* da Embrapa (Teixeira et al., 2017):

- a) Suspensão solo: 1:2,5 (10 cm³ de solo:25 mL de água). Em solos de várzea, em que haja indício de tiomorfismo, utilizar relação 1:1 (solo:água).
- b) Suspensão solo: KCl 1 mol L⁻¹ na relação 1:1 (10 cm³ de solo:10 mL de solução) ou 1:2,5 (10 cm³ de solo:25 mL de solução). A determinação do pH em KCl 1 mol L⁻¹ é importante quando se deseja determinar a carga elétrica líquida do solo, ou seja, se o solo é eletronegativo ou eletropositivo. Com essas determinações estima-se o valor de ΔpH :

$$\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{\text{água}}$$

O valor de ΔpH é negativo, em solos com balanço negativo de cargas, e positivo, em solos com balanço positivo de cargas. Certa proporção de H⁺ e OH⁻, ligados eletrostaticamente, encontra-se no complexo de troca. Com a adição de K⁺ e Cl⁻, via solução de KCl, há deslocamento proporcionalmente maior de H⁺, que OH⁻, do complexo de troca para a solução, que resulta em pH_{KCl} inferior ao $pH_{\text{água}}$. No caso de solos com balanço positivo de cargas, o deslocamento de OH⁻ é proporcionalmente superior ao de H⁺, resultando em pH_{KCl} maior que ao $pH_{\text{água}}$.

O pH em KCl é muito utilizado em levantamentos de solo para fins de classificação, mas seu uso pode ser estratégico no manejo de áreas com solos no extremo do intemperismo, em que a manutenção da concentração de cátions disponíveis às plantas no perfil do solo dependerá de outras estratégias que vão além da correção da acidez, como no caso de solos ácidos. Esses solos possuem baixa capacidade de troca de cátions e, conseqüentemente, baixos teores de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺, num ambiente com pH relativamente elevado, em que a barreira química está pouco relacionada com o excesso de alumínio e mais relacionada com a limitação de bases.

- c) Suspensão solo: CaCl₂ 10 mmol L⁻¹ na relação 1:1 (10 cm³ de solo:10 mL de solução) ou 1:2,5 (10 cm³ de solo:25 mL de solução). Esse é o método mais utilizado para avaliação da fertilidade dos solos. A solução de eletrólito possui concentração suficientemente elevada para eliminar variações do pH em função da força iônica do meio, além de ter o mesmo cátion geralmente encontrado em maior concentração no complexo de troca do solo.

Acidez trocável

A acidez trocável é representada principalmente pelo Al³⁺ no complexo de troca do solo e, em menor proporção, por H⁺, também ligado eletrostaticamente aos colóides do solo. A rigor, além do Al³⁺ e do H⁺, a acidez trocável conceitualmente inclui outros cátions metálicos com a camada de hidratação e ligados eletrostaticamente às superfícies de troca, como Mn²⁺, Fe²⁺ e Fe³⁺.

Do ponto de vista prático, a avaliação da acidez trocável é realizada por meio da avaliação do teor trocável de Al³⁺ e de sua participação na CTC_{efetiva} . A CTC_{efetiva} corresponde às cargas do solo ao pH natural e pode ser estimada pela soma dos teores trocáveis de K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺.

Em algumas situações, como em áreas com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros do Nordeste, principalmente nos estados de Pernambuco e Alagoas, os teores de H⁺ trocáveis são elevados — superando, inclusive, os teores de Al³⁺ trocáveis — e, entre 87 e 92% da CTC, depende da matéria orgânica (Santos, 1993).

O teor de Al³⁺ trocável pode não ser suficiente para a correta interpretação sobre a possibilidade de toxidez à cultura, uma vez que sua atividade em solução é dependente dos níveis de cátions básicos presentes no complexo de troca. Dessa forma, torna-se fundamental conhecer sua participação na CTC_{efetiva} , ou seja, seu

percentual em relação aos demais cátions presentes no complexo de troca. Para isso, calcula-se a saturação por Al^{3+} (m):

$$m = 100 Al^{3+} / CTC_{efetiva}$$

em que m é a saturação por Al^{3+} (%); Al^{3+} é o teor de alumínio trocável do solo ($cmol_c dm^{-3}$); $CTC_{efetiva}$ é a capacidade de troca de cátions efetiva do solo ($cmol_c dm^{-3}$), estimada pela soma dos cátions trocáveis K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} .

Ao comparar os teores de Al^{3+} trocável e os valores de m em solos cultivados com cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco, constata-se a importância dessa característica nas relações do Al^{3+} com os demais cátions do solo, principalmente, Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis (Tabela 9.3). Teores de Al^{3+} de $1,20 cmol_c dm^{-3}$ no Gleissolo Háplico Eutrófico (GXVe) são responsáveis por apenas 12,50% de saturação, enquanto teores de $1,00 cmol_c dm^{-3}$ de Al^{3+} no Argissolo Amarelo Distrófico (PAd) proporcionam uma saturação de 39,46%, pelos menores teores de cátions básicos no solo.

Na determinação da acidez trocável, consideram-se duas etapas: 1) a extração, em que se utiliza como extrator uma solução de sal neutro, no caso KCl $1 mol L^{-1}$ na relação solo:solução de 1:10; e 2) a quantificação, por meio de volumetria de neutralização, utilizando-se solução de NaOH $0,05 mol L^{-1}$.

A acidez trocável (Al^{3+}) apresenta relação inversa com o pH do solo (Figura 9.9A) (Sousa et al., 1985). Portanto, o aumento do pH do solo é uma das alternativas para reduzir, ou mesmo eliminar, o efeito tóxico do alumínio. Quando o pH do solo, determinado em água, está com valor igual ou superior a 5,5, todo o alumínio estará precipitado como $Al(OH)_3$ (Figura 9.9B).

Acidez potencial

A acidez potencial (H+Al) é a acidez trocável, representada principalmente pelo Al^{3+} no complexo de troca, e o H^+ ligado covalentemente à superfície dos colóides (acidez não trocável). Esse H^+ é somente deslocado para a solução do

Tabela 9.3. Componentes da acidez de solos cultivados com cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco.

Componente	Solo ⁽¹⁾				
	PAdx	LAd	PAd	GXVe	ESKo
pH (H ₂ O 1:2,5)	5,20	4,10	4,80	4,90	5,55
pH (KCl 1:2,5)	4,00	3,60	3,80	3,60	4,40
H+Al ($cmol_c dm^{-3}$)	5,20	9,24	7,00	6,77	3,22
Al^{3+} ($cmol_c dm^{-3}$)	0,35	2,00	1,00	1,20	0,00
Ca^{2+} ($cmol_c dm^{-3}$)	1,90	0,20	0,90	5,80	2,20
Mg^{2+} ($cmol_c dm^{-3}$)	0,50	0,20	0,50	2,20	0,50
Na^+ ($cmol_c dm^{-3}$)	0,01	0,02	0,03	0,19	0,04
K^+ ($cmol_c dm^{-3}$)	0,07	0,11	0,10	0,21	0,07
$CTC_{efetiva}$ ($cmol_c dm^{-3}$)	2,83	2,52	2,53	9,60	2,81
m (%)	12,36	79,03	39,46	12,50	0,00
V (%)	32,29	5,43	17,98	55,40	46,69

⁽¹⁾ PAdx – Argissolo Amarelo Distrocoeso; LAd – Latossolo Amarelo Distrófico; PAd – Argissolo Amarelo Distrófico; GXVe – Gleissolo Háplico Eutrófico; ESKo – Espodosolo Cárbico Duripânico. Fonte: Simões Neto (2008).

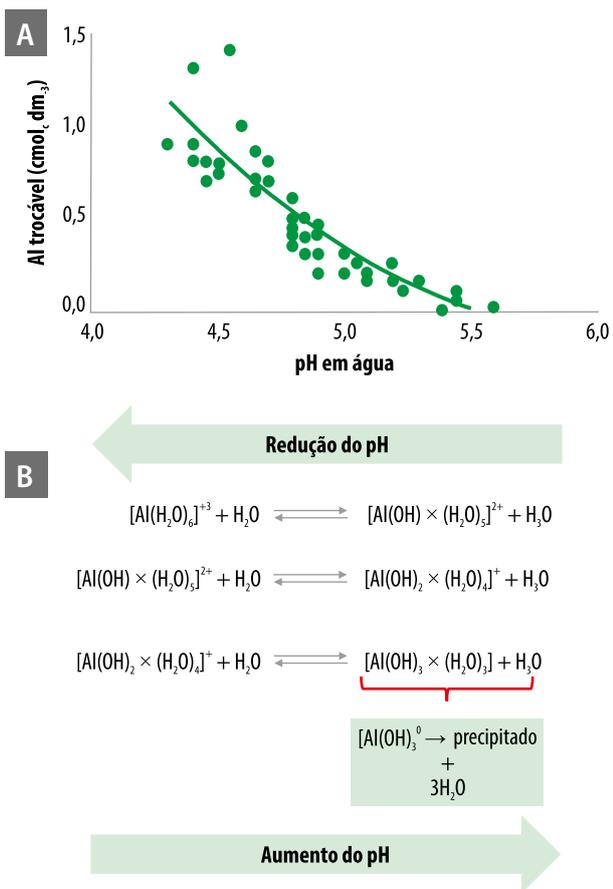


Figura 9.9. Relação entre a acidez trocável e o pH do solo (A) (Sousa et al., 1985); representação da hidrólise do alumínio, responsável por parte da acidez do solo, e precipitação como Al(OH)₃ em função da elevação do pH (B).

solo com o aumento do pH do meio. Dessa forma, a protonação e a desprotonação do H⁺ dependem da natureza química dos constituintes do solo, inorgânicos (caulinita; óxidos e hidróxidos de Fe e Al) e orgânicos (grupamentos funcionais) (Figura 9.10).

Na determinação da acidez potencial, consideram-se duas etapas:

- A extração, em que se utiliza como extrator uma solução de Ca(CH₃COO)₂ 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0 na relação solo:extrator (1:15). Esse ajuste garante, até esse valor de pH, a extração da acidez dependente de pH.
- A determinação, por meio de método volumétrico, com titulação alcalimétrica usando NaOH 0,05 mol L⁻¹.



Grupo	pK ₁	pK ₂ ⁽¹⁾
Si-OH	< 2,0	6 a 7
Al-OH	5 a 7,5	8 a 10
Fe-OH	–	10
Fenólico	–	6
Carboxílico	–	2 a 3
Húmus ⁽²⁾	–	< 2

⁽¹⁾ Quando o valor de pH supera o pK₂ há predomínio de carga líquida negativa. ⁽²⁾ Valor médio de pK₂ para os grupamentos da matéria orgânica humificada.

Figura 9.10. Acidez potencial em função do H⁺ ligado covalentemente e relação com formação de cargas elétricas negativas e positivas no solo; lista com grupamentos inorgânicos e orgânicos, com valores de pK₁ e/ou pK₂, que correspondem aos valores de pH, no qual: (pK₁) - 50% dos sítios de troca estão com carga negativa + 50% dos sítios de troca estão bloqueados (carga zero); e (pK₂) 50% dos sítios de troca estão bloqueados (carga zero) + 50% dos sítios de troca estão com carga positiva.

Outra forma de determinar o teor de (H+Al) é por meio do valor do pH SMP (Shoemaker et al., 1961). Esse método foi desenvolvido por Shoemaker, MacLean e Pratt, daí a origem do nome (SMP), e apresenta alta correlação com a acidez potencial. O método de pH SMP depende de adequada calibração para a variedade de solos e condições regionais. Essa calibração é feita pelo ajuste matemático entre a acidez potencial dos solos determinada com solução de Ca(CH₃COO)₂ 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0 (método considerado referência) e o valor do pH SMP (Kaminski et al., 2007). Assim, em diferentes estados e regiões do Brasil apresentam-se as equações de conversão do valor do pH SMP em (H+Al) (Tabela 9.4).

A determinação do pH SMP é realizada seguindo-se o seguinte procedimento:

Tabela 9.4. Estimativa do teor de (H+Al) em função dos valores de pH SMP para diferentes estados e regiões do Brasil.

Região ou estado	Referência	Equação de regressão ⁽¹⁾
São Paulo ⁽²⁾	Quaggio et al. (1985)	$\hat{Y} = e^{7,76 - 1,053x}$
Minas Gerais ⁽²⁾	Corrêa et al. (1985)	$\hat{Y} = e^{8,06 - 1,11x}$
Cerrados ⁽²⁾	Sousa et al. (1989)	$\hat{Y} = e^{7,719 - 1,068x}$
Paraná ⁽⁴⁾	Pavan et al. (1996)	$\hat{Y} = e^{6,068 - 0,744x}$
Mato Grosso do Sul ⁽²⁾	Maeda et al. (1997)	$\hat{Y} = e^{8,086 - 1,062x}$
Nordeste/Pa ⁽²⁾	Gama et al. (1998)	$\hat{Y} = 1,3294x^2 - 21,073x + 78,63$
Rio de Janeiro ⁽²⁾	Pereira et al. (1998)	$\hat{Y} = e^{7,75 - 1,02x}$
Pernambuco ⁽³⁾	Nascimento (2000)	$\hat{Y} = 0,4837x^2 - 8,4855x + 38,488$
Nordeste ⁽³⁾	Silva et al. (2000)	$\hat{Y} = 3,1521x^2 - 45,161x + 162,53$
Norte/MG ⁽³⁾	Silva et al. (2002)	$\hat{Y} = 0,00359 + 1,556,5806e^{-x}$
Sul ⁽⁴⁾	Kaminski et al. (2002)	$\hat{Y} = e^{10,665 - 1,1483x} / 10$
Noroeste/PR ⁽²⁾	Sambatti et al. (2003)	$\hat{Y} = 20,1925 - 2,6484x$
Amazonas ⁽²⁾	Moreira et al. (2004)	$\hat{Y} = 30,155 - 3,834x$
Vale do Jequitinhonha/MG ⁽⁴⁾	Silva et al. (2006)	$\hat{Y} = e^{8,26 - 1,124312x}$

⁽¹⁾ \hat{Y} é o teor de (H+Al) (cmol_c dm⁻³); e é a base do logaritmo neperiano; x é o pH SMP. ⁽²⁾ Medição em CaCl₂ sem agitação da solução SMP de equilíbrio. ⁽³⁾ Medição em água sem agitação da solução SMP de equilíbrio. ⁽⁴⁾ Medição em água com agitação da solução SMP de equilíbrio.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2000, 2006).

- Na suspensão em que foi determinado o pH em CaCl₂ 10 mmol L⁻¹, adiciona-se solução-tampão SMP e determina-se o pH. Lembrar de padronizar adequadamente as condições de análise.
- Pode-se, também, determinar o pH SMP associado à determinação do pH em água. Para isso, após a leitura do pH em água, adiciona-se solução-tampão SMP e determina-se o pH.

Interpretação dos valores de pH do solo

Conforme apresentado em item anterior, solos tendem à acidificação em função de processos naturais e sob influência do manejo nas áreas agrícolas destinadas à produção. Assim, medidas da atividade hidrogeniônica são utilizadas para interpretar e alertar sobre o momento da

necessidade de correção dos solos. O pH também tem importante relação com a disponibilidade dos nutrientes no solo, o que reforça a necessidade de interpretação adequada dos valores de pH medidos (Tabela 9.5).

Por meio da análise da Tabela 9.5, fica evidente que a interpretação da acidez do solo difere da interpretação da acidez de soluções aquosas. No caso do solo, valores de pH em água entre 5,5 e 6,0 são desejáveis, que correspondem a valores de pH em CaCl₂ de aproximadamente 5,0 e 5,5, considerando-se a camada superficial 0 cm–20 cm de solos com balanço negativo de cargas.

Efeitos da acidez do solo

Em ambiente tropical, o termo acidez do solo abrange um conjunto de características químicas distintas, a qual compreende o valor de pH

Tabela 9.5. Classes de interpretação para valores de pH do solo, baseadas em critérios agrônômicos.

Classificação agrônômica do pH ⁽¹⁾				
Muito baixo	Baixo	Bom ⁽²⁾	Alto	Muito alto
<4,5	4,5–5,4	5,5–6,0	6,1–7,0	>7,0

⁽¹⁾ pH em água, relação 1:2,5. ⁽²⁾ pH adequado.

Fonte: Alvarez V. e Ribeiro (1999).

do solo, a toxidez iônica de alumínio (Al) e manganês (Mn) e limitações nutricionais por causa dos baixos níveis de cálcio (Ca), magnésio (Mg), molibdênio (Mo) e fósforo (P). De forma prática, a interpretação da acidez do solo em ambiente tropical é realizada por meio do valor de pH em água inferior a 5,5 (e/ou pH CaCl₂ <5,0), que geralmente está associada a teores excessivos de Al³⁺ (>0,5 cmol_c dm⁻³; e/ou m >30%) na camada superficial 0 cm–20 cm ou em subsuperfície (abaixo de 20 cm) e disponibilidade insatisfatória de Ca²⁺ (<0,4 cmol_c dm⁻³).

Efeitos diretos

Os efeitos da acidez do solo no crescimento e desenvolvimento das plantas, em particular, na cana-de-açúcar, podem ser divididos em efeitos diretos e indiretos. Os efeitos diretos estão relacionados ao excesso de H⁺ e ao Al³⁺ trocável, enquanto os efeitos indiretos estão relacionados à disponibilidade dos nutrientes.

Os íons H⁺ trocáveis competem com alguns nutrientes no mecanismo de absorção pelas plantas, e, em condições de extrema acidez, pode existir dano direto do H⁺ no funcionamento morfofisiológico celular, embora as células vegetais exerçam rigoroso controle de pH do meio interno, utilizando, para isso, mecanismos de exclusão de H⁺, entrada de H⁺, compartimentalização do H⁺ no vacúolo, etc. Esses efeitos são raros e praticamente não reportados para cana-de-açúcar em condições de campo.

Por sua vez, a elevada atividade do Al³⁺ na solução do solo, que se manifesta em valores de pH

dentro da faixa cultivável, é danosa e compromete o desenvolvimento vegetal. O Al³⁺ se liga a diversos compostos da parede celular, membrana plasmática e/ou citoplasma, por causa da sua alta afinidade por compostos doadores de O₂, o que inclui uma longa lista de ligantes, desde moléculas estruturalmente simples, como os fosfatos inorgânicos, até algumas bastante complexas, como antocianinas e outros flavonoides (Tolrà et al., 2005). Em função dessas ligações, o Al³⁺ interfere nos mecanismos celulares (Rossiello; Jacob Neto, 2006).

Muitos dos mecanismos celulares dependem de uma concentração mínima de Ca²⁺, que pode ser comprometida na presença e competição do Al³⁺. O Ca²⁺ atua na manutenção da conformação espacial das redes de pectina, estabelecendo pontes iônicas entre os grupos carboxila (COO⁻) das cadeias poligalacturônicas adjacentes (Fernandes; Souza, 2006), fundamentais para o alongamento radicular (Koyama et al., 2001). No caso do Al³⁺ se ligar às pectinas, em competição ao Ca²⁺ (Taylor et al., 2000), haverá alteração das propriedades físicas da parede, incluindo sua extensibilidade, rigidez e permeabilidade (Rengel; Zhang, 2003), que resulta em inibição do alongamento celular pelo bloqueio dos processos responsáveis pelo afrouxamento da parede celular (Rengel, 1992; Ryan et al., 1997).

É conhecido que os sintomas de toxidez severa por alumínio são similares aos induzidos pela deficiência de Ca²⁺ e que podem ser revertidos ou mitigados pela elevação da atividade do Ca²⁺ no meio radicular (Foy, 1988; Rengel, 1992). Al-

guns trabalhos, porém, têm mostrado uma ação mais eficiente do Mg^{2+} na atenuação da fitotoxicidade do Al^{3+} , suplantando a ação do Ca^{2+} (Tan et al., 1992; Silva et al., 2001). Nesse caso atribui-se ao Mg^{2+} um papel adicional à competição com o Al^{3+} pelos sítios de ligação nas pectinas, que é o estímulo à exsudação de ácidos orgânicos pelo sistema radicular, reduzindo a toxidez por Al^{3+} .

Há outras ações do Al^{3+} na fitotoxicidade, como sua interferência nos elementos do citoesqueleto e outras vias que não os mecanismos eletrostáticos.

Os sintomas de toxidez por Al^{3+} manifestam-se primeiramente na raiz (Figura 9.11), e sua ação tóxica, aliada aos teores insuficientes de Ca^{2+} , torna o desenvolvimento radicular mais lento, provocando engrossamento e não ramificação das raízes, além de desintegração das extremidades radiculares (Furlani; Clark, 1981; Raji, 1988).

Há também alterações na arquitetura do sistema radicular, reprimindo o crescimento das raízes laterais (Foy et al., 1978; Pavan; Bingham, 1982; Macedo et al., 1997), conduzindo, portanto, a sistemas radiculares com menor área e volume radicular (Foy et al., 1978) (Figura 9.12), efeito extensivo aos pelos radiculares (Care, 1995).



Foto: Orlando Filho

Figura 9.11. Sintoma de toxidez por alumínio em raízes de cana-de-açúcar.

Imagem cedida originalmente por Orlando Filho e Zambello Júnior (1980).

Com a evolução dos danos radiculares, aparecem os sintomas na parte aérea das plantas, os quais se assemelham ao provocado por estresse hídrico. Isso ocorre geralmente a valores de m superiores a 30–40% (Figura 9.13) (Planalsucar, 1980; Marinho; Araújo Filho, 1981; Rodella et al., 1984; Alvarez V.; Ribeiro, 1999; Freire, 2001). Concomitantemente ao sintoma de deficiência hídrica, pode ocorrer também alguma deficiência nutricional, principalmente de nutrientes cuja absorção é dependente do volume de solo explorado, como no caso do fósforo. Por isso, quando os sintomas se tornam visíveis na parte aérea, a produtividade já foi fortemente com-

Fotos: Murillo Luis Marinho



Figura 9.12. Redução de área e volume radicular de cana-de-açúcar em solo com elevados teores de alumínio (A), comparativamente a solo sem a presença de alumínio em altos teores (B).

Imagens cedidas por Marinho e Albuquerque (1983).

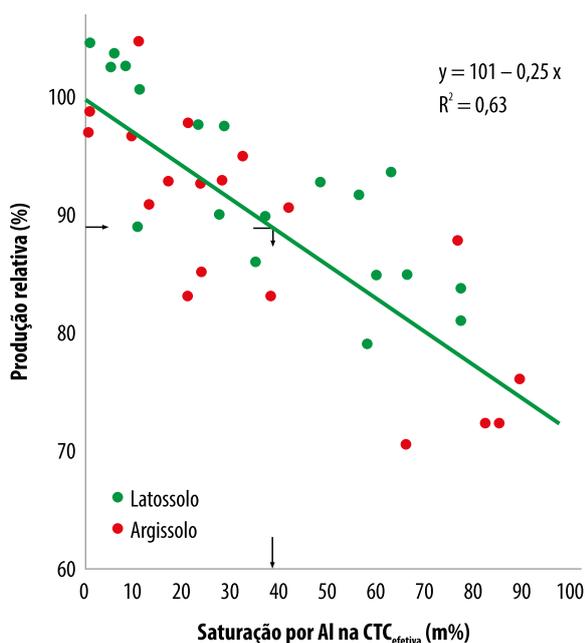


Figura 9.13. Relação entre a produção relativa de cana-de-açúcar e a saturação por alumínio do solo (m).
 Fonte: Adaptado de Marinho e Araújo Filho (1981) e Rodella et al. (1984).

prometida, o que reforça a necessidade de monitoramento das condições de acidez do solo e do manejo adequado dessa acidez.

Efeitos indiretos

Os efeitos indiretos estão relacionados à variação da disponibilidade de nutrientes, para faixas de deficiência ou toxicidez, em função do valor de

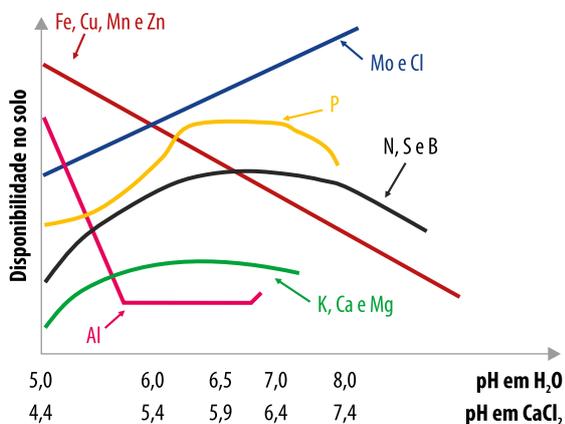


Figura 9.14. Disponibilidade de nutrientes e de alumínio de acordo com o pH do solo.
 Fonte: Adaptado de Instituto da Potassa & Fosfato (1998).

pH do solo (Figura 9.14). Valores de pH do solo em água entre 6,0 e 6,5 são adequados para a maioria das culturas (Sousa et al., 2007). Para cana-de-açúcar, pode-se admitir limites inferiores de pH em água da ordem de 5,5, sem comprometimento ao desenvolvimento da cultura, desde que a saturação por Al^{3+} não ultrapasse 20%.

Em solos arenosos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste e dos Cerrados, o monitoramento do pH é de fundamental importância para a disponibilidade dos micronutrientes metálicos ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn) e para o molibdênio (Mo). Para os micronutrientes metálicos, a disponibilidade diminui com a elevação do pH, enquanto para o Mo a disponibilidade cresce com a elevação do pH.

Por sua vez, solos ricos em matéria orgânica e com pH menor ou igual a 5,5, sob condições redutoras, como os solos de várzeas cultivados com cana-de-açúcar, podem disponibilizar Mn^{2+} em níveis tóxicos (Dechen; Nachtigall, 2006).

Correção da acidez do solo e fornecimento de cálcio e magnésio

No início deste capítulo, discutiu-se a tendência natural de acidificação dos solos, acentuada pela interferência antropogênica, resultante da intensificação de práticas agrícolas acidificadoras. Posteriormente, constataram-se os efeitos deletérios dos solos ácidos nas plantas, principalmente porque se correlacionam com perdas significativas de produtividade em cana-de-açúcar, por interferirem, direta ou indiretamente, na adequada nutrição da cultura. O problema torna-se preocupante quando estudos realizados em diversos solos, de diferentes regiões brasileiras, constataram que 75% dos valores de pH na camada superficial variaram entre 3,8 e 5,5 e que o Al^{3+} foi o cátion trocável predominante no complexo de troca em

mais de um terço dos solos com pH inferior a 5,5 (Abreu Júnior et al., 2003).

Assim, a correção da acidez do solo deve ser realizada antes de qualquer programa nutricional e de manejo da fertilidade do solo em cana-de-açúcar. Nessa correção, o insumo mais utilizado para a camada superficial do solo é o calcário, enquanto para a camada subsuperficial é o gesso agrícola (Sousa; Lobato, 2004).

A efetividade de correção da acidez pelo uso do calcário depende do tempo decorrido da aplicação, do sistema de preparo do solo e do volume de solo corrigido (Miranda et al., 2005), entre outros aspectos.

A velocidade de correção da acidez do solo depende da reatividade do calcário traduzido pela distribuição das partículas do corretivo em diferentes classes granulométricas, conforme disposto pela Instrução Normativa nº 35 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – Mapa (Brasil, 2006). No entanto, a origem da rocha também tem influência na reação do calcário no solo, o que deve ser incorporado aos procedimentos norteadores do uso desse tipo de corretivo, no intuito de aprimoramento da referida prática agrícola.

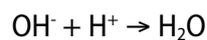
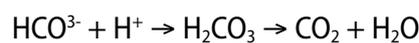
Resultados pioneiros de Gallo e Catani (1954) e Gallo (1954), avaliando a solubilidade de diversos calcários, e mais recentemente de Soratto et al. (2019), evidenciaram maior eficiência de correção da acidez do solo por calcários de origem sedimentar, comparativamente aos calcários de origem metamórfica. Essa diferença se deve à solubilidade do calcário, maior no de origem sedimentar (Gallo; Catani, 1954), que altera a relação entre diâmetro médio da partícula de calcário e a disponibilidade de Ca e Mg no solo.

Objetivos com a calagem

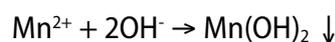
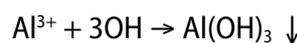
Os calcários agrícolas, que são rochas contendo mistura de carbonatos de cálcio e magné-

sio ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$), em proporções variadas, têm ação neutralizante da acidez do solo por meio do aumento do pH do solo (entenda-se como aumento da concentração de OH^- e consequente redução da concentração de H_3O^+) e neutralização do alumínio tóxico (Al^{3+}), que, após reação com ânions OH^- , precipita na forma de hidróxido, $\text{Al}(\text{OH})_3$. Dessa forma, a aplicação de calcário ao solo é prática agrícola denominada calagem, em que se têm os seguintes objetivos:

- a) Corrigir a acidez do solo pela redução da atividade de H^+ (aumento do pH):



- b) Neutralizar o alumínio e o manganês tóxicos no solo por meio de reações com OH^- e formação de hidróxidos [$\text{Al}(\text{OH})_3$ e $\text{Mn}(\text{OH})_2$] insolúveis, que precipitam (\downarrow):



É oportuno lembrar que essa precipitação poderá ocorrer também com os outros micronutrientes metálicos Cu^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Zn^{2+} , diminuindo a disponibilidade desses nutrientes, principalmente se doses excessivas de calcário forem utilizadas.

- c) Fornecer cálcio e magnésio à cana-de-açúcar:



- d) Aumentar a $CTC_{efetiva}$ pela geração de cargas negativas no solo, incrementando, con-

sequentemente, a retenção de cátions nutrientes, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e NH_4^+ .

- e) Em solos de Cerrado, altamente intemperizados, neutralizar os sítios de cargas positivas dos oxi-hidróxidos de Fe e Al, reduzindo a adsorção específica de P.
- f) Aumentar a atividade biológica do solo, principalmente a fixação biológica de N e a contribuição do Mo nesse processo, além de promover a mineralização de fração mais lábil da matéria orgânica.
- g) Melhorar a eficiência de utilização de nutrientes e água, pelas melhores condições de desenvolvimento do sistema radicular.

A calagem como fornecedora de cálcio e magnésio

O Ca e o Mg podem ser fornecidos às plantas de várias formas (Figura 9.15), mas, como em ambiente tropical o desenvolvimento do solo implica acidificação e perda dos cátions básicos, a calagem se torna uma prática eficiente para o fornecimento desses nutrientes.

A disponibilidade de Ca é adequada, de modo geral, quando os solos não são ácidos ou quando a acidez é corrigida pela aplicação de corretivo em dose adequada. Para Mg, a deficiência



Figura 9.15. Processos de adição e perda de cálcio e magnésio nos solos.

Fonte: Adaptado de Malavolta (1981).

pode surgir sob as seguintes condições (Vitti et al., 2006):

- a) Solo ácido ($\text{pH} < 5,3$).
- b) Proporção de Mg na $\text{CTC}_{\text{efetiva}} < 6\%$.
- c) Alto teor de K ($> 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), principalmente em áreas com aplicação de vinhaça.
- d) Relação K:Mg > 4 , independentemente dos teores absolutos desses nutrientes.
- e) Teor de Mg trocável no solo inferior a $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Os materiais empregados como corretivos da acidez são, basicamente, os óxidos, hidróxidos, os silicatos e os carbonatos (Alcarde, 1992).

Assim, é por meio desses materiais que se aumenta a disponibilidade de Ca e Mg dos solos, estando esse suprimento relacionado com os teores desses nutrientes nos corretivos (Tabela 9.6).

A calagem em solos para cultivo de cana-de-açúcar é prática antiga e largamente utilizada.

Tabela 9.6. Corretivos da acidez e respectivos teores de cálcio e magnésio.

Corretivo	Ca	Mg
	(%)	
Calcário		
Calcítico	32	<3
Dolomítico	22–27	>7
Magnesiano	<1	3–7
Cal hidratada agrícola	33	<1
Cal virgem agrícola	43	<1
Silicatos		
Silicato de Ca	30	<1
Silicato de Ca e Mg	26	7
Silicato de Mg	1,5	11,5
Magnesitas	<1	55
Termofosfato	20	7

Fonte: Lopes (1998), Pereira et al. (2003) e Ramos et al. (2006).

Os sistemas de recomendação da necessidade de calagem, porém, podem variar quanto ao foco na deficiência de Ca e de Mg e/ou critério de neutralização da acidez. Quando baseados nas deficiências de Ca e Mg, percebe-se que no Brasil os níveis críticos desses nutrientes são muito variáveis nas diversas regiões e, de forma geral, relativamente baixos. Deve-se ressaltar que possíveis respostas das culturas ao fornecimento de cálcio e magnésio podem ser mascaradas pelo efeito do corretivo no pH do solo (e efeitos indiretos como redução da toxidez de Al, disponibilidade dos demais nutrientes, aumento de cargas no solo, estímulo à atividade microbiana, etc.), uma vez que, em solos tropicais altamente intemperizados e de reação ácida, o insumo que corrige a acidez é também a fonte de Ca e Mg.

Níveis críticos de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo para cana-de-açúcar, determinados por Cordeiro (1978), foram de 0,28 e 0,25 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente. Zambello Júnior e Orlando Filho (1981) encontraram 0,75 e 0,67 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, e Benedini (1988) encontrou 1,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca e 1,4 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca + Mg trocáveis. No estado do Rio de Janeiro, Azeredo et al. (1981) sugeriram níveis críticos de 1,6 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca + Mg trocáveis.

No estado de Alagoas, o Planalsucar (1980) estabeleceu o nível crítico de 1,25 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca + Mg. Na região de Cerrados, Rodella et al. (1984) encontraram como nível crítico de Ca trocável o valor de 0,65 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e para Mg trocável, 0,17 a 0,34 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. Dados mais recentes apontam para níveis críticos de Ca + Mg maiores, como os recomendados por Alvarez V. e Ribeiro (1999), que sugerem 3,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para solos de Minas Gerais, e os de recomendações de adubação para o estado de Pernambuco (Cavalcanti et al., 1998), que apontam para 2,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ em solos de Pernambuco.

De forma geral, solos de áreas usadas na produção de cana-de-açúcar, em que se tem um efetivo programa de manejo da acidez, apresentam valores de Ca + Mg acima de 3,0–4,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, não devendo ser, portanto, a deficiência nesses cátions o principal aspecto para recomendação da dose de calcário, pelo menos se considerados os níveis críticos disponíveis na literatura e aqui apresentados (Tabela 9.7).

Tabela 9.7. Nível crítico de cálcio + magnésio no solo para cana-de-açúcar em diferentes regiões.

Região	Nível crítico de Ca + Mg ⁽¹⁾ ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)
Norte	2,5
Nordeste	2,5
Centro-Oeste	3,0
Sudeste	3,0
Cerrados	3,5

⁽¹⁾Valor de X utilizado nos métodos para cálculo da necessidade de calagem baseados na neutralização do alumínio e (ou) elevação dos teores de cálcio e magnésio. Fonte: Azeredo et al. (1981, 1996) e Orlando Filho et al. (1996).

Determinação da necessidade de calagem

No Brasil há grande diversidade de regiões com características específicas de solo, clima e desenvolvimento socioeconômico. Assim, tecnologias geradas em determinada região nem sempre poderão ser utilizadas diretamente em outras, sem modificações e adaptações para adequação local.

Vários métodos para estimar a necessidade de calagem (NC) são utilizados no País. No Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, foi adaptado o SMP (Mielniczuk et al., 1969), enquanto em São Paulo e parte do Paraná foi adaptado o da saturação por bases (Raij, 1981). Nas demais regiões, inclusive no bioma Cerrado, o método

mais empregado é baseado no teor de Al trocável e de Ca e Mg trocáveis, difundido originalmente por Mohr (1960) e Cate (1965). Em Minas Gerais considera-se a tolerância da cultura ao Al^{3+} trocável (Alvarez V.; Ribeiro, 1999). No Nordeste, os critérios para neutralização do Al trocável e elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis do solo são utilizados em forma excludente, sendo o maior valor obtido utilizado na recomendação da quantidade de calcário a aplicar, uma vez que, ao se neutralizar o Al^{3+} trocável, fornece-se Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis e vice-versa (Marinho; Albuquerque, 1983).

Na cultura da cana-de-açúcar, o método para neutralização do Al^{3+} trocável e elevação dos teores trocáveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} do solo tem sido largamente estudado, sendo importante o conhecimento dos níveis críticos de Ca^{2+} e de Mg^{2+} , bem como o limite de tolerância da cultura à saturação por Al^{3+} do solo.

Assim, como constata Sousa et al. (2007), a calagem é fundamental para a agricultura em solos ácidos. No entanto, não existe uma definição clara sobre o melhor método para determinar a NC, ou seja, a quantidade de corretivo a ser aplicada ao solo.

Método da curva de incubação

Esse método consiste na incubação de amostras de solo com quantidades crescentes de $CaCO_3$ p.a. até estabilização do pH, que pode variar entre 30 a 90 dias, dependendo do poder tampão da acidez do solo. Por ser pouco operacional, demandar tempo e mão de obra excessivos e apresentar custo elevado, não é um método de rotina para determinação da necessidade de calagem em cana-de-açúcar.

No entanto, em atividades de pesquisa, principalmente em ambientes controlados, é largamente utilizado, além de ser o padrão para a calibração de outros métodos.

Em cana-de-açúcar, os métodos mais utilizados para estimar a NC são: saturação por bases; neutralização do Al^{3+} e (ou) elevação de Ca^{2+} e Mg^{2+} ; e solução tampão SMP.

Método da saturação por bases

Nesse método, o cálculo da NC é dado pela expressão:

$$NC = CTC_{pH7,0} (Ve - Va)/100$$

em que NC é a necessidade de calagem ($t\ ha^{-1}$); $CTC_{pH7,0}$ é a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 ($cmol_c\ dm^{-3}$); Va é a saturação por bases atual, dada na análise do solo (%); e Ve é a saturação por bases desejada ou esperada, que, no caso da cana-de-açúcar, é de 60% (Spironello et al., 1996).

Esse é o principal método utilizado no Sudeste, no Centro-Oeste e em parte do Nordeste, principalmente em solos com valores de $CTC_{pH7,0}$ entre 4 e 12 $cmol_c\ dm^{-3}$. Recomendações de NC em solos que apresentam $CTC_{pH7,0}$ abaixo de 4 $cmol_c\ dm^{-3}$ ou acima de 12 $cmol_c\ dm^{-3}$ podem ser sub ou superestimadas, respectivamente. Conforme mencionado anteriormente, solos sob cana-de-açúcar com manejo da acidez do solo geralmente apresentam valores de Ca + Mg de 30 a 40 $cmol_c\ dm^{-3}$, ou seja, encontram-se acima do valor mínimo de CTC para aplicação adequada desse método.

É importante perceber que o método da saturação por bases considera a natureza variável das cargas de solos muito intemperizados, típicos de ambiente tropical, que representam a maior parte dos solos agricultáveis no Brasil. Além disso, o método considera também a demanda da cultura (valores V atual e esperado) e as características do corretivo em termos de reatividade e poder de neutralização. Esse último aspecto, relacionado ao corretivo, será tratado mais adiante neste capítulo.

Método da neutralização do alumínio trocável e elevação dos teores de cálcio e magnésio trocáveis

A NC é assim calculada:

$$NC = Y[Al^{3+} - (m_t \times CTC_{efetiva}/100)] + [X - (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$$

em que NC é a necessidade de calagem ($t\ ha^{-1}$); Y é um índice da capacidade tampão da acidez do solo que pode ser estimado pelo teor de argila ou pelo valor do P-rem (fósforo remanescente); Al^{3+} é a acidez trocável fornecida na análise do solo ($cmol_c\ dm^{-3}$); m_t representa a máxima saturação por alumínio tolerada pela cultura, que, no caso da cana-de-açúcar, é de 30% (Alvarez V.; Ribeiro, 1999); $CTC_{efetiva}$ é a capacidade de troca de cátions efetiva ($cmol_c\ dm^{-3}$); X é a correção da deficiência de Ca e de Mg, assegurando um valor mínimo para Ca + Mg, que, para a cana-de-açúcar, varia com a região de cultivo, conforme a Tabela 9.7; e Ca^{2+} e Mg^{2+} são os teores trocáveis desses nutrientes fornecidos na análise de solo ($cmol_c\ dm^{-3}$).

O valor do índice da capacidade tampão da acidez (Y), quando em função do teor de argila do

solo, pode ser estimado pelo modelo de Alvarez V. e Ribeiro (1999):

$$Y = 0,0302 + 0,06532X - 0,000257X^2; (R^2 = 0,999)$$

em que Y é o índice da capacidade tampão da acidez do solo; e X é o teor de argila (%).

Ainda, segundo os mesmos autores, o valor de (Y) pode ser estimado também em função do fósforo remanescente (P-rem):

$$Y = 4,002 - 0,125901X + 0,001205X^2 - 0,00000362X^3; (R^2 = 0,999)$$

em que Y é o índice da capacidade tampão da acidez do solo; e X é o valor do P-rem ($mg\ L^{-1}$).

Ao considerar que o teor de argila não é um bom estimador da capacidade tampão da acidez, uma vez que a capacidade tampão depende não somente da quantidade de argila, mas, também, de sua qualidade (Alvarez V., 1982), orienta-se a usar a estimativa em função do P-rem ou, ainda, utilizar um modelo que relaciona o P-rem e o teor de argila (Freire, 2001) (Figura 9.16).

Originalmente o método apresentava restrições ao uso por não considerar o poder tampão da acidez dos solos e as exigências em Ca e Mg das culturas (Coleman et al., 1959; Mohr, 1960; Cate,

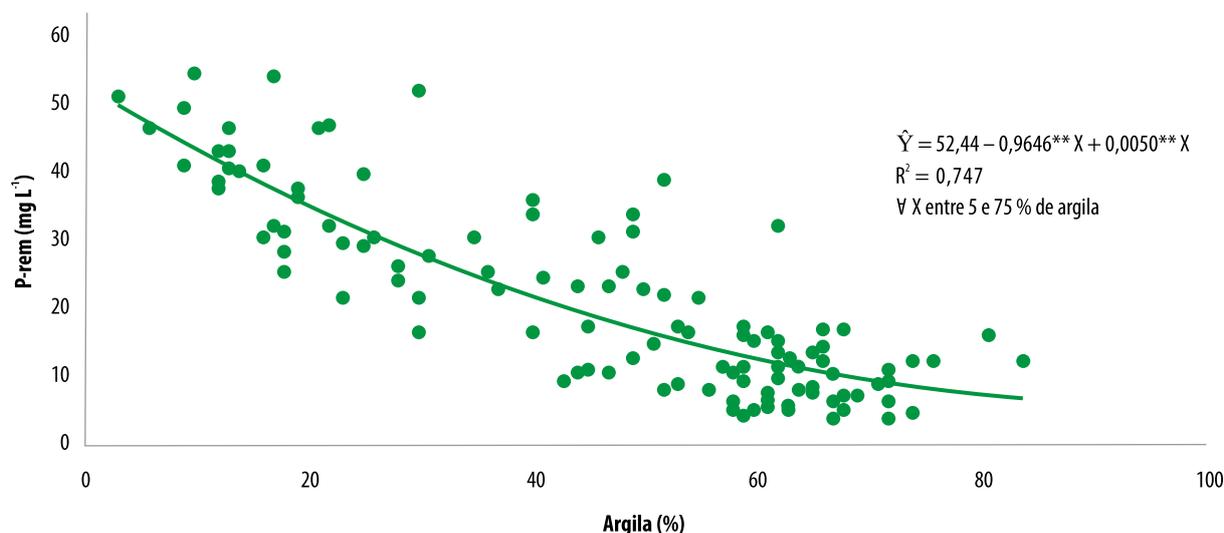


Figura 9.16. Valor de fósforo remanescente (P-rem) em função do teor de argila no solo.

Fonte: Freire (2001).

1965; Kamprath, 1967). No entanto, muitas contribuições foram feitas para o aprimoramento do método (Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1978, 1989; Freire et al., 1984; Alvarez V.; Ribeiro, 1999; Sousa; Lobato, 2004), tornando-o bom estimador da NC dos solos, principalmente pelo modelo contínuo para estimar a capacidade tampão da acidez e a tolerância das culturas ao Al^{3+} .

Como a cana-de-açúcar tolera algum nível de saturação com Al^{3+} sem prejuízos à produtividade, pode-se por meio desse método de NC preservar parte dos sítios de troca com alumínio. Isso é particularmente interessante em casos onde a manutenção de boa agregação do solo e de adequada permeabilidade hídrica são estratégias, considerando-se, além dos aspectos edafoclimáticos envolvidos, a capacidade operacional do empreendimento rural, que normalmente gerencia extensas áreas no caso da cana-de-açúcar.

Por outro lado, o método de neutralização do alumínio trocável e elevação dos teores de cálcio e magnésio não relaciona diretamente a correção da acidez com o máximo de desbloqueio e geração de cargas negativas na CTC, diferentemente do método da saturação por bases.

Essas diferenças entre os métodos são importantes ferramentas para o técnico estruturar o manejo mais específico em cada área de produção de cana-de-açúcar.

Método da neutralização do alumínio trocável ou da elevação dos teores de cálcio e magnésio trocáveis

Esse é o método mais difundido nas regiões produtoras de cana-de-açúcar do Nordeste, cujo princípio básico é a separação da NC para neutralizar os teores de alumínio trocável, da NC para elevar os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis. O maior valor encontrado repre-

senta a recomendação de calagem (Cavalcanti et al., 1998).

O cálculo da necessidade de calagem é dado pelas expressões:

$$NC = f \times Al^{3+}$$

ou

$$NC = f \times [X - (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$$

em que NC é a necessidade de calagem ($t\ ha^{-1}$); f é o fator de calagem que corresponde a 1,5 para solos com teor de argila inferior a 15%, 2,0 quando o solo apresenta argila entre 15 e 35% e 2,5 quando o solo tem teor de argila superior a 35%; Al^{3+} é a acidez trocável dada pela análise do solo ($cmol_c\ dm^{-3}$); X é a correção da deficiência de Ca e de Mg, assegurando um teor mínimo de $Ca + Mg$ ($cmol_c\ dm^{-3}$), que é variável com a região de cultivo (Tabela 9.7); e Ca^{2+} e Mg^{2+} são os teores trocáveis desses nutrientes fornecidos na análise de solo ($cmol_c\ dm^{-3}$).

Como esse método NC é estratificado em função do teor de argila, há possibilidade de sub ou superestimativas de doses para solos com teores de argila próximos aos limites das faixas. Além disso, o procedimento é excludente, ou seja, deve-se escolher a NC de maior valor entre a neutralização do Al^{3+} e aquela para elevação dos teores de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$. Isso significa que, nesse caso, o fator mais limitante define a filosofia de manejo da acidez do solo.

Não se deve considerar, em hipótese alguma, a soma das NCs , pois isso significaria supercalagem, com potenciais efeitos negativos na disponibilidade de nutrientes e consequentemente na produtividade da cana-de-açúcar.

Método da solução-tampão SMP

Esse método baseia-se na medida do decréscimo do pH de uma solução-tampão SMP em

contato com uma amostra de solo, usando-se relação solo:água:tampão de 10:10:5. A calibração é feita correlacionando o pH_{SMP} de uma série de solos com a NC para elevar o pH a 5,5, 6,0 ou 6,5, sendo essa NC determinada por incubação com CaCO_3 (Sousa et al., 2007). De posse do valor do pH_{SMP} do solo e definido o pH que se deseja alcançar, utilizando uma tabela, determina-se a NC .

Esse método é oficialmente utilizado no Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004), porém, salienta-se que, para ser empregado em determinada região, é necessário calibrar o método para as condições regionais, evitando-se sub ou superestimativas da NC .

Na Tabela 9.8 são apresentados valores de NC para os estados de São Paulo, do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, com base no pH_{SMP} .

Especificamente para cana-de-açúcar, a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina recomenda NC para atingir pH 6,0 (Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004). No entanto, pela tolerância da cultura ao Al^{3+} , é possível que NC para pH 5,5 seja mais adequada, desde que satisfaça as exigências nutricionais em Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Necessidade de calagem versus quantidade de corretivo

Até o momento, a necessidade de calagem (NC) indicada pelos diferentes métodos utilizados no Brasil refere-se à dose de CaCO_3 a ser aplicada em um hectare. As premissas assumidas nesse caso referem-se à aplicação a lanço, em área total, do corretivo, a incorporação na camada superficial de 0–20 cm e um calcário totalmente puro em CaCO_3 e com 100% de reação no solo após aplicação.

Entende-se, portanto, que a NC , até o momento calculada por meio de diferentes métodos, corresponde a uma dose teórica do corretivo.

Os corretivos comerciais não são quimicamente puros em CaCO_3 , nem tampouco apresentam reação total em termos de solubilização após aplicação no solo. O atributo associado ao corretivo de acidez que expressa a pureza química, aliada à reação após aplicação no solo, é o poder relativo de neutralização total ($PRNT$). Dessa forma, corretivos de acidez apresentam $PRNT$ inferiores a 100%, inclusive a legislação brasileira estabelece como valor mínimo 45% (Brasil, 2006). A quantidade de corretivo (QC) para aplicação é, então, baseada na NC , porém, corrigindo-se a dose em função do $PRNT$ do corretivo:

$$QC = NC(sc/100) \times (pr/20) \times (100/PRNT)$$

em que QC é a quantidade de corretivo (t ha^{-1}); NC é a necessidade de calagem (t ha^{-1}); sc é a superfície de cobertura em que o corretivo será aplicado (%); pr é a profundidade de incorporação do corretivo (cm); $PRNT$ é poder relativo de neutralização total do corretivo (%).

É importante perceber que, à medida que se reduz o percentual de área que receberá o corretivo, há redução proporcional da quantidade a ser aplicada, enquanto, com o aumento da profundidade de incorporação do corretivo, há incremento na quantidade a ser aplicada. Particularmente em cana-de-açúcar, na implantação ou renovação de canaviais, é recomendável a incorporação de corretivo até 30–40 cm; ou seja, as doses devem ser aumentadas utilizando-se o fator 1,5 – 2,0 (= 30/20 ou 40/20; ver equação de QC). O interesse pela aplicação de parte do calcário em subsuperfície ou do calcário incorporado em grandes profundidades (40 cm ou mais) cresceu nos últimos anos. A principal motivação para pesquisas nesse sentido é o estímulo ao desenvolvimento radicular em profundidade no solo, o qual garante a obtenção de produtivida-

Tabela 9.8. Necessidade de calagem para solos de São Paulo, Rio Grande do Sul e Santa Catarina de acordo com pH_{SMP} (relação 10:10:5; respectivamente solo, água e solução-tampão) para atingir pH 5,5, 6,0 e 6,5.

pH_{SMP}	Necessidade de calagem para atingir pH					
	São Paulo			Rio Grande do Sul e Santa Catarina		
	5,5	6,0	6,5	5,5	6,0	6,5
	(t ha ⁻¹)					
6,9	–	–	0,4	–	–	–
6,8	–	–	0,8	–	–	–
6,7	–	0,3	1,2	–	–	–
6,6	–	0,5	1,5	–	–	–
6,5	0,1	0,7	2,0	–	0,2	0,7
6,4	0,2	0,9	2,3	–	0,6	1,5
6,3	0,3	1,1	2,8	0,2	1,2	2,1
6,2	0,5	1,4	3,3	0,6	1,7	2,7
6,1	0,7	1,8	3,8	1,0	2,2	3,4
6,0	0,9	2,2	4,5	1,4	2,8	4,1
5,9	1,1	2,7	5,2	1,9	3,3	4,8
5,8	1,4	3,2	6,1	2,3	3,9	5,5
5,7	1,7	3,8	6,9	2,8	4,5	6,2
5,6	2,0	4,4	7,9	3,3	5,1	7,0
5,5	2,4	5,1	8,9	3,8	5,8	7,9
5,4	2,8	5,8	10,1	4,4	6,5	8,7
5,3	3,2	6,7	11,2	4,9	7,2	9,6
5,2	3,7	7,6	12,5	5,5	8,0	10,6
5,1	4,4	8,5	13,8	6,2	8,8	11,7
5,0	5,0	9,5	15,3	6,9	9,7	12,9
4,9	5,5	10,5	16,7	7,7	10,7	14,2
4,8	6,1	11,6	18,3	8,5	11,9	15,7

Fonte: Adaptado de Raji (1991) e Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2004).

des competitivas da cana, mesmo em anos com períodos de escassez hídrica, condição esta que vem sendo cada vez mais frequente, além de garantir aportes de carbono em camadas mais profundas do solo, que contribui para o balanço negativo de cargas elétricas no complexo de troca e para a mitigação do aquecimento global em função do sequestro de carbono.

Aplicações de corretivo durante os ciclos de soca, por exemplo, na segunda ou terceira soca, para o manejo da acidez e promoção da longevidade do canavial, são realizadas de forma mais localizada (na entrelinha) e superficialmente, sem incorporação mecânica do corretivo. Nesse caso, algumas recomendações devem ser seguidas, de forma que se evitem doses muito

baixas, aquém da necessária e que não trazem os benefícios esperados, ou doses muito altas que podem significar supercalagem. No caso da calagem nesses canaviais já implantados, na região da entrelinha, recomenda-se usar uma superfície de cobertura (*sc*) de 70% e um valor de profundidade (*pr*) igual a 10 cm, o que deve gerar doses de corretivo da ordem de 1 a 2 t ha⁻¹, dependendo do *PRNT*. Se a calagem na soqueira for realizada em área total, não há necessidade de reduzir a dose com o fator 70%.

Essa é uma recomendação conservativa, especialmente em função de possíveis interações não desejáveis com micronutrientes. Isso não exclui a possibilidade de respostas positivas com doses relativamente elevadas de corretivo, como no trabalho de Rossato et al. (2017), em que as melhores respostas na fertilidade do solo e na produtividade de colmos, açúcar, bagaço e palha na cana-de-açúcar foram proporcionadas pela aplicação de 3,6 t ha⁻¹ de calcário (dose calculada para elevação da V a 60% na camada 0–40 cm) na cana-soca de terceiro ciclo.

Corretivos da acidez do solo

A correção da acidez pode ser realizada utilizando-se uma série de materiais que, após reação no solo, liberam OH⁻ e/ou HCO₃⁻ (ou HSiO₃⁻), com destaque para os óxidos, os hidróxidos, os silicatos e os carbonatos. Na prática, os calcários são os principais corretivos de acidez de solos usados no Brasil, com a ação neutralizante relacionada com a liberação de OH⁻ e HCO₃⁻ após reação com a umidade do solo.

Os calcários são rochas moídas contendo mistura de CaCO₃ e MgCO₃ em proporções variáveis, apresentando uma classificação quanto ao teor de magnésio (Mg):

a) Calcários calcíticos: <5% de MgO.

b) Calcários magnesianos: entre 5 e 12% de MgO.

c) Calcários dolomíticos: >12% de MgO.

Os calcários dolomíticos têm sido largamente utilizados na cana-de-açúcar por apresentarem teores mais elevados de Mg, constituindo boa fonte desse nutriente para a cultura e com custo de aquisição relativamente baixo. Além disso, o Mg na composição do calcário dilui os custos da operação de correção da acidez, pois se está também fornecendo o nutriente de forma eficiente, considerando-se, nesse sentido, que a calagem incrementa cargas negativas (de natureza variável) no solo, que favorecem a manutenção de cátions básicos no complexo de troca.

A opção pelo uso do calcário com mais ou menos Mg em sua composição deve ser realizada observando-se o teor de Mg²⁺ no solo e o valor de nível crítico para a cultura, de forma que calcários magnesianos ou dolomíticos devem ser preferidos quando se deseja incrementar esse teor. A partir do momento em que o solo apresentar teor de Mg²⁺ acima do nível crítico, é recomendável manter uma relação Ca:Mg entre 3:1 e 4:1. O uso prolongado de calcário dolomítico pode conduzir a estreitamento excessivo da relação Ca:Mg, com potencial impacto negativo na produtividade da cana-de-açúcar por prejuízo à absorção de Mg e consequente desbalanço iônico.

Valor e poder de neutralização dos corretivos

Ao carbonato de cálcio puro (CaCO₃) é atribuído o valor neutralizante (VN) igual a 100%, sendo os valores dos demais corretivos atribuídos de forma relativa a este e considerando-se os teores de CaO e MgO (Tabela 9.9).

Para calcular o VN de um corretivo, utiliza-se a seguinte expressão:

$$VN = (1,79 \times T_{CaO}) + (2,48 \times T_{MgO})$$

Tabela 9.9. Corretivos da acidez e seus correspondentes valores neutralizantes (VN).

Corretivo	Fórmula	VN (%) (Equivalente em CaCO ₃)
Carbonato de cálcio	CaCO ₃	100
Carbonato de magnésio	MgCO ₃	119
Carbonato de cálcio e magnésio	CaCO ₃ .MgCO ₃	109
Hidróxido de cálcio	Ca(OH) ₂	135
Hidróxido de magnésio	Mg(OH) ₂	172
Óxido de cálcio	CaO	179
Óxido de magnésio	MgO	248
Silicato de cálcio	CaSiO ₃	86
Silicato de magnésio	MgSiO ₃	100

Fonte: Adaptado de Sousa et al. (2007).

em que VN é o valor neutralizante (%); 1,79 é a relação entre o VN do CaO e do CaCO₃; T_{CaO} é o teor de CaO do corretivo (%); 2,48 é a relação entre o VN do MgO e o CaCO₃; T_{MgO} é o teor de MgO do corretivo (%).

Na realidade, os teores de CaO e MgO são estimados por meio de análises de Ca e Mg no corretivo, expressando-se esse valor na forma de óxidos (Brasil, 2017). Por isso o VN pressupõe que todos os compostos de Ca e de Mg do corretivo participam da neutralização da acidez do solo, o que não é verdade. Para contornar essa limitação, determina-se o poder neutralizante (PN) do corretivo, por meio de método de reação com uso de ácido clorídrico e titulação com NaOH (Brasil, 2017). O PN é obrigatoriamente informado na embalagem do produto ou na nota fiscal (ou documento auxiliar) juntamente com a informação dos teores presentes de CaO e MgO. Como o PN considera efetivamente o componente de neutralização da acidez, ele geralmente é inferior ao VN . O CaCO₃ puro continua como referência de PN , com valor igual a 100%, e a legislação brasileira estabelece 67% como valor mínimo de PN

do calcário. As garantias mínimas de PN , soma de CaO e MgO e $PRTN$ variam conforme o corretivo (Tabela 9.10) (Brasil, 2006).

Tabela 9.10. Valores mínimos de poder de neutralização (PN), teores de CaO e MgO e poder relativo de neutralização total (PRNT).

Corretivo da acidez	PN	CaO + MgO	PRNT
	(%)		
Calcário	67	38	45
Calcário calcinado	80	43	54
Cal hidratada	94	50	90
Cal virgem	125	68	120
Outros	67	38	45

Fonte: Brasil (2006).

A qualidade do corretivo, além de estar relacionada diretamente com o PN , relaciona-se, também, com a granulometria do material, que permite obter a eficiência relativa ou reatividade (RE) do corretivo (Tabela 9.11).

Tabela 9.11. Eficiência relativa ou reatividade (RE) de classes granulométricas de corretivos de acidez.

Fração granulométrica (mm)	Tamisação (Peneira ABNT)	RE (%)
>2,00	Retida nº 10	0
0,84–2,00	Passa nº 10, retida nº 20	20
0,30–0,84	Passa nº 20, retida nº 50	60
≤0,30	Passa nº 50	100

Fonte: Adaptado de Sousa et al. (2007).

A RE do corretivo é, então, obtida a partir da distribuição granulométrica e respectivos valores de eficiência relativa apresentados na Tabela 9.11. Os valores de eficiência relativa correspondem ao percentual de reação das partículas num período de 3 meses, ou seja, partículas ≤0,30 mm reagem totalmente nesse período, enquanto

partículas pertencentes às classes 0,30–0,84 mm e 0,84–2,00 mm reagem, respectivamente, 60 e 20% no período considerado; e partículas $\geq 2,00$ mm não reagirão nesse período ($RE = \text{zero}$).

$$RE = F_{0,84-2,00} \times 0,2 + F_{0,30-0,84} \times 0,6 + F_{\leq 0,30} \times 1,0$$

em que RE é a reatividade ou eficiência relativa do corretivo (%); $F_{0,84-2,00}$ é o percentual (%) de partículas do corretivo entre 0,84 e 2,00 mm (passa na peneira de nº 10 da ABNT e é retida na peneira de nº 20); $F_{0,30-0,84}$ é o percentual (%) de partículas do corretivo entre 0,30 e 0,84 mm (passa na peneira de nº 12 e é retida na peneira de nº 50); e $F_{\leq 0,30}$ é o percentual (%) de partículas do corretivo com granulometria inferior a 0,30 mm (passa na peneira de nº 50 da ABNT).

Embora se tenha níveis de eficiência relativa em função da granulometria das partículas, isso não quer dizer que a fração superior a 2 mm não reagirá no solo em prazo superior a 3 meses, ou que, num horizonte temporal mais extenso, o valor da eficiência relativa das frações $F_{0,84-2,00}$ e $F_{0,30-0,84}$ permaneça inalterado. Dessa forma, a menor RE do calcário tem relação com o efeito residual mais longo, observando-se, é claro, o limite estabelecido pelo Mapa (Brasil, 2006).

Em algumas situações de manejo, o uso de calcários com menor RE pode ser uma vantagem, como por ocasião da adequação de áreas para implantação do sistema plantio direto em culturas anuais. Essa adequação envolve uma série de atividades para eliminar eventuais problemas físicos e químicos do solo, entre eles a acidez do solo. Como será a última oportunidade de incorporação mecânica do corretivo, recomenda-se, no período anterior à adoção do plantio direto, utilizar corretivo de menor RE , para um efeito residual mais longo (Lopes et al., 2004).

De forma correlata, a reforma do canalial também visa à eliminação de limitações físicas e químicas do solo ao desenvolvimento da cana-de-açúcar, uma cultura semiperene cuja possibilidade de mobilização mecânica mais intensa

do solo se restringe ao período de reforma, que ocorre em intervalos médios de 4 a 6 anos. Nesse sentido, também se pode pensar no uso de corretivo com menor RE no momento da reforma do canalial, principalmente quando há necessidade de preparo profundo do solo, colocando parte da dose do corretivo em profundidade no perfil. Novos arranjos de plantio para controlar o tráfego podem viabilizar preparos em faixas, de forma a localizar parte (1/4) da dose de calcário a cerca de 50 cm de profundidade, ou mesmo em área total com preparo profundo, com resultados de produtividade de colmos e açúcar superiores ao sistema convencional (Figura 9.17), inclusive com respostas máximas entre 5 e 10 t ha⁻¹ de calcário (Garcia, 2018).

Obviamente, existe a questão econômica e logística relacionada ao uso de um corretivo com menor RE em extensas áreas com cana-de-açúcar, com incorporação mecânica em maior profundidade, pois a menor RE implica aumento da dose para aplicação, uma vez que deve ser garantida a ação desejada em período relativamente curto.

É oportuno também destacar que, em termos de legislação, é a distribuição granulométrica das partículas do corretivo que determina sua reatividade (Brasil, 2006), mas, em termos técnicos, se sabe que outros fatores inerentes à natureza dos materiais também interferem na reatividade. Bases fortes, como os óxidos e hidróxidos de Ca e Mg, são mais reativas que bases fracas, como carbonatos e silicatos. Para calcários, os de origem sedimentar apresentam maior reatividade em comparação com os de origem metamórfica (Gallo, 1954; Gallo; Catani, 1954; Soratto et al., 2019), o que direciona à menor necessidade de moagem dos calcários sedimentares, reduzindo custos, e à conveniência de aprimoramento do critério de reatividade adotado na legislação nacional.

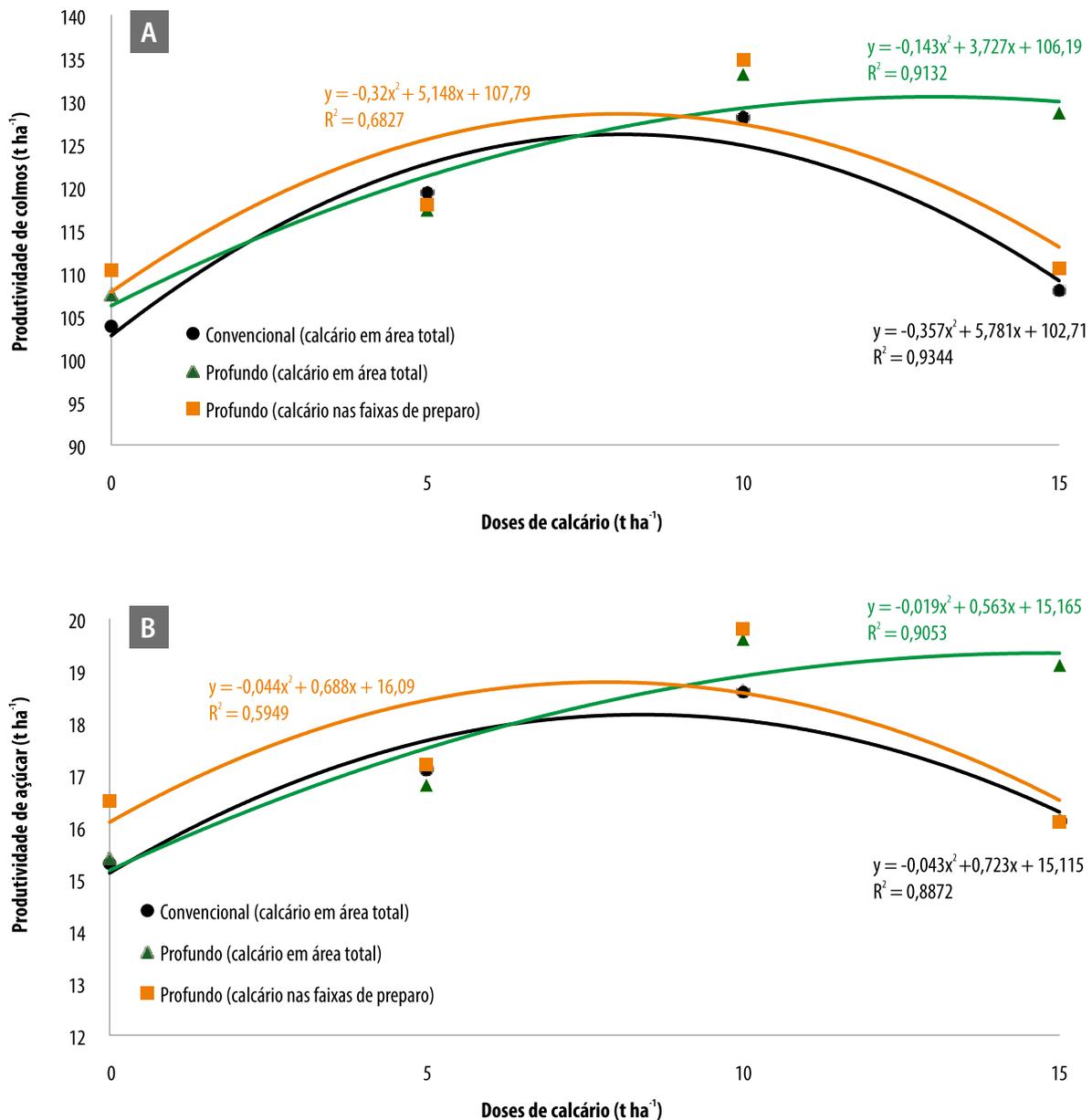


Figura 9.17. Produtividade de colmos (A) e açúcar (B) após reforma do canavial com aplicação de calcário em doses até 15 t ha⁻¹ em área total com preparo convencional para incorporação do corretivo, ou com preparo profundo em área total, ou preparo profundo em faixas.

Fonte: Adaptado de Garcia (2018).

Poder relativo de neutralização total

O poder de neutralização (*PN*) e a reatividade (*RE*) são utilizados para o cálculo do poder relativo de neutralização total (*PRNT*), que representa o percentual do *PN* reativo num período de 3 meses:

$$PRNT = (PN \times RE) / 100$$

em que *PRNT* é o poder relativo de neutralização total (%); *PN* poder neutralizante (%); e *RE* é a reatividade ou eficiência relativa (%).

O *PRNT* é um índice de valor prático, que caracteriza o poder neutralizante efetivo dos corretivos da acidez. Assim, esses corretivos podem ser classificados em quatro grupos:

- a) Grupo A, com *PRNT* entre 45 e 60%.

- b) Grupo B, com *PRNT* entre 60,1 e 75%.
- c) Grupo C, com *PRNT* entre 75,1 e 90%.
- d) Grupo D, com *PRNT* acima de 90%.

Os corretivos da acidez, principalmente os calcários, são de custo relativamente baixo, e os itens econômicos mais impactantes na composição do custo são o transporte para entrega do calcário (frete) e a distribuição do material no campo (mão de obra). De forma geral, o cálculo econômico para aquisição do corretivo deve ser feito por unidade de *PRNT* colocado no local de aplicação (ou redistribuição), devendo-se escolher aquele de menor custo. Deve-se, no entanto, ter especial atenção para os aspectos de manejo mencionados anteriormente, como a necessidade de calcário com maior teor de Mg, quando o teor desse nutriente no solo encontra-se abaixo do nível crítico, e o uso de calcário com menor reatividade na reforma do canal, para obtenção de efeito residual mais longo. Outros aspectos a observar — hoje objeto de estudos em algumas pesquisas — são a subavaliação do *PRNT* dos calcários sedimentares e o efeito da deriva que prejudica a qualidade da aplicação dos calcários mais finos. O fato é que decisões tecnicamente fundamentadas conduzem a maior lucratividade, que compensa o gasto com a escolha de um corretivo diferenciado quanto a algum fator importante para a cultura ou para o sistema produtivo.

Análise química e granulométrica de corretivos

Na determinação dos teores de CaO e MgO, consideram-se duas etapas:

- a) A extração ou solubilização, em que se utiliza como extrator ou solubilizador uma solução de HCl 1+1 e HNO₃ 1+1 a quente para o CaO e apenas o HCl 1+1 para o MgO.

- b) Na determinação do Ca e do Mg contidos no CaO e MgO, respectivamente, utiliza-se método complexiométrico de titulação com EDTA 10 mmol L⁻¹ padronizado com solução-padrão de Ca 10 mmol L⁻¹, preparada com CaCO₃ p.a.

Os teores de CaO e MgO permitem calcular o *IN* do corretivo, que, na indisponibilidade da informação do *PN*, pode ser utilizado para calcular o *PRNT* do corretivo.

Na determinação do *PN*, consideram-se duas etapas:

- a) Neutralização parcial, em que se utiliza como solução a ser neutralizada HCl 0,5 mol L⁻¹ padronizada a quente.
- b) Neutralização total, utilizando-se o método da titulação volumétrica com NaOH 0,25 mol L⁻¹ padronizado.

O princípio dessa análise é uma reação de neutralização ácido-base. O ácido clorídrico é adicionado em excesso, tendo uma fração de sua acidez neutralizada pelas bases do corretivo. A acidez restante é neutralizada pelo NaOH na titulação. Sabendo-se o volume de ácido adicionado e quanto foi neutralizado pelo NaOH, calcula-se, por diferença, quanto do ácido foi neutralizado pela ação do corretivo.

Na determinação da *RE*, a principal operação é o tamisamento da amostra usando-se jogo de peneiras ABNT nº 10, nº 20 e nº 50.

A *RE* é calculada pela seguinte expressão:

$$RE = [(0 \times r_{ABNT\ 10}) + (20 \times r_{ABNT\ 20}) + (60 \times r_{ABNT\ 50}) + (100 \times p_{ABNT\ 50})]/100$$

em que *RE* é a reatividade do calcário (%); 0, 20, 60 e 100 são as eficiências relativas ou reatividades das classes de partículas retidas em cada peneira (Tabela 9.11) (%); *r*_{ABNT 10} é o percentual da amostra retida na peneira ABNT nº 10; *r*_{ABNT 20} é o percentual da amostra retida

na peneira ABNT nº 20; $r_{ABNT 50}$ é o percentual da amostra retida na peneira ABNT nº 50; $p_{ABNT 50}$ é o percentual da amostra que passa na peneira ABNT nº 50.

Procedimentos técnicos para a aplicação de calcário

Distribuição do calcário

O momento de correção da acidez do solo na cultura da cana-de-açúcar ocorre por ocasião do início de cultivo em novas áreas de produção ou no período de reforma do canavial, por causa da possibilidade de aplicação do calcário em área total e posterior incorporação mecânica.

Alguns técnicos têm sugerido a aplicação de calcário de alto PRNT em menores doses no fundo do sulco de plantio, mesmo em áreas mecanizáveis. Esse calcário é comercialmente denominado de “filler”. Tal procedimento é eficiente para incrementar os teores de Ca e Mg no solo, porém, pouco efetivo na correção da acidez, uma vez que há limitada ação em termos de área, confinando o sistema radicular ao local de aplicação do corretivo. Na cana-de-açúcar, onde o sistema radicular senesce e renova-se em vários ciclos, a restrição ao desenvolvimento do sistema radicular é um equívoco.

Outro efeito indesejável dessa prática refere-se à interação com fósforo (P) aplicado na adubação de plantio. Em condição de pH mais elevado, o P do fertilizante reage com Ca do corretivo, formando fosfato de cálcio, que reduzirá a disponibilidade de P para a cultura.

Em áreas declivosas, no entanto, a aplicação localizada do corretivo no fundo do sulco se justifica por ser a única maneira de incorporar o calcário a uma profundidade maior, ou seja, acompanhando a abertura do sulco, mesmo consciente da diminuição da eficiência da adu-

bação fosfatada. Alternativamente, nesse caso, recomenda-se minimizar o uso de fonte mineral solúvel de P, substituindo por fonte orgânica, como a torta de filtro.

A aplicação do calcário no sulco de plantio da cana-de-açúcar para correção da acidez é comum na região dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste, onde os solos são arenosos, com pH $\geq 5,5$, livre de Al^{3+} e com baixos teores de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$. Nessa condição, conforme mencionado anteriormente, a aplicação do calcário no fundo do sulco é recomendada, proporcionando consideráveis incrementos nos teores de cálcio e magnésio.

Incorporação do calcário

Os calcários são os corretivos de acidez de uso mais generalizado, por razões que vão desde questões técnicas e agrônômicas até aspectos econômicos. No entanto, sua baixa solubilidade dificulta a ação em profundidade no perfil do solo, fazendo com que sua aplicação seja acompanhada de incorporação até a profundidade que se deseja corrigir. Em sistema de plantio direto para produção de grãos, por exemplo, a aplicação de calcário na superfície do solo tem geralmente ação limitada aos primeiros 10 cm de profundidade, suficiente, muitas vezes, para garantir bons rendimentos dessas culturas (Caires et al., 1998).

Em cana-de-açúcar, a aplicação de calcário com incorporação é realizada na abertura de novas áreas e na renovação do canavial. Em ambas as situações, é recomendável que a incorporação do calcário seja, em média, realizada até 30 cm de profundidade, pela característica semipere-ne da cultura, pelo fato de 45 a 55% do sistema radicular estar concentrado nessa camada e pela dinâmica de senescência e renovação de parte das raízes durante os seguidos ciclos de soca (Dal Bó et al., 1986).

Em áreas mecanizáveis e de início de cultivo com cana-de-açúcar, quando a quantidade de calcário (QCalc) a aplicar for elevada ($\geq 5,0 \text{ t ha}^{-1}$), recomenda-se a incorporação de metade da dose com grade pesada e a outra metade com arado de disco. No caso de renovação do canavial e recomendação de QCalc elevada, a incorporação apenas com arado de disco é suficiente. Sob condição de declive, em área de encosta, onde a mecanização se restringe apenas a operação de sulcação, sugere-se que uma fração do calcário seja aplicada manualmente no fundo do sulco e a outra fração superficialmente, com posterior incorporação manual quando do fechamento do sulco.

Quando houver necessidade de uma segunda calagem no mesmo ciclo de cultivo, é importante que seja realizada na terceira ou quarta soca, ou seja, de 42 a 48 meses após a primeira aplicação. Nesse caso, o calcário é aplicado na superfície do solo na região de entrelinha da cultura, podendo ser incorporado levemente com cultivador de disco. Conforme mencionado anteriormente, pode-se optar por estratégia de aplicação de calcário com maior efeito residual na implantação ou na reforma do canavial, na tentativa de evitar calagens na cana-soca. Mesmo para situações com uso de cultivo mínimo na implantação do canavial, essa estratégia pode ser interessante. Isso pode ser importante em algumas situações, como na dessecação de áreas com pastagem, seguida de aplicação de calcário e sulcação para plantio da cana, que resulta em melhoria dos atributos de fertilidade do solo semelhante ao que se observa para preparos mais intensivos (Moraes et al., 2019). Essa situação de mudança de uso da terra é comum na expansão atual da cultura da cana no Brasil, e o uso do cultivo mínimo alia o menor custo de implantação do canavial à preservação da estrutura do solo e dos estoques de carbono.

Essa estratégia pode ser acompanhada pela escolha mais criteriosa dos fertilizantes que serão utilizados, principalmente os amoniacais, por causa do efeito de acidificação do solo (Tabela 9.2).

É importante salientar que, para qualquer dos procedimentos técnicos sugeridos, é fundamental o monitoramento dos parâmetros de fertilidade do solo, com especial atenção para o pH, teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , acidez potencial e saturação por bases. Recomenda-se frequência anual para o monitoramento desses parâmetros.

Tempo de reação no solo

O ideal é que a aplicação de calcário seja realizada com pelo menos 90 a 120 dias de antecedência ao plantio da cana-de-açúcar, independentemente se é nova área de cultivo ou área de reforma. Esse tempo é o suficiente para que ocorra a reação do calcário, com consequente correção da acidez do solo e atendimento às necessidades nutricionais da cana-de-açúcar. No entanto, a reação do calcário no solo após a aplicação depende de umidade. Caso o corretivo seja aplicado com a antecedência recomendada, porém em período seco, é possível que não ocorra a reação total do corretivo.

Na prática, entretanto, a colheita da cana-de-açúcar ocorre predominantemente no período seco. No Nordeste estende-se de setembro a março e no Centro-Sul, de março a setembro. Portanto, a renovação do canavial ocorre geralmente no período sem umidade no solo, evidentemente, quando o cultivo não utiliza irrigação. Aliada a essa dificuldade, quando a aplicação de calcário se distancia do plantio, eleva os custos, porque determina dois momentos diferentes no manejo da renovação. Para agravar ainda mais a situação, a adubação de fundação insere-se nesse contexto como outra prática a ser realizada, principalmente no que diz respeito à adubação fosfatada, que, normalmente, é aplicada de uma só vez por ocasião do plantio.

Assim, é comum em áreas de renovação a concentração das práticas de incorporação de calcário, sulcação, adubação de fundação e plantio num mesmo período, geralmente com baixos teores de umidade do solo. Muitos inconvenientes podem ser enumerados nesse caso:

- a) O calcário não reage satisfatoriamente, porque a umidade do solo é reduzida. Consequentemente a planta inicia seu crescimento de arranque em condições de baixo pH e presença de Al^{3+} , o que prejudica a formação inicial do sistema radicular.
- b) O cálcio liberado na restrita reação do calcário pode tornar-se indisponível pela reação com o fósforo que está sendo fornecido na adubação de plantio. Esta, por sua vez, terá sua eficiência reduzida, podendo resultar em plantas deficientes em fósforo, pelo menos no ciclo da cana-planta. Esse problema pode ser minimizado quando o fosfato é adequadamente localizado.
- c) O nitrogênio, que na cana-planta é proveniente principalmente da mineralização da matéria orgânica e da fixação biológica, deixa de ser disponibilizado pelo ambiente ainda ácido do início de crescimento da cultura.
- d) Nos momentos que antecedem a situação em que a cana-de-açúcar deve apresentar o maior equilíbrio nutricional, que deve ocorrer em torno dos 120 dias, todo um ambiente desfavorável foi proporcionado, impedindo que a planta expresse sua capacidade produtiva por restrições nutricionais advindas de uma calagem realizada em momento inapropriado.

A alternativa e recomendação para fugir aos inconvenientes mencionados é a realização da calagem no segundo terço do período seco, quando as primeiras chuvas já permitem o início de reação do corretivo, que evolui com o aumento da precipitação e permite alcançar o período de

máxima expressão nutricional da cultura (± 120 dias), com adequadas condições de correção da acidez e de disponibilidade de nutrientes no solo. Além disso, com essa recomendação, há certo distanciamento entre a calagem e a adubação de fundação, evitando-se a reação indesejada entre o fósforo e o cálcio.

É oportuno lembrar ainda que direcionamentos mais específicos para algumas situações possam envolver o uso de calcários com maior reatividade (Tabela 9.10) e/ou de origem sedimentar, o que talvez implique aplicação de calcário na cana-soca (terceira ou quarta).

Gessagem

O teor elevado de alumínio reduz o crescimento radicular (Adams; Pearson, 1970; Pavan et al., 1982), especialmente o ápice das raízes (Kochian, 1995), que, inicialmente, tornam-se alongadas e, posteriormente, engrossam e não se ramificam normalmente, dificultando o acesso a reservas de água e nutrientes em camadas mais profundas do solo (Clarkson, 1967; McCormick; Borden, 1972; Tang et al., 2003; Rossiello; Jacob Neto, 2006). Em solos de baixa fertilidade, constata-se que a cana-de-açúcar explora camada de cerca de 60 cm de profundidade de solo, embora resultados experimentais observados por Koffler et al. (1986) mostrem que a cana-de-açúcar é capaz de explorar de 120 a 200 cm de solo, desde que não haja barreiras químicas e/ou físicas ao crescimento de raízes.

O cálcio, por sua vez, é um nutriente decisivo no desenvolvimento radicular das plantas (Ritchey et al., 1982). Segundo Quaggio (2000), quando a saturação por Ca^{2+} no complexo de troca é inferior a 20%, há forte restrição ao crescimento de raízes no solo, para a maioria das espécies cultivadas. Como a absorção de Ca^{2+} ocorre nas partes mais novas da raiz (Fernandes; Souza, 2006), é preciso que haja uma distribuição adequada

do nutriente no solo para que a absorção seja contínua.

A calagem é a prática mais eficiente para elevar o pH, os teores de Ca^{2+} e a saturação por bases, além de reduzir o Al^{3+} e sua saturação nos solos. No entanto, a reação do calcário restringe-se ao local de aplicação, não atendendo à correção da acidez no subsolo, que, por sua vez, depende da percolação de sais (Caires et al., 2004). Na verdade, a ação do calcário em profundidade deve ocorrer por meio de uma frente de neutralização da acidez a partir das bases (OH^- e HCO_3^-) resultantes da dissolução das partículas de calcário (Amaral; Anghinoni, 2001). A condição química para existência do HCO_3^- para migração no solo é o pH superior a 6,3, que explica a frente de alcalinização suficiente para manutenção do pH em faixa adequada na camada superficial de solos sob plantio direto, com reaplicação mais frequente de calcário na superfície do solo. No entanto, o efeito do calcário é insatisfatório na correção da acidez em subsuperfície ou ainda abaixo da profundidade de incorporação do corretivo, no caso da cana-de-açúcar.

O manejo da acidez em subsuperfície, e principalmente a redução da toxidez por Al^{3+} , deve, então, ser feito com o uso de gesso, em função de sua alta solubilidade e mobilidade de suas espécies químicas (Ca^{2+} e SO_4^{2-}) no perfil do solo (Shainberg et al., 1989; Ritchey et al., 1995; Quaggio, 2000; Sousa et al., 2007).

Pesquisas têm demonstrado o efeito benéfico do gesso em diversas culturas, com a redução

da acidez em profundidade (Oliveira; Pavan, 1996; Farina et al., 2000; Quaggio, 2000; Rocha, 2007), com o fornecimento de cálcio e enxofre (Caires et al., 2003, 2004; Fernandes et al., 2007), com a melhoria de desenvolvimento do sistema radicular em subsolos originalmente ácidos (Ritchey et al., 1980; Ernani et al., 2001; Caires et al., 2004) e com o aumento na absorção de água pelas plantas (Ritchey et al., 1980; Alcordo; Rechcigl, 1993; Sumner, 1993). Tais efeitos são geralmente atribuídos ao aumento dos teores de Ca^{2+} trocáveis e a diminuição da atividade do Al^{3+} na solução.

Objetivos com a gessagem

O uso do gesso, denominado gessagem, como prática agrícola objetiva principalmente reduzir a acidez em subsuperfície no solo e fornecer cálcio e enxofre para a cana-de-açúcar. A solubilidade do gesso é aproximadamente 180 vezes maior do que a dos calcários, o que pode ser comprovado fazendo-se um paralelo entre a solubilidade do carbonato de cálcio, com valor igual a $0,014 \text{ g L}^{-1}$ (Alcarde, 1992), e a solubilidade do sulfato de cálcio, que é de $2,5 \text{ g L}^{-1}$ (Raij, 1988).

Após solubilização do gesso no solo, seguem-se as reações de troca iônica e formação de complexos e pares iônicos (Figura 9.18).

O ânion sulfato (SO_4^{2-}) presente no gesso é capaz de formar par iônico com o Al^{3+} , o Ca^{+2} e o Mg^{2+} , facilitando a movimentação descendente no perfil do solo (Pavan et al., 1987; Caires et al., 1998). Os complexos AlSO_4^+ e $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3^0$ formados redu-

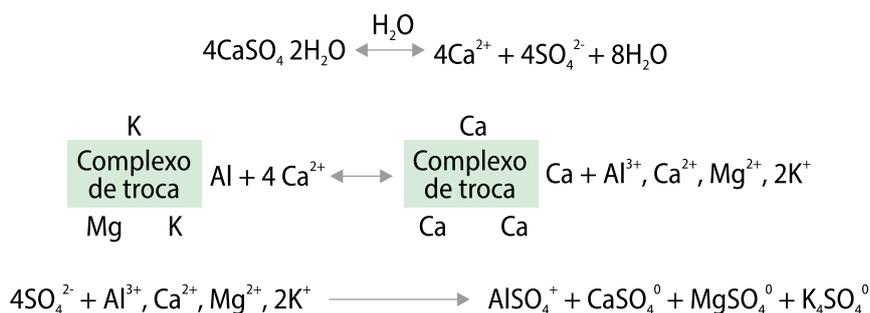


Figura 9.18. Reações de troca iônica e formação de complexos e pares iônicos.

zem a atividade do Al^{3+} em solução, diminuindo seu efeito fitotóxico (Alva; Sumner, 1989; Mclay; Ritchie, 1993; Rossiello; Jacob Neto, 2006).

Além dos efeitos na movimentação dos cátions e na complexação do Al^{3+} com o sulfato, o gesso pode ainda:

- a) Precipitar parte do alumínio na forma de sulfatos básicos (Pavan, 1993), como jurbanita ($\text{AlOHSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), alunita [$\text{KAl}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$] e basaluminita [$\text{Al}_4(\text{OH})_{10}\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$].
- b) Precipitar parte do alumínio como $\text{Al}(\text{OH})_3$, em função da adsorção específica de SO_4^{2-} e consequente liberação de OH^- . Esse processo é muitas vezes denominado “autocalagem” e envolve a polimerização ou precipitação do alumínio como resultado da liberação de OH^- , por causa da troca de ligantes entre SO_4^{2-} e OH^- (Alva et al., 1991). De maneira geral, a magnitude da mudança no pH do solo com a aplicação do gesso, quando ocorre, é da ordem de 0,2 a 0,3 unidade (Silva; Raij, 1992).
- c) Formar complexos com o fluoreto (F^-) (Shainberg et al., 1989; Carvalho; Raij, 1997), de fórmula geral AlF_x ($x = 1-6$). O fluoreto está presente no gesso agrícola ou fosfogesso (ver adiante).
- d) Aumentar a força iônica da solução do solo, causando redução da atividade tóxica de Al^{3+} (Furlani; Berton, 1992).

Paralelamente ao deslocamento do Al^{3+} do complexo de troca do solo pelo Ca^{2+} aplicado via gesso, outros cátions são também deslocados, como K^+ e Mg^{2+} , que, conforme mencionado, também formam pares iônicos com o SO_4^{2-} , originando as respectivas formas neutras (K_2SO_4^0 e MgSO_4^0), além do CaSO_4^0 . Em função da neutralidade elétrica, os pares iônicos apresentam grande mobilidade ao longo do perfil do solo, deslocando-se para camadas mais profundas (Soprano; Alvarez V., 1989).

Tem sido observado que, entre os cátions básicos, o Ca^{2+} trocável tem aumentado de modo uniforme no perfil do solo em função do uso do gesso. A lixiviação de K^+ e Mg^{2+} tem sido resposta frequente nos estudos com aplicação de gesso em solos (Quaggio et al., 1982; Mays; Mortvedt, 1986; Farina; Channon, 1988; Syed-Omar; Sumner, 1991), principalmente a lixiviação de Mg^{2+} (Carvalho et al., 1986; Syed-Omar; Sumner, 1991; Oliveira; Pavan, 1996; Caires et al., 2004). Contudo, essa movimentação não significa que esteja ocorrendo perda, pois se deve considerar que a aplicação do gesso cria condição favorável para que as raízes se desenvolvam em profundidade no solo, podendo absorver esses nutrientes das camadas mais profundas.

De maneira geral, pode-se dizer que diferentes fatores condicionam maior ou menor movimentação dos cátions básicos no perfil do solo (Alvarez V.; Dias, 1994):

- a) Dose de gesso aplicada.
- b) Capacidade de troca catiônica do solo (CTC).
- c) Condutividade elétrica da solução do solo.
- d) Capacidade de adsorção de SO_4^{2-} .
- e) Textura do solo.
- f) Volume de água que drena no solo.

Wadt e Wadt (1999) recomendam que, quando a aplicação de gesso for realizada em doses elevadas no solo, devem ser desenvolvidas estratégias para minimizar as perdas de Mg^{2+} . Em solos arenosos de baixa CTC, por exemplo, é recomendável, quando possível, dividir a aplicação de gesso entre a cana-planta e as socas.

Ainda nesse sentido, recomenda-se não realizar a aplicação do gesso antes do calcário, pois a calagem aumenta a CTC em solos de carga variável, o que promove maior capacidade de adsorção do K^+ e do Mg^{2+} , prevenindo contra perdas excessivas. Retardar um pouco mais a aplicação de gesso em relação à calagem, deixando para

após o plantio ou a rebrota da cana, também é alternativa para minimizar a lixiviação excessiva dos cátions nutrientes.

Efeitos positivos da aplicação de gesso como fonte de enxofre (S) foram obtidos em várias culturas, entre elas a cana-de-açúcar (Viator et al., 2002; Fernandes et al., 2007).

A adição de Ca e S pelo gesso provoca uma série de efeitos paralelos que afetam a disponibilidade de nutrientes no solo. Aumentos do pH no subsolo, por meio da aplicação de gesso, têm sido verificados em alguns trabalhos (Ririe et al., 1952; Quaggio et al., 1982; Belkacem; Nys, 1997; Carvalho; Raij, 1997; Caires et al., 1999), por causa da reação de troca de ligantes na superfície das partículas das argilas, envolvendo óxidos hidratados de Fe e Al e o SO_4^{2-} , deslocando OH^- para a solução e promovendo neutralização parcial da acidez (Reeve; Sumner, 1972).

Na subsuperfície, onde as propriedades eletroquímicas dos minerais de argila predominam sobre as propriedades dos coloides orgânicos, a adsorção específica do ânion SO_4^{2-} , ao transferir sua carga à superfície adsorvente, gera novos sítios para adsorção de cátions, promovendo, assim, aumento na CTC e redução do valor de pH no qual passa a predominar balanço negativo de cargas no solo (Shamshuddin; Ismail, 1995; Wadt, 2000).

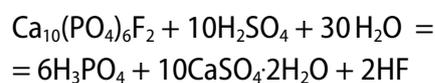
Fontes de gesso

O gesso é utilizado como fertilizante para plantas desde a época antiga dos gregos e romanos (Tisdale; Nelson, 1975).

O gesso natural ou mineral é obtido a partir das rochas gipsíferas (*Mined gypsum*), que ocorrem associadas a quantidades menores de anidrita, calcita, dolomita, halita, enxofre, quartzo e minerais de argila. Tais rochas são designadas de minérios de gipsita sempre que os teores de sulfato ou de gipsita atendam às exigências do mercado consumidor (Accioly; Schulze, 2003).

Usualmente, ocorre na forma di-hidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), embora os sulfatos naturais possam ser encontrados e utilizados em formas menos hidratadas, como a bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) ou gesso argamassa (Vilela et al., 1995) e, ainda, na forma anidra (CaSO_4), a anidrita (Porta, 1998).

O gesso agrícola ou fosfogesso é subproduto originado em grande quantidade a partir da produção de fertilizantes fosfatados, mais especificamente para fabricação de ácido fosfórico, composto base na indústria de fertilizantes fosfatados (Raij, 1988; Malavolta, 1992):



O fosfogesso possui como principal constituinte o sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e, em menores concentrações, outros elementos (P, F, Si, Fe, Al) originalmente presentes na rocha fosfatada (Malavolta, 1992).

A maior parte das pesquisas realizadas com o uso do gesso na agricultura brasileira trata de resultados obtidos com o fosfogesso (Saldanha et al., 2007). A produção nacional de fosfogesso supera 5 milhões de toneladas por ano (Vitti, 2000). Em outros países, o gesso gerado com subproduto em diferentes processos também é reaproveitado: *coal-gypsum*, proveniente da dessulfurização de gases combustíveis; *red-gypsum*, da fabricação de dióxido de titânio; *fluor-gypsum*, do ácido hidrófluídrico; *lacto-gypsum*, do ácido láctico e lactatos; *boron-gypsum*, do ácido ortobórico; e o *organo-gypsum*, oriundo da obtenção de sais orgânicos (Amezqueta et al., 2005).

Tanto o gesso mineral quanto o gesso agrícola têm, predominantemente, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ em sua composição e são comumente chamados apenas de gesso. Morfologicamente, o gesso mineral é mais amorfo na comparação com o gesso agrícola (Figura 9.19), característica que lhe proporciona uma maior superfície específica e,

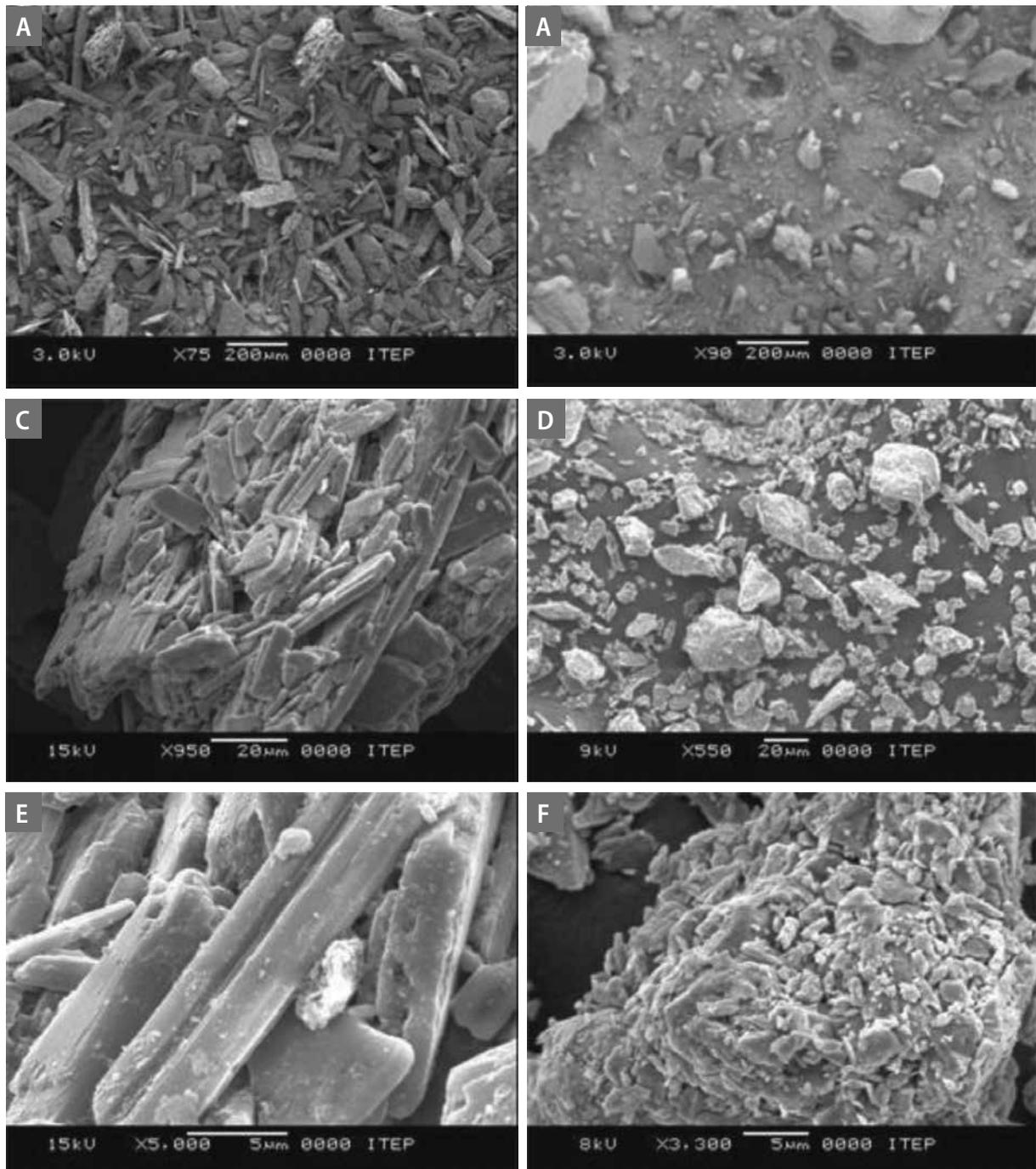


Figura 9.19. Imagens de microscopia eletrônica do gesso agrícola (A, C e E) e do gesso mineral (B, D e F) em estruturas de 5 até 200 µm.

Fonte: Rocha (2007).

consequentemente, maior contato com o solo, intensificando sua reatividade. No que se refere ao uso agrícola, entretanto, não há diferenças quanto aos efeitos de ambos os produtos quando aplicados ao solo (Garrido et al., 2003; Illera et al., 2004; Amezketa et al., 2005).

Sob o ponto de vista ambiental, o uso agrícola do gesso subproduto é bastante interessante no intuito de melhor aproveitamento dos recursos, do modo adequado de disposição final no ambiente, da agregação de valor e geração de riqueza na cadeia produtiva.

Métodos para recomendação da necessidade de gesso

A recomendação da necessidade de gesso (NG) é basicamente realizada para correção de acidez trocável em camadas subsuperficiais e/ou elevação dos teores de cálcio em profundidade. Em cana-de-açúcar, a amostragem do solo, visando à recomendação de gesso, deve ser feita até 60 cm de profundidade. Se, a partir de 20 cm, a saturação por Al for >30% e/ou o teor de Ca for $\leq 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e/ou o teor de Al for $>0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, há grande probabilidade de resposta à aplicação de gesso (Alvarez V. et al., 1999a).

No estado de São Paulo, a gessagem é recomendada quando o valor m na camada 20–40 cm é superior a 40% e/ou o teor de Ca^{2+} é inferior a $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Quaggio; Raij, 1996). Outras recomendações indicam a necessidade da gessagem quando o m é superior a 30% e/ou Ca^{2+} inferior a $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e/ou Al^{3+} é maior do que $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada 20–40 cm (Lopes et al., 2004).

Para fins práticos, o melhor índice para avaliação da toxidez de alumínio é a saturação na CTC efetiva (m) do solo em subsuperfície, cujos valores superiores a 20–30% provocam redução substancial do crescimento das raízes (Quaggio, 2000). Portanto, para a cana-de-açúcar, recomenda-se a aplicação de gesso agrícola quando o valor de m for $\geq 20\%$ e/ou Ca for $<0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Embora os mecanismos de ação do gesso no solo sejam relativamente bem conhecidos, a principal questão quanto ao seu uso agrícola diz respeito aos critérios para recomendação da dose. Na literatura podem ser encontrados diferentes critérios, alguns mais empíricos que outros, mas, no geral, são bons sistemas para recomendação.

Na sequência, são destacados quatro métodos para recomendação do gesso.

Recomendação em função da participação do Ca^{2+} e do Al^{3+} na $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$

Nesse caso, a NG é estimada por meio das seguintes equações, que consideram o status de Ca^{2+} ou Al^{3+} no solo, camada 20–40 cm, e o máximo desejável ou permitido, respectivamente, dessas espécies químicas na CTC do solo:

$$NG = (40/100 \times \text{CTC}_{\text{efetiva}} - \text{Ca}^{2+}) \times 2,5$$

ou

$$NG = (\text{Al}^{3+} - 20/100 \times \text{CTC}_{\text{efetiva}}) \times 2,5$$

em que NG é a necessidade de gesso (t ha^{-1}); $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$ é a capacidade de troca de cátions efetiva, ou seja, ao pH do solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); Ca^{2+} é o teor de cálcio trocável dado pela análise de solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); Al^{3+} é o teor de alumínio trocável dado pela análise do solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); 40/100 é a percentagem desejável de Ca^{2+} na $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$; 20/100 é a percentagem máxima permitida de Al^{3+} na $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$; 2,5 é a quantidade de gesso necessária para elevar o teor de Ca^{2+} ou diminuir o teor de Al^{3+} em $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Esse método foi proposto por Malavolta (1992) e relaciona-se com a presença de teores desejáveis de Ca^{2+} ou limites máximos permitidos de Al^{3+} na $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$, estabelecendo-se uma elevação mínima de $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca^{2+} ou redução de $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , respectivamente, na camada de 20 cm–40 cm de profundidade. O cálculo é realizado por meio das duas fórmulas, recomendando-se para aplicação a maior dose calculada. Posteriormente, Alvarez V. e Dias (1994) sugerem para a cultura do café uma participação de Ca^{2+} na $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$ de 60%, e a fórmula passa a ser descrita da seguinte forma:

$$NG = (60/100 \times \text{CTC}_{\text{efetiva}} - \text{Ca}^{2+}) \times 2,5$$

em que 60/100 é a percentagem desejável de Ca^{2+} na $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$.

Recomendação baseada na saturação por bases

A dose de gesso recomendada por esse método objetiva a elevação da saturação por bases (V) na camada 20–40 cm de profundidade a 50% (Demattê, 1986; Vitti et al., 2008). A recomendação é feita quando a V é igual ou inferior a 35%:

$$NG = [(50 - V_1) \times CTC]/50$$

em que NG é a necessidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); V_1 é a saturação por bases na camada 20–40 cm (%); e CTC é a capacidade de troca de cátions na camada 20–40 cm ($cmol_c\ dm^{-3}$).

Recomendação baseada na textura do solo

Esse método foi proposto por Alvarez V. et al. (1999b) e se baseia na correlação entre o teor de argila em subsuperfície (20–40 cm) e a necessidade de gesso:

$$NG = 0,00034 - 0,002445X^{0,5} + 0,0338886X - 0,00176366X^{1,5}; (R^2 = 0,999)$$

em que NG é a necessidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); e X é o teor de argila (%).

O P remanescente (P-rem) é uma medida para estimar a capacidade do solo em adsorver fósforo, e, pela similaridade química com a dinâmica do sulfato (Alves; Lavorenti, 2004), a NG pode ser também estimada usando-se o P-rem. Ressalta-se que a capacidade do solo em adsorver fosfato e/ou sulfato é muito relacionada com o teor de argila.

Essa recomendação, conforme Sousa et al. (2007), fica:

$$NG = 1,681 - 0,1361X^{0,5} - 0,03045X + 0,002588 X^{1,5}; (R^2 = 0,999)$$

em que NG é a necessidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); e X é o valor do P-rem ($mg\ L^{-1}$).

Para solos da região de Cerrado, Sousa et al. (1995) indicam doses de gesso com base na classe textural do solo e na característica do cultivo:

$$NG = f \times argila$$

em que NG é a necessidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); $argila$ é o teor de argila (%); e f é um fator igual a 0,050 para culturas anuais e 0,075 para culturas perenes.

No caso da cana-de-açúcar, uma cultura semi-perene, sugere-se valor de f igual a 0,0625.

No estado de São Paulo, a recomendação da dose de gesso também é em função da textura do solo, conforme mostrado em Quaggio e Raij (1996):

$$NG = argila \times 6,0$$

em que NG é a necessidade de gesso ($kg\ ha^{-1}$); e $argila$ é o teor de argila do solo na camada subsuperficial 20–40 cm ($g\ kg^{-1}$).

As recomendações de doses de gesso de acordo com o teor argila, para solos cujos teores de cálcio e saturações de alumínio nas camadas subsuperficiais os classificam como responsivos ao gesso, tem como base a sua relação com a capacidade de adsorção de sulfato nas camadas subsuperficiais, que determina a extensão da frente de lixiviação e conseqüentemente a profundidade corrigida enriquecida com quantidades estequiometricamente equivalentes de cálcio e outros cátions trocáveis (adsorção salina).

Recomendação baseada na necessidade de calcário

É uma recomendação de gesso que corresponde a 25% da necessidade de calcário (Alvarez V. et al., 1999b):

$$NG = 25/100\ NC$$

em que NG é a necessidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); 25/100 é o percentual da necessidade de calcário da camada subsuperficial 0–20 cm; e NC é a

necessidade de calagem da camada subsuperficial que se deseja corrigir ($t\ ha^{-1}$).

É importante esclarecer aqui, para que não haja equívocos, que a *NC*, ou seja, o calcário é direcionado para a correção da acidez e promoção de outras melhorias na camada superficial do solo, enquanto a *NG*, ou seja, o gesso é recomendado para condicionamento da camada subsuperficial, onde a ação do calcário é insatisfatória.

Recomendação da quantidade de gesso

Independentemente do método para a *NG*, a dose é suficiente para correção de uma camada com 20 cm de espessura (camada superficial 20–40 cm), considerando-se a aplicação a lanço, em área total.

Dessa forma, entende-se que a *NG* corresponde a uma dose teórica. Particularmente, em cana-de-açúcar, em áreas de implantação ou renovação de canavial, é recomendável a correção até 60 cm de profundidade. Como a recomendação para incorporação de calcário é até 30 cm, a espessura da camada em subsuperfície para condicionamento pelo uso do gesso corresponderá a 30 cm. Nessas áreas de implantação ou renovação do canavial, o gesso é aplicado a lanço em área total. No caso de aplicação em soqueira, a superfície de cobertura não será de 100%, bem como quando o manejo determina aplicação no sulco de plantio, como em áreas muito declivosas de encosta.

Assim, a quantidade de gesso (*QG*) pode ser calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$QG = NG(sc/100) \times (ec/20)$$

em que *QG* é a quantidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); *NG* é a necessidade de gesso ($t\ ha^{-1}$); *sc* é a superfície de cobertura em que o gesso será aplicado (%); e *ec* é a espessura da camada a ser corrigida (cm).

De maneira geral, deve-se dar preferência aos critérios de *NG* que levam em consideração as características texturais e/ou químicas do solo, que se encontram associadas à movimentação de bases e/ou ao equilíbrio no complexo de troca e adsorção de sulfato. Por sua vez, geralmente as quantidades de gesso não são muito elevadas e, por isso, é plausível considerar um programa de correção e manejo da acidez com aplicações anuais ou bianuais de gesso.

Há cerca de 10 anos alguns agricultores utilizaram com “aparente sucesso” doses de gesso até $40\ t\ ha^{-1}$, prática denominada “irrigação branca”, por causa do aspecto esbranquiçado da superfície do solo e do aparente melhor uso da água pela planta (provavelmente pelo melhor desenvolvimento do sistema radicular).

Embora os dados sobre os efeitos positivos do gesso como melhorador do ambiente radicular sejam abundantes no Brasil, não se pode negligenciar a ocorrência de perdas excessivas de potássio e magnésio, tal qual reportado para a região do Cerrado, quando doses elevadas de gesso são usadas (Lopes et al., 2004). O Mg^{2+} e o K^+ podem ser lixiviados para além de 60 cm de profundidade em função de doses elevadas de gesso (Rossato et al., 2017), principalmente se após a aplicação de doses de calcário também elevadas em solos de textura média a arenosa.

Nesse sentido, a pesquisa agrícola ainda não conseguiu estabelecer as bases técnicas para recomendação de doses mais específicas de gesso, considerando-se as características físico-químicas e mineralógicas do solo, bem como a profundidade de ação, o que poderia viabilizar doses mais altas de gesso, porém, sem efeitos adversos.

Efeitos do gesso no sistema radicular

As respostas ao gesso como melhorador ou condicionador químico do ambiente radicu-

lar em profundidade têm sido observadas em muitas culturas agrícolas. Essas respostas são atribuídas à melhor distribuição das raízes das culturas em profundidade, que propicia às plantas o aproveitamento de maior volume de água, fundamental em ciclos curtos de estresse hídrico, como nos Cerrados do Centro-Oeste e nos Tabuleiros Costeiros do Nordeste, com extensas áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar pode ser severamente afetada por causa do desenvolvimento radicular insatisfatório, uma vez que a planta apresenta elevado consumo de água, necessitando de 250 kg de água para cada 1 kg de matéria seca (Shigaki et al., 2004). Assim, em regiões onde ocorre estresse hídrico com frequência ou mesmo veranicos curtos, uma prática de grande importância para o aumento do acesso à água pelas raízes é o manejo químico do solo, visando à eliminação de barreiras químicas provocadas pelo alumínio (Al), as quais impossibilitam a exploração de um maior volume de solo pelas plantas.

Além disso, a eficiência nutricional é incrementada pela exploração de maior volume de solo, particularmente importante para o fósforo (P), e com enraizamento mais profundo, absorvendo nutrientes que porventura tenham sido carreados para camadas subsuperficiais, como é o caso do nitrogênio (N) (NO_3^- e NH_4^+) e o potássio (K).

Particularmente, em cana-de-açúcar, o aumento dos teores de cálcio (Ca) e a redução da saturação por Al em subsuperfície proporcionam maior volume de raízes em camadas mais profundas do solo (Figura 9.20), favorecendo a distribuição mais uniforme do sistema radicular, como constatou Rocha (2007). A associação entre calcário e gesso ou o uso exclusivo do gesso proporcionaram respostas semelhantes de distribuição das raízes abaixo dos 40 cm de profundidade (Figura 9.21), evidenciando-se a ação mais restrita do calcário à camada superficial do solo, em contraposição ao efeito do gesso no aprofundamento do sistema radicular.

Calagem e gessagem na produção de cana-de-açúcar

De modo geral, respostas à calagem estão muito relacionadas com o ano agrícola, com a ocorrência de chuvas suficientes ou não e com a distribuição dessas chuvas, que tornam o desenvolvimento das plantas e a produtividade da cultura mais ou menos dependentes do pleno desenvolvimento do sistema radicular (Tabelas 9.12 e 9.13).

Marinho et al. (1980), pesquisando o efeito da calagem em solos fortemente ácidos em Alagoas, obtiveram respostas favoráveis de produtividade da cana-planta e das duas soqueiras avaliadas (Figura 9.23). O padrão de resposta é tipicamente quadrático para o aumento das doses, com maiores incrementos de produtividade nas doses menores, tendendo a um ponto de inflexão onde as doses aplicadas tornam-se excessivas, com efeito negativo na produtividade. No caso do trabalho de Marinho et al. (1980), doses acima de $7,0 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário já não evidenciaram incrementos na produtividade ou resultaram em queda na comparação com as doses menores testadas (Figura 9.22).

Os programas de melhoramento genético em atividade no Brasil foram responsáveis pelo desenvolvimento de variedades adaptadas às mais variadas condições de solo, incluindo-se solos ácidos.

Em seis usinas do estado de São Paulo, Rossetto et al. (2004) buscaram respostas à calagem em cana-de-açúcar e somente encontraram acréscimos de produção significativos em duas delas, confirmando certa adaptação das cultivares a solos ácidos de menor fertilidade (Tabela 9.14).

Quando se associa o uso do calcário com o gesso, as respostas são mais consistentes. Medina e Brinholi (1998), estudando os efeitos da apli-

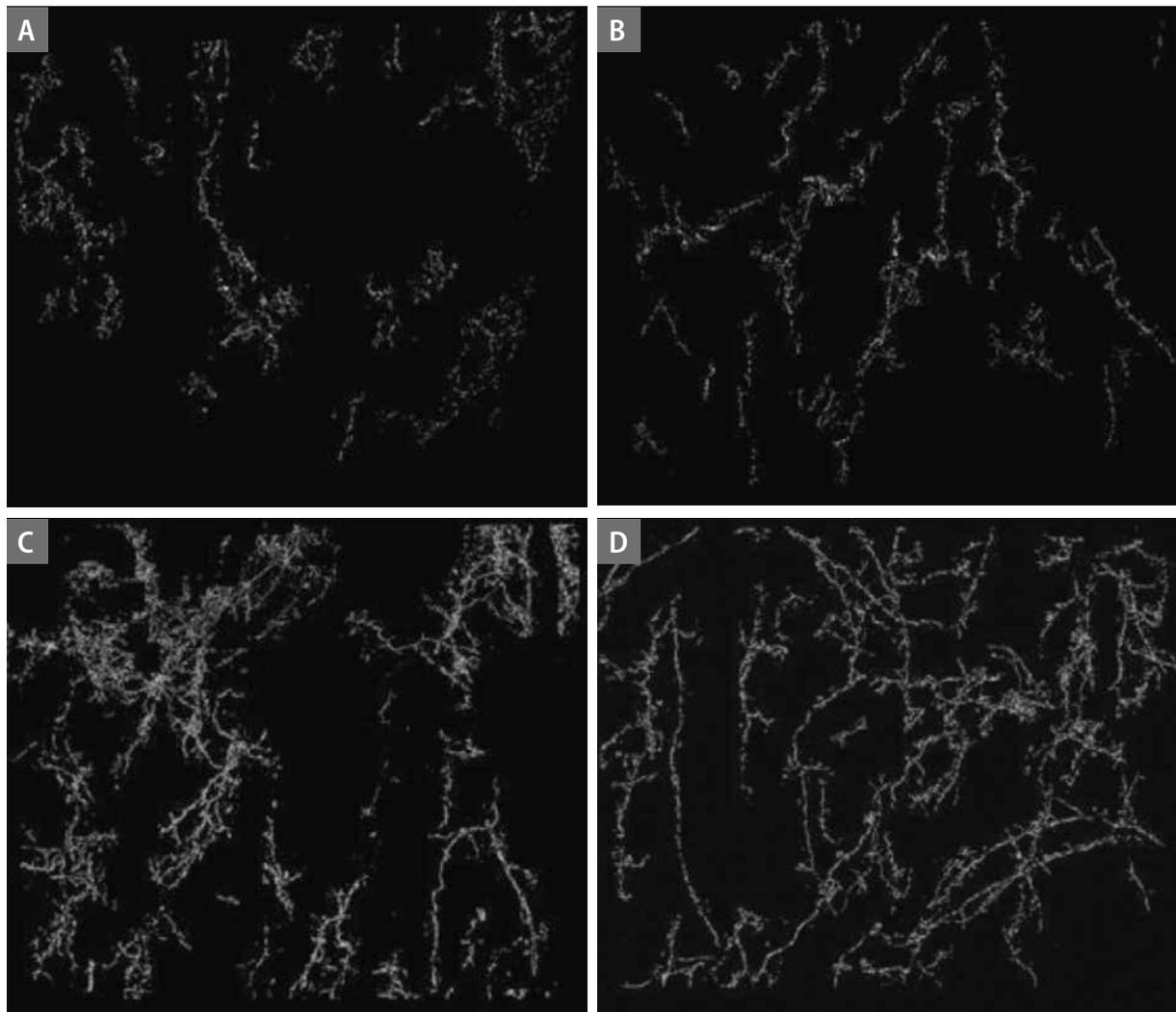


Figura 9.20. Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar na profundidade 40–80 cm em solo sem aplicação de calcário e gesso (A) e com aplicação de calcário (B), calcário + gesso (C) e somente gesso (D).

Fonte: Rocha (2007).

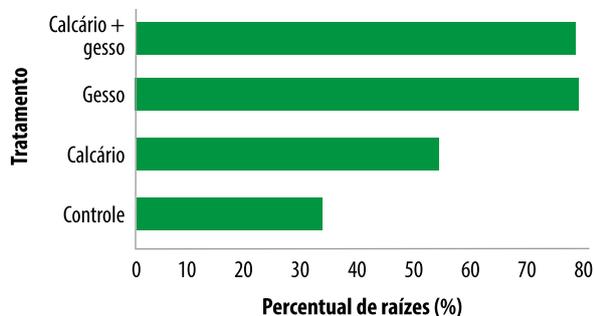


Figura 9.21. Proporção de raízes de cana-de-açúcar na camada 40–80 cm de profundidade, em relação à camada mais superficial de 0–40 cm, em solos sem aplicação de calcário e gesso (controle), com aplicação exclusiva de calcário ou gesso; e com a aplicação de calcário + gesso.

Fonte: Rocha (2007).

cação de calcário e gesso na produção de cana-de-açúcar, constataram que os maiores incrementos são obtidos com a associação calcário/gesso. Os resultados evidenciaram também que menores produtividades foram obtidas quando do uso exclusivo do gesso. O efeito negativo da aplicação isolada de gesso na produtividade das culturas, conforme já mencionado neste capítulo, se dá pela movimentação descendente de SO_4^{2-} , que tem como consequência lixiviação de Mg^{2+} e K^+ para região de menor exploração radicular (Singh et al., 1980; Raij et al., 1988).

Rocha (2007) encontrou resposta significativa à aplicação da associação calcário/gesso em

Tabela 9.12. Produção de cana-de-açúcar em função da aplicação de calcário no sulco de plantio em usinas dos estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte.

Tratamento	Usina				
	Santa Teresinha	São Francisco	Catente	Santana	Baía Formosa
	TCH ⁽¹⁾				
NPK sem calcário	76,0a	76,0b	104,0a	137,0a	77,0a
NPK com calcário	76,0a	87,7a	95,5b	147,2a	74,8a

⁽¹⁾ Produção em toneladas de colmos por hectare, na cana-planta.

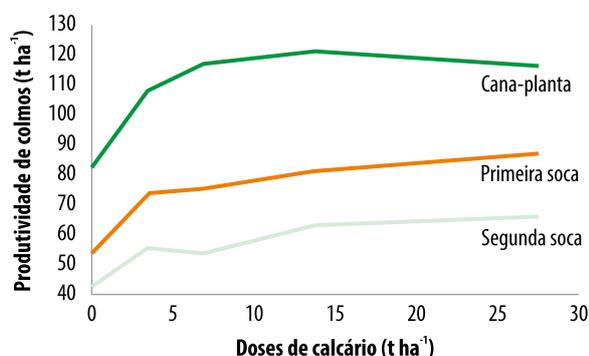
Fonte: Adaptado de Planalsucar (1980).

Tabela 9.13. Produção de cana-de-açúcar em função da aplicação de calcário a lanço em área total em usinas dos estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte.

Tratamento	Usina							
	Cucaú	Laisa	Barreiros	Baía Formosa	União Indústria	São Francisco	Catente	Trapiche
	TCH ⁽¹⁾							
NPK sem calcário	114,3a	71,7a	75,0a	40,7b	59,0a	96,0a	83,3b	51,3b
NPK com calcário	116,5a	75,4a	77,4a	45,7a	57,5a	95,0a	91,0a	64,0a

⁽¹⁾ Produção em toneladas de colmos por hectare, na cana-planta.

Fonte: Adaptado de Planalsucar (1980).

**Figura 9.22.** Produção de cana-de-açúcar em função da aplicação de calcário no solo em Porto Calvo no estado de Alagoas.

Fonte: Adaptado de Marinho et al. (1980).

cana-planta na variedade SP78-4764 (Figura 9.22). A máxima produtividade (88,2 t ha⁻¹) foi obtida com a aplicação de 5,6 t ha⁻¹ de gesso, associada com dose de 4,6 t ha⁻¹ de calcário, calculada utilizando-se o critério de elevação do cálcio e do magnésio. A dose de gesso para a máxima produtividade, em associação com o calcário, pro-

porcionou incremento de 12,5 t ha⁻¹ de colmos, comparativamente ao uso exclusivo do calcário.

O autor observou, entretanto, que 3,42 t ha⁻¹ de gesso foram suficientes para reduzir a saturação por Al³⁺ em subsuperfície e proporcionar elevada produtividade, de 86,2 t ha⁻¹, o que foi atribuído à suficiente disponibilidade de cálcio no solo, com consequente melhoria do desenvolvimento radicular e nutrição das plantas.

Resultados consistentes da aplicação associada de calcário/gesso foram obtidos por Morelli et al. (1992), principalmente porque avalia-se o efeito residual dessa associação na produção de cana-de-açúcar em quatro cortes e calcula-se o custo da aplicação transformado em toneladas por hectare, permitindo estimativa de balanço financeiro, bem como considerando-se o ganho adicional de produção e o custo associados aos insumos (Tabela 9.15).

Tabela 9.14. Produção de cana-de-açúcar em função da aplicação de calcário a lanço em área total em usinas do estado de São Paulo.

Tratamento	Usina					
	Santa Bárbara ⁽¹⁾	Ester ⁽¹⁾	São Francisco ⁽¹⁾	Barra Grande ⁽¹⁾	Arnália ⁽¹⁾	Arnália ⁽²⁾
NC ⁽³⁾	TCH (t ha ⁻¹)					
0,0	125,4	134,3	125,6	152,6	147,4	115,0
0,5	126,5	131,8	128,1	156,4	151,1	118,0
1,0	131,0	132,1	131,6	157,1	154,5	116,0
2,0	133,1	132,7	132,0	153,1	155,2	116,0

⁽¹⁾ Produção em cana planta. ⁽²⁾ Produção em cana-soca. ⁽³⁾ Necessidade de calagem.

Fonte: Adaptado de Rossetto et al. (2004).

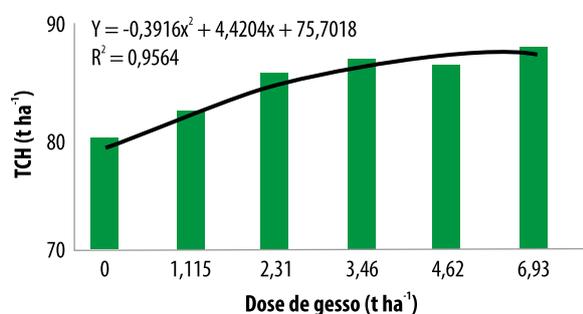


Figura 9.23. Produção de cana-de-açúcar, em toneladas de colmos por hectare (TCH), da variedade SP78-4762 em função de doses de gesso aplicadas em associação com 4,6 t ha⁻¹ de calcário.

Fonte: Rocha (2007).

Percebe-se pelos resultados da Tabela 9.15 que o custo de aplicação do calcário e gesso foi pago totalmente pelo ganho adicional em produtividade em 50% das combinações testadas já na primeira colheita da cana. A partir da segunda colheita da cana, praticamente todo o custo com calcário e gesso foi amortizado, gerando receita líquida média adicional de 13,3 t ha⁻¹ de colmos.

É importante registrar aqui que outros materiais, como escórias de siderurgia e termofosfatos, também têm sido utilizados na correção da acidez em solos com cana-de-açúcar.

A escória de siderurgia apresenta liberação mais lenta de nutrientes quando comparada com o calcário, o que pode ser bastante positivo para

culturas perenes ou semiperenes. Esse material tem sido bastante utilizado na região da Flórida nos Estados Unidos, proporcionando respostas satisfatórias (Elawad et al., 1982; Anderson et al., 1987, 1991). No Brasil, a escória de siderurgia em pré-plantio promoveu efeito residual positivo na produção da soqueira de cana-de-açúcar, comparativamente ao calcário calcítico aplicado (Figura 9.24) (Prado et al., 2003).

Além dos benefícios diretos às culturas, a utilização agrícola de escórias de siderurgia representa rota para reciclagem desse material e utilização racional dos recursos naturais.

Outras pesquisas têm mostrado o potencial dos termofosfatos (Ramos et al., 2006), que, além de serem muito utilizados na adubação com fósforo, também contribuem no manejo da correção da acidez de solos cultivados com cana-de-açúcar.

Rossetto et al. (2004) observaram as respostas significativas à calagem em apenas dois, de seis experimentos, com acréscimos de produtividade de cana de 8 e 13 t ha⁻¹, o que confirma a adaptação das cultivares plantadas em solos ácidos e de baixa fertilidade. Por sua vez, a resposta da cana ao potássio foi de natureza linear e significativa em sete das dez avaliações, tanto na cana-planta como em soqueiras. A interação calcário-potássio não foi significativa em

Tabela 9.15. Acréscimos de produção de colmos de cana-de-açúcar em quatro cortes em função da aplicação de calcário e gesso, custo associado aos insumos e ganho líquido (balanço: acréscimo total – custo).

Tratamento		Acréscimo de produção					Custo ⁽¹⁾	Ganho líquido
Calcário	Gesso	1º Corte	2º Corte	3º Corte	4º Corte	Total		
(t ha ⁻¹)								
0	0	–	–	–	–	–	–	–
0	2	7	5	5	12	29	3,3	25,7
0	4	8	12	8	22	50	5,1	44,9
0	6	9	11	9	23	52	6,9	45,1
2	0	7	10	6	22	45	5,7	39,3
2	2	9	12	10	28	59	8,9	50,1
2	4	18	18	12	25	73	10,8	62,2
2	6	11	14	7	30	62	12,6	49,4
4	0	8	13	9	25	55	9,9	45,1
4	2	18	21	13	38	90	13,2	76,8
4	4	11	21	14	28	74	15,0	59,0
4	6	13	31	7	26	77	16,8	60,2
6	0	4	8	8	25	45	14,2	30,8
6	2	7	13	17	37	74	17,4	56,6
6	4	9	12	8	30	59	19,2	39,8
6	6	5	19	15	38	77	21,1	55,9

⁽¹⁾ Custo do calcário + custo gesso + custo aplicação.

Fonte: Adaptado de Morelli et al. (1992).

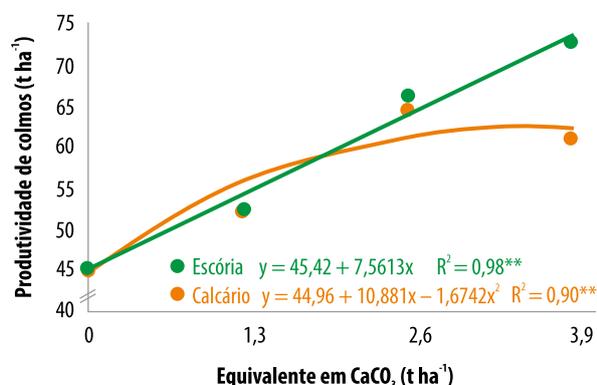


Figura 9.24. Produção de soqueira de cana-de-açúcar de quarto corte em função da aplicação em pré-plantio de doses equivalentes de CaCO₃ via escória de siderurgia e calcário.

Fonte: Adaptado de Prado et al. (2003).

nenhuma avaliação, mostrando a pouca interdependência entre essas práticas no manejo da fertilidade do solo para a cana-de-açúcar.

Considerações finais

O emprego de corretivos da acidez de solos cultivados com cana-de-açúcar é uma prática eficiente e sem contestação técnica ou ambiental, o qual permite obter produtividades mais elevadas, pela correção da acidez do solo, pela elevação dos teores de cálcio e magnésio trocáveis, pela redução dos teores tóxicos de alumínio e manganês, bem como pelos efeitos indiretos na nutrição mineral das plantas.

O gesso agrícola é um importante insumo para o manejo químico do perfil do solo, complementarmente aos benefícios do calcário, e deve ser utilizado para melhoria das condições de desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar em profundidade.

Na implantação ou renovação do canavial, recomenda-se a aplicação de calcário a lanço em área total e incorporação até 30 cm de profundidade com arado de disco, antecedendo-se a aplicação de gesso, que deve ser recomendado para correção da acidez de 30 até 60 cm de profundidade, aplicado a lanço na superfície.

Em áreas de encostas, como comumente encontradas no cultivo de cana-de-açúcar no Nordeste, pela dificuldade da incorporação, o calcário deve ser aplicado localizadamente no sulco de plantio na reforma ou implantação do canavial. Dessa forma, é recomendado evitar a aplicação de calcário concomitantemente à adubação fosfatada e, se possível, substituir parcial ou totalmente a adubação mineral pelo uso da torta de filtro no sulco.

Em solos arenosos, o gesso pode ser aplicado parceladamente, evitando-se perdas significativas de magnésio e potássio, principalmente, quando recomendado em doses elevadas ($>4 \text{ t ha}^{-1}$).

Recomenda-se, também, após cada corte, monitorar a acidez do solo até 60 cm de profundidade, de modo a subsidiar uma segunda calagem e/ou gessagem, sempre que o teor de cálcio estiver inferior a $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

O manejo da acidez do solo, em favor de produtividades mais competitivas e do uso racional dos recursos minerais, requer o acompanhamento periódico dos atributos do solo, o estabelecimento de estratégias de adubação e correção alinhadas com as características do insumo ou do condicionador do solo, bem como o manejo das relações cálcio e magnésio, com vistas à sustentabilidade do sistema produtivo.

Referências

- ABREU JÚNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. *Scientia Agricola*, v. 60, n. 2, p. 337-343, abr./jun. 2003. DOI: [10.1590/S0103-90162003000200019](https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000200019).
- ACCIOLY, A. C. A.; SCHULZE, S. M. B. B. **Noções de geologia e evolução da Bacia do Araripe**. Recife: UFRPE, 2003. 9 p.
- ADAMS, F.; PEARSON, R. W. Differential response of cotton and peanuts to subsoil acidity. *Agronomy Journal*, v. 62, n. 1, p. 9-12, Jan./Feb. 1970. DOI: [10.2134/agronj1970.00021962006200010003x](https://doi.org/10.2134/agronj1970.00021962006200010003x).
- ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo: Anda, 1992. 26 p. (Boletim técnico, 6).
- ALCORDO, I. S.; RECHCIGL, J. E. Phosphogypsum in agriculture: a review. *Advances in Agronomy*, v. 49, p. 55-119, 1993. DOI: [10.1016/S0065-2113\(08\)60793-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60793-2).
- ALVA, A. K.; SUMNER, M. E. Alleviation of aluminum toxicity to soybeans by phosphogypsum or calcium sulfate in dilute nutrient solutions. *Soil Science*, v. 147, n. 4, p. 278-85, Apr. 1989. DOI: [10.1097/00010694-198904000-00007](https://doi.org/10.1097/00010694-198904000-00007).
- ALVA, A. K.; SUMNER, M. E.; MILLER, W. P. Salt absorption in gypsum amended acid soils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW PH, 2., 1990, Beckley. **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: Springer, 1991. p. 93-97. (Developments in plant and soil sciences, v. 45).
- ALVAREZ V., V. H. **Efecto de los factores cantidad, intensidad y capacidad amortiguadora de fosfato en la evolución del fósforo disponible, de suelos derivados de cenizas volcánicas de La Meseta Tarasca, Edo. Michoacán**. 1982. 300 f. Tese (Doutorado em Ciências) -- Colegio de Potsgraduados, Chapingo.
- ALVAREZ V., V. H.; DIAS, L. E. **Enxofre**. Brasília, DF: Abeas, 1994. 106 p.
- ALVAREZ V., V. H.; DIAS, L. E.; RIBEIRO, A. C.; SOUZA, R. B. Uso de gesso agrícola. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999a. p. 67-78.
- ALVAREZ V., V. H.; NOVAES, R. F.; BARROS, N. F.; CATARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999b. p. 25-32.

- ALVAREZ V., V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. p. 43-60.
- ALVES, M. E.; LAVORENTI, A. Sulfate adsorption and its relationships with properties of representative soils of the São Paulo State, Brazil. **Geoderma**, v. 118, n. 1-2, p. 89-99, Jan. 2004. DOI: [10.1016/S0016-7061\(03\)00186-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00186-1).
- AMARAL, A. S. do; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 695-702, abr. 2001. DOI: [10.1590/S0100-204X2001000400013](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000400013).
- AMEZKETA, E.; ARAGÜÉS, R.; GAZOL, R. Efficiency of sulfuric acid, mined gypsum, and two gypsum by-products in soil crusting prevention and sodic soil reclamation. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 3, p. 983-987, May 2005. DOI: [10.2134/agronj2004.0236](https://doi.org/10.2134/agronj2004.0236).
- ANDERSON, D. L.; JONES, D. B.; SNYDER, G. H. Response of a rice-sugarcane rotation to calcium silicate slag on Everglades Histosols. **Agronomy Journal**, v. 79, n. 3, p. 531-535, May/June 1987. DOI: [10.2134/agronj1987.00021962007900030026x](https://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900030026x).
- ANDERSON, D. L.; SNYDER, G. H.; MARTIN, F. G. Multi-year response of sugarcane to calcium silicate slag on Everglades Histosols. **Agronomy Journal**, v. 83, n. 5, p. 870-874, Sept./Oct. 1991. DOI: [10.2134/agronj1991.00021962008300050019x](https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300050019x).
- AZEREDO, D.F.; BOLSANELLO, J.; MANHÃES M. S.; WEBER, H. Doses de calcário, gesso, mistura de calcário/gesso, interação calcário x fósforo e calcário x potássio em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 6., 1996, Maceió. **Anais...** Piracicaba: Stab, 1996. p. 477- 483.
- AZEREDO, D. F.; GLÓRIA, N. A.; MANHÃES, M. S. Efeitos da calagem na cana-planta e nas características químicas de dois solos do Estado do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 2., 1981, Rio de Janeiro. **Anais...** Piracicaba: Stab, 1981. p. 71-88.
- BELKACEM, S.; NYS, C. Effects des formes et doses d'amendements et de gypse sur les caractéristiques chimiques et les percolats d'unsol forestier acide. **Annales des Sciences Forestières**, v. 54, p. 69-180, 1997.
- BENEDINI, M. S. **Novo conceito no uso de calcário em cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1988. 19 p. (Série agrônômica, 16).
- BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 3, p. 565-573, May/June 2006. DOI: [10.1590/S0100-06832006000300016](https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000300016).
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos**. Brasília, DF, 2017. 230 p.
- BRASIL. Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução normativa SDA nº 35, de 04 de julho de 2006. **Diário Oficial da União**, seção 1, p. 1-10, 12 jul. 2006.
- CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; CARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 275-286, Mar./Apr. 2003. DOI: [10.1590/S0100-06832003000200008](https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200008).
- CAIRES, E. F.; CHUERI, 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**, v. 22, n. 1, p. 27-34, Jan./Mar. 1998. DOI: [10.1590/S0100-06831998000100004](https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000100004).
- CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; MENDES, J.; CHUERI, W. A.; MADRUGA, E. F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 315-327, Apr./June 1999. DOI: [10.1590/S0100-06831999000200016](https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000200016).
- CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; CARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações Químicas do Solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 125-136, jan./fev. 2004. DOI: [10.1590/S0100-06832004000100013](https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100013).
- CARE, D. A. The effect of aluminum concentration on root hairs in white clover (*Trifolium repens* L.). **Plant and Soil**, v. 171, n. 1, p. 159-162, Apr. 1995. DOI: [10.1007/BF00009580](https://doi.org/10.1007/BF00009580).
- CARVALHO, L. J. C. B.; GOMIDE, R. L.; RODRIGUES, G. C.; SOUSA, D. G. M.; FREITAS-JÚNIOR, E. de. Resposta do milho à aplicação de gesso e déficit hídrico em solos de cerrado. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1., 1985, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa-DDT, 1986. p. 61-83.
- CARVALHO, M. C. S.; RAIJ, B. van. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth.

- Plant and Soil**, v. 192, n. 1, p. 37-48, May 1997. DOI: [10.1023/A:1004285113189](https://doi.org/10.1023/A:1004285113189).
- CATE, J. R. B. **Sugestões para adubação com base na análise de solo**: primeira aproximação. Recife: North Carolina State University, 1965. 16 p.
- CAVALCANTI, F. J. de A.; SANTOS, J. C. P. dos; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L. da; FREIRE, F. J.; SILVA, D. J.; SOUSA, A. R. de; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B. de; BURGOS, N.; LIMA JÚNIOR, M. A.; GOMES, R.; V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco**: 2ª aproximação. Recife: IPA, 1998. 198 p.
- CLARKSON, D. T. Interactions between aluminum and phosphorus on root surfaces cell wall material. **Plant and Soil**, v. 27, n. 3, p. 347-355, Dec. 1967. DOI: [10.1007/BF01376328](https://doi.org/10.1007/BF01376328).
- COLEMAN, N. T.; KAMPRATH, E. J.; WEED, S. B. Liming. **Advances in Agronomy**, v. 10, p. 475-522, 1959. DOI: [10.1016/S0065-2113\(08\)60073-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60073-5).
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 3ª aproximação. Belo Horizonte: Epamig, 1978. 80 p.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 4ª aproximação. Lavras, 1989. 159 p.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre, 2004. 401 p.
- CORDEIRO, D. A. **Efeitos da calagem e da adubação potássica sobre a produção de colmo e o equilíbrio nutricional da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1978. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- CORRÊA, J. B.; COSTA, P. C. da; LOPES, A. S.; CARVALHO, J. G. de. Avaliação de H + Al pelo método SMP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIIRAS, 12, 1985, Caxambu. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, 1985. p. 111-112.
- DAL BÓ, M. A.; RIBEIRO, A. C.; COSTA, L. M.; THIÉBAUT, J. T. L.; NOVAIS, R. F. Efeito da adição de diferentes fontes de cálcio em colunas de solo cultivadas com cana-de-açúcar: I. Movimentação de bases no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, n. 3, p. 195-198, set./dez. 1986.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 328-354.
- DEMATTÊ, J. L. I. Solos arenosos de baixa fertilidade: estratégia de manejo. In: SEMINÁRIO AGROINDUSTRIAL, 5.; SEMANA “LUIZ DE QUEIROZ”, 29., 1986, Piracicaba. [**Anais...**] Piracicaba: [s.n.], 1986. Mimeografado.
- ELAWAD, S. H.; GASGHO, G. J.; STREET, J. J. Response of sugarcane to silicate source and rate: I. Growth and yield. **Agronomy Journal**, v. 74, n. 3, p. 481-483, May/June 1982. DOI: [10.2134/agronj1982.00021962007400030019x](https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400030019x).
- ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. S.; BAYER, C. Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 4, p. 825-831, out./dez. 2001. DOI: [10.1590/S0103-90162001000400026](https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000400026).
- FARINA, M. P. W.; CHANNON, P. Acid-subsoil amelioration: II. Gypsum effects on growth and subsoil chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, n. 1, p. 175 -180, Jan./Feb. 1988. DOI: [10.2136/sssaj1988.03615995005200010031x](https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200010031x).
- FARINA, M. P. W.; CHANNON, P.; THIBAUD, G. R. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: II. Long-term soil effects. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 2, p. 652-658, Mar. 2000. DOI: [10.2136/sssaj2000.642652x](https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642652x).
- FERNANDES, M. B.; FREIRE, F. J.; COSTA, F. G. B. Gesso mineral como fonte de enxofre para cana-de-açúcar. **Caatinga**, v. 20, n. 4. p. 101-109, out./dez. 2007.
- FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. Absorção de nutrientes. In: FERNANDES, M. S. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 115-152.
- FOY, C. D. Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soils. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 7-12, p. 959-987, 1988. DOI: [10.1080/00103628809367988](https://doi.org/10.1080/00103628809367988).
- FOY, C. D.; CHANEY, R. L.; WHITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 29, p. 511-566, June 1978. DOI: [10.1146/annurev.pp.29.060178.002455](https://doi.org/10.1146/annurev.pp.29.060178.002455).
- FREIRE, F. J. **Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-açúcar**. 2001. 150 f. Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- FREIRE, F. M.; GUIMARÃES, P. T. G.; VENEGAS, V. H. A.; MELLES, C. do C. A. **Calagem, gessagem e adubação do cafeeiro**. Belo Horizonte: EPAMIG, 1984. 20 p. (Epamig. Boletim técnico, 11).

- FURLANI, P. R.; BERTON, R. S. Atividade de cálcio e alumínio e desenvolvimento radicular. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., 1992, Uberaba. **Anais...** Uberaba: Ibrafos, 1992. p. 121-138.
- FURLANI, P. R.; CLARK, R. B. Screening sorghum for aluminum tolerance in nutrient solutions. **Agronomy Journal**, v. 73, n. 4, p. 587-594, July/Aug. 1981. DOI: [10.2134/agronj1981.00021962007300040005x](https://doi.org/10.2134/agronj1981.00021962007300040005x).
- GALLO, J. R. Estudo da solubilidade, em solução de ácido acético a 1%, de alguns materiais calcários de grau de finura comercial. **Bragantia**, v. 13, n. 10, p. 133-139, maio 1954. DOI: [10.1590/S0006-87051954000100010](https://doi.org/10.1590/S0006-87051954000100010).
- GALLO, J. R.; CATANI, R. A. Solubilidade de alguns tipos de calcários. **Bragantia**, v. 13, n. 5, p. 63-74, abr. 1954. DOI: [10.1590/S0006-87051954000100005](https://doi.org/10.1590/S0006-87051954000100005).
- GAMA, M. A. P.; PROCHNOW, L. I.; GAMA, J. R. N. F. Avaliação da acidez potencial pelo método pH SMP em solos do Nordeste Paraense. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 23.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 7.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 5.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 2., 1998, Caxambu. **Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas: consolidando um paradigma: resumos**. Lavras: UFLA, 1998. p. 548.
- GARCIA, C. P. **Efeitos do preparo profundo do solo e da calagem na compactação do solo e na produtividade da cana-de-açúcar**. 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) -- Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu.
- GARRIDO, F.; ILLERA, V.; VIZCAYNO, C.; GARCÍA-GONZALEZ, M. T. Evaluation of industrial by-products as soil acidity amendments: chemical and mineralogical implications. **European Journal of Soil Science**, v. 54, p. 411-422, June 2003. DOI: [10.1046/j.1365-2389.2003.00522.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00522.x).
- GLOBALFERT. **Outlook Globalfert**: 2020. [S.l.], 2020. 155 p.
- ILLERA, V.; GARRIDO, F.; VIZCAYNO, C.; GARCÍA-GONZALEZ M. T. Field application of industrial by-products as Al toxicity amendments: chemical and mineralogical implications. **European Journal of Soil Science**, v. 55, p. 681-692, Dec. 2004. DOI: [10.1111/j.1365-2389.2004.00640.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00640.x).
- INSTITUTO DA POTASSA & FOSFATO. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2. ed. rev. e ampl. Piracicaba: Potafos, 1998. 177 p.
- KAMINSKI, J.; GATIBONI, L. C.; RHEINHEIMER, D. S.; MARTINS, J. R.; SANTOS, E. J. S.; TISSOT, C. A. Estimativa da acidez potencial em solos e sua implicação no cálculo da necessidade de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 1107-1113, Oct./Dec. 2002. DOI: [10.1590/S0100-06832002000400029](https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400029).
- KAMINSKI, J.; SILVA, L. S. da; CERETTA, C. A.; SANTOS, D. R. dos. Acidez e calagem em solos do Sul do Brasil: aspectos históricos e perspectivas futuras. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 307-332, 2007.
- KAMPRATH, E. J. **Soil acidity and response to liming**. Raleigh: North Carolina State University, 1967. 21 p. (IST. Technical Bulletin, 4).
- KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 46, p. 237-260, June 1995. DOI: [10.1146/annurev.pp.46.060195.001321](https://doi.org/10.1146/annurev.pp.46.060195.001321).
- KOFFLER, N. F.; LIMA, J. F. W. F.; LACERDA, M. F.; SANTANA, J. F.; SILVA, M. A. **Caracterização edafo-climática das regiões canavieiras do Brasil**: Pernambuco. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1986. 78 p.
- KOYAMA, H.; TODA, T.; HARA, T. Brief exposure to low-pH stress causes irreversible damage to the growing root in *Arabidopsis thaliana*: pectin-Ca interaction may play an important role in proton-rhizotoxicity. **Journal of Experimental Botany**, v. 52, n. 355, p. 361-368, Feb. 2001. DOI: [10.1093/jexbot/52.355.361](https://doi.org/10.1093/jexbot/52.355.361).
- LOPES, A. S. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2. ed. rev. amp. Piracicaba: Potafos, 1998. 177 p.
- 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.
- MACEDO, C. C. de; KINET, J. M.; SINT JAN, V. van. Effects of duration and intensity of aluminum stress on growth parameters in four rice genotypes differing in aluminum sensitivity. **Journal of Plant Nutrition**, v. 20, n. 1, p. 181-193, 1997. DOI: [10.1080/01904169709365241](https://doi.org/10.1080/01904169709365241).
- MAEDA, S.; KURIHRA, C. H.; HERNANI, L. C.; FABRICIO, A. C.; SILVA, W. M. **Estimativa da acidez potencial, pelo método do pH SMP, em solos do Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa-CPAO, 1997. 25 p. (Embrapa-CPAO. Boletim de pesquisa, 3). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/241103/1/CPAODOCUMENTOS3ESTIMATIVADAACIDEZPOTENCIALPELOMETODOPHSMPEMSOLOSDOMATOGROSSOD2.pdf>. Acesso em: 25 set. 2020.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola**: adubos e adubação. 3. ed. São Paulo: Agronômico Ceres, 1981. 596 p.

- MALAVOLTA, E. O gesso agrícola no ambiente e na nutrição da planta - perguntas e respostas. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., 1992, Uberaba. **Anais...** São Paulo: Ibrafos, 1992. p. 41-66.
- MARINHO, M. L.; ALBUQUERQUE, G. A. C. Calagem. In: ORLANDO FILHO, J. (coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: Planalsucar, 1983. p. 181-208.
- MARINHO, M. L.; ALBUQUERQUE, G. A. C.; ARAÚJO FILHO, J. T. Efeito da calagem sobre a cana-de-açúcar em solo argiloso fortemente ácido em Alagoas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 14., 1980, Cuiabá. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1980. p. 14-19.
- MARINHO, M. L.; ARAÚJO FILHO, J. T. **Calibração do Al no solo para cana-de-açúcar em Alagoas**. Piracicaba: IAA/ Planalsucar, 1981. 17 p.
- MARION, G. M.; HENDRICKS, D. M.; DUTT, G. R.; FULLER, W. H. Aluminum and silica solubility in soils. **Soil Science**, v. 121, n. 2, p. 76-85, Feb. 1976. DOI: [10.1097/00010694-197602000-00003](https://doi.org/10.1097/00010694-197602000-00003).
- MAYS, D. A.; MORTVEDT, J. J. Crop response to soil applications of phosphogypsum. **Journal of Environmental Quality**, v. 15, n. 1, p. 78-81, Jan./Mar. 1986. DOI: [10.2134/jeq1986.00472425001500010018x](https://doi.org/10.2134/jeq1986.00472425001500010018x).
- MCCORMICK, L. H.; BORDEN, F. Y. Phosphate fixation by aluminum in plant roots. **Soil Science Society of America Journal**, v. 36, n. 5, p. 799-807, Sept./Oct. 1972. DOI: [10.2136/sssaj1972.03615995003600050031x](https://doi.org/10.2136/sssaj1972.03615995003600050031x).
- MCLAY, C. D. A.; RITCHIE, G. S. P. Effect of gypsum on wheat grown in pots containing an acidic subsoil. In: INTERNATIONAL PLANT NUTRITION COLLOQUIUM, 12., 1993, Perth. **Plant nutrition: from genetic engineering to field practice**. Dordrecht: Springer, 1993. p. 747-750, 1993. (Developments in plant and soil sciences, v. 45).
- MEDINA, C. de C.; BRINHOLI, O. Uso de resíduos agroindustriais na produção de cana-de-açúcar, açúcar e álcool. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 11, p. 1821-1825, nov. 1998.
- MIELNICZUK, J.; LUDWICK, A.; BOHNEN, H. **Recomendações de adubo e calcário para os solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 1969. 38 p. (UFRGS-FAV. Boletim técnico, 2).
- MIRANDA, L. N. de; MIRANDA, J. C. C. de; REIN, T. A.; GOMES, A. C. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 6, p. 563-572, jun. 2005. DOI: [10.1590/S0100-204X2005000600006](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000600006).
- MOHR, W. A influência da acidez sobre a fertilidade dos solos. In: CONGRESSO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 1., 1960, Campinas. **Anais...** São Paulo: Secretaria da Agricultura, 1960. 23 p.
- MORAES, E. R. de; MAGESTE, J. G.; PEIXOTO, J. V. M.; DOMINGUES, L. A. da S.; LANA, R. M. Q.; LEMES, E. M. Soil fertility under different tillage systems in sugarcane expansion area. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 8, p. 1236-1243, Aug. 2019. DOI: [10.21475/ajcs.19.13.08.p1504](https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.08.p1504).
- MOREIRA, A.; ALMEIDA, M. P. de; COSTA, D. G.; SANTOS, L. S. Acidez potencial pelo método do pH SMP no Estado do Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 1, p. 89-92, jan. 2004. DOI: [10.1590/S0100-204X2004000100013](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000100013).
- MORELLI, J. L.; DALBEN, A. E.; ALMEIDA, J. O. C.; DEMATTÊ, J. L. I. Calcário e gesso na produtividade da cana-de-açúcar e nas características químicas de um Latossolo de textura média álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, n. 2, p. 187-194, maio/ago. 1992.
- NASCIMENTO, C. W. A. Acidez potencial estimada pelo pH SMP em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 679-682, July/Sept. 2000. DOI: [10.1590/S0100-06832000000300021](https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000300021).
- OLIVEIRA, E. C. A. de. **Dinâmica de nutrientes na cana-de-açúcar em sistema irrigado de produção**. 2008. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) -- Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- OLIVEIRA, E. L. de; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil and Tillage Research**, v. 38, n. 1-2, p. 47-57, Aug. 1996. DOI: [10.1016/0167-1987\(96\)01021-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)01021-5).
- ORLANDO FILHO, J.; BITTENCOURT, V. C.; CARMELLO, Q. A. de C.; BEAUCLAIR, E. G. F. de. Relações K, Ca e Mg de solo areia quartzosa e produtividade da cana-de-açúcar. **Stab: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 14, n. 5, p. 13-17, maio/jun. 1996.
- PAVAN, M. A. Effect of SO_4^{2-} salts on exchangeable aluminum. **Ciência e Cultura**, v. 45, n. 2, p. 123-126, 1993.
- PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T. Toxicity of aluminum to coffee seedlings grown in nutrient solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 5, p. 993-997, Sept./Oct. 1982. DOI: [10.2136/sssaj1982.03615995004600050021x](https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050021x).
- PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PEREIRA, F. J. Influence of calcium and magnesium salts on acid soil chemistry and calcium nutrition of apple. **Soil Science of America Journal**, v. 6, p. 1526-1530, Nov./Dec. 1987. DOI: [10.2136/sssaj1987.03615995005100060022x](https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100060022x).

- PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Toxicity of aluminium to coffee in ultisols and oxisols amended with CaCO_3 , MgCO_3 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 6, p. 1201-1207, Nov./Dec. 1982. DOI: [10.2136/sssaj1982.03615995004600060017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600060017x).
- PAVAN, M. A.; OLIVEIRA, E. L.; MIYAZAWA, M. Determinação indireta da acidez extraível do solo (H + Al) por potenciometria com a solução tampão SMP. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, v. 39, p. 307-312, 1996.
- PEREIRA, H. S.; KORNDÖRFER, G. H.; MOURA, W. F.; CORRÊA, G. F. Extratores de silício disponível em escórias e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 265-274, Mar./Apr. 2003. DOI: [10.1590/S0100-06832003000200007](https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200007).
- PEREIRA, M. G.; VALLADARES, G. S.; SOUZA, J. M. P. F.; PÉREZ, D. V.; ANJOS, L. H. C. dos. Estimativa da acidez potencial pelo método do pH SMP em solos do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 159-162, jan./mar. 1998. DOI: [10.1590/S0100-06831998000100021](https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000100021).
- PLANALSUCAR. **Relatório anual da seção de solos e adubação**. Rio Largo, 1983. 67 p.
- PLANALSUCAR. **Relatório anual da seção de solos e adubação**. Rio Largo, 1980. 78 p.
- PORTA, J. Methodologies for the analysis e characterization of gypsum in soils: a review. **Geoderma**, v. 87, n. 1-2, p. 31-46, Dec. 1998. DOI: [10.1016/S0016-7061\(98\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00067-6).
- PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 287-296, mar./abr. 2003. DOI: [10.1590/S0100-06832003000200009](https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200009).
- QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2000. 111 p.
- QUAGGIO, J. A.; DECHEN, A. R.; RAIJ, B. van. Efeitos da aplicação de calcário e gesso sobre a produção de amendoim e a lixiviação de bases no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 6, n. 3, p. 189-194, set./dez. 1982.
- QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. Correção da acidez do solo. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. p. 14-19. (IAC. Boletim técnico, 100).
- QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van; MALAVOLTA, E. Alternative use of the SMP-buffer solution to determine lime requirement of soils. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, v. 16, n. 3, p. 245-260, 1985. DOI: [10.1080/00103628509367600](https://doi.org/10.1080/00103628509367600).
- RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1981. 142 p.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres; Piracicaba: Potafos, 1991. 343 p.
- RAIJ, B. van. **Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1988. 88 p.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; FURLANI, P. R. Efeito, na reação do solo, da absorção de amônio e nitrato pelo sorgo, na presença e na ausência de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 12, n. 1, p. 131-136, jan./abr. 1988.
- RAMOS, L. A.; NOLA, A.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. de. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 5, p. 849-857, Sept./Oct. 2006. DOI: [10.1590/S0100-06832006000500011](https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000500011).
- REEVE, N. G.; SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity in Natal oxisols by leaching of surface-applied amendments. **Agrochimophysics**, v. 4, n. 1, p. 1-5, Jan. 1972.
- RENGEL, Z. Role of calcium in aluminum toxicity. **New Phytologist**, v. 121, n. 4, p. 499-513, Aug. 1992. DOI: [10.1111/j.1469-8137.1992.tb01120.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb01120.x).
- RENGEL, Z.; ZHANG, W. H. Role of dynamics of intracellular calcium in aluminium-toxicity syndrome. **New Phytologist**, v. 159, n. 2, p. 295-314, Aug. 2003. DOI: [10.1046/j.1469-8137.2003.00821.x](https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00821.x).
- RIRIE, D.; TOTH, S. J.; BEAR, F. E. Movement and effect of lime and gypsum in soil. **Soil Science**, v. 73, n. 1, p. 23-36, Jan. 1952. DOI: [10.1097/00010694-195201000-00004](https://doi.org/10.1097/00010694-195201000-00004).
- RITCHEY, K. D.; FELDHAKE, C. M.; CLARK, R. B.; SOUSA, D. M. G. de. Improved water and nutrient uptake from subsurface layers of gypsum-amended soils. In: KARLEN, D. L.; WRIGHT, R. J.; KEMPER, W. O. (ed.). **Agricultural utilization of urban and industrial by-products**. Madison: ASA, 1995. p. 157-182. (ASA special publication, n. 58). DOI: [10.2134/asaspecpub58.c8](https://doi.org/10.2134/asaspecpub58.c8).
- RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E.; COSTA, U. F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savanna oxisols. **Soil Science**, v. 133, n. 6, p. 378-382, June 1982. DOI: [10.1097/00010694-198206000-00007](https://doi.org/10.1097/00010694-198206000-00007).
- RITCHEY, K. D.; SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in

a brazilian savannah oxisol. **Agronomy Journal**, v. 72, n. 1, p. 40-44, Jan./Feb. 1980. DOI: [10.2134/agronj1980.00021962007200010009x](https://doi.org/10.2134/agronj1980.00021962007200010009x).

ROCHA, A. T. da. **Gesso mineral na melhoria do ambiente radicular da cana-de-açúcar e implicações na produtividade agrícola e industrial**. 2007. 69 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) -- Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

RODELLA, A. A.; ZAMBELLO JÚNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. Calibração de cálcio, magnésio e acidez do solo para a cana-de-açúcar cultivada na região de Cerrado. **Stab: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 2, p. 45-48, 1984.

ROSSATO, O. B.; FOLTRAN, R.; CRUSCIOL, C. A. C.; MARTELLO, J. M.; ROSSETO, R.; MCCRAY, J. M. Soil fertility, ratoon sugarcane yield, and post-harvest residues as affected by surface application of lime and gypsum in southeastern Brazil. **Bioscience Journal**, v. 33, n. 2, p. 276-287, Mar./Apr. 2017. DOI: [10.14393/BJ-v33n2-32755](https://doi.org/10.14393/BJ-v33n2-32755).

ROSSETTO, R.; SPIRONELLO, A.; CATARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Calagem para a cana-de-açúcar e sua interação coma adubação potássica. **Bragantia**, v. 63, n. 1, p. 105-119, 2004. DOI: [10.1590/S0006-87052004000100011](https://doi.org/10.1590/S0006-87052004000100011).

ROSSIELLO, R. O. P.; JACOB NETO, J. Toxidez de alumínio em plantas: novos enfoques para um velho problema. In: FERNANDES, M. S. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 375-418.

RYAN, P. R.; REID, R. J.; SMITH, F. A. Direct evaluation of the Ca²⁺-displacement hypothesis for Al toxicity. **Plant Physiology**, v. 113, n. 4, p. 1351-1357, Apr. 1997. DOI: [10.1104/pp.113.4.1351](https://doi.org/10.1104/pp.113.4.1351).

SÁ, J. C. de M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: SBCS: UFLA, 1999. p. 267-320.

SALDANHA, E. C. M.; ROCHA, A. T. da; OLIVEIRA, E. C. A. de; NASCIMENTO, C. W. A. do; FREIRE, F. J. Uso do gesso mineral em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. **Caatinga**, v. 20, n. 1, p. 36-42, jan./mar. 2007.

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 em formação caiuíá – noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 257-264, Mar./Apr. 2003. DOI: [10.1590/S0100-06832003000200006](https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200006).

SANCHES, P. A.; SALINAS, J. G. Low-input technology for maneging oxisols and ultisols in tropical América.

Advances in Agronomy, v. 34, p. 279-406, 1981. DOI: [10.1016/S0065-2113\(08\)60889-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60889-5).

SANTOS, M. B. G. dos. **Influência da correção da acidez com calcário e gesso na movimentação de cátions e lixiviação de nitrogênio**. 1993. 132 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) -- Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SCHMEHL, W. R.; HUMBERT, R. P. Nutrient deficiencies in sugar crops. In: SPRAGUE, H. B. (ed.). **Hunger signs in crops: a symposium**. 3rd. ed. New York: David McKay, 1964. p. 145-150.

SHAINBERG, I.; SUMNER, M. E.; MILLER, W. P.; FARINA, M. P. W.; PAVAN, M. A.; FEY, M. V. Use of gypsum on soils: a review. In: STEWART, B. A. (ed.). **Advances in Soil Science**. New York: Springer, 1989. p. 1-111.

SHAMSHUDDIN, J.; ISMAIL, H. Reactions of ground magnesium limestone and gypsum in soil with variable-charge minerals. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, n. 1, p. 106-112, Jan./Feb. 1995. DOI: [10.2136/sssaj1995.03615995005900010017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900010017x).

SHIGAKI, F.; FREITAS, N.; BERTO A.; CEDDIA, M. B.; ZONTA, E.; LIMA, E. Influência do estresse hídrico nos parâmetros de crescimento, acúmulo de N e produtividade de diferentes variedades de cana-de-açúcar em Miracema - RJ. **Revista Universidade Rural: Série Ciências da Vida**, v. 24, n. 1, p. 63-71, jan./jun. 2004.

SHOEMAKER, H. E.; MCLEAN, E. O.; PRATT, P. F. Buffer methods for determining lime requirement of soil with appreciable amounts of extractable aluminum. **Soil Science Society of America Journal**, v. 25, n. 4, p. 274-277, July/Aug. 1961. DOI: [10.2136/sssaj1961.03615995002500040014x](https://doi.org/10.2136/sssaj1961.03615995002500040014x).

SILVA, C. A.; AVELLAR, M. L.; BERNARDI, A. C. C. Estimativa da acidez potencial pelo pH SMP em solos do Semi-Árido do Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 689-692, July/Sept. 2000. DOI: [10.1590/S0100-06832000000300023](https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000300023).

SILVA, E. B.; DIAS, M. S. C.; GONZAGA, E. I. C.; SANTOS, N. M. Estimativa da acidez potencial pelo pH SMP em solos da região norte do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 2, p. 561-565, Apr./June 2002. DOI: [10.1590/S0100-06832002000200031](https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200031).

SILVA, E. de B.; COSTA, H. A. O.; FARNEZI, M. M. de M. Acidez potencial estimada pelo método do pH SMP em solos da região do Vale do Jequitinhonha no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 4, p. 751-757, July/Aug. 2006. DOI: [10.1590/S0100-06832006000400016](https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000400016).

SILVA, I. R.; SMYTH, T. J.; ISRAEL, D. W.; RAPER, C. D.; RUFTY, T. W. Magnesium is more efficient than calcium

in alleviating aluminum rhizotoxicity in soybean and its ameliorative effect is not explained by the Gouy-Chapman-Stern model. **Plant and Cell Physiology**, v. 42, n. 5, p. 538-545, May 2001. DOI: [10.1093/pcp/pce066](https://doi.org/10.1093/pcp/pce066).

SILVA, N. M. da; RAIJ, B. van. O uso do gesso e do superfosfato simples na cultura do algodoeiro. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 2., 1992, Uberaba. **Anais...** São Paulo: IBRAFOS, 1992. p. 159-74.

SIMÕES NETO, D. E. **Avaliação da fertilidade fosfatada e recomendação de fósforo para cana-de-açúcar em solos de Pernambuco**. 2008. 105 f. Tese (Doutorado em Agronomia) -- Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SINGH, B. R.; ABRAHAMSEN, G.; STUANES, A. Effects of simulated acid rain on sulfate movement in acid forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 1, p. 75-80, Jan./Feb. 1980. DOI: [10.2136/sssaj1980.03615995004400010017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400010017x).

SOPRANO, E.; ALVAREZ V., V. H. Nutrientes lixiviados de colunas de solo tratados com diferentes sais de cálcio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, n. 1, p. 25-29, jan./abr. 1989.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, A. M.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; VITTI, G. C. Reactivity of sedimentary and metamorphic limestones of different particle sizes under controlled conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v. 50, n. 4, p. 464-473, 2019. DOI: [10.1080/00103624.2019.1566920](https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1566920).

SOUSA, D. M. G.; CARVALHO, L. J. C. B.; MIRANDA, L. N. Correção da acidez do solo. In: GOEDERT, W. J. (ed.). **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel; Brasília, DF: Embrapa, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, 1985. p. 90-127.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 81-96.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso de gesso agrícola nos solos dos cerrados**. Planaltina, DF: EMBRAPA-CPAC, 1995. 20 p. (EMBRAPA-CPAC. Circular técnica, 32).

SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N. de; LOBATO, E.; CASTRO, L. H. R. de. Métodos para determinar as necessidades de calagem em solos dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, n. 2, p. 193-198, maio/ago. 1989.

SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N. de; OLIVEIRA, S. A. de. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 205-274.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. van; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M. G. de A.; ROSSETTO, R. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. p. 237-239. (IAC. Boletim técnico, 100).

SUMNER, M. E. Gypsum and acid soils: the world scene. **Advances in Agronomy**, v. 51, p. 1-32, 1993. DOI: [10.1016/S0065-2113\(08\)60589-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60589-1).

SYED-OMAR, S. R.; SUMNER, M. E. Effect of gypsum on soil potassium and magnesium status and growth of alfafa. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v. 22, n. 19-20, p. 2017-2028, 1991. DOI: [10.1080/00103629109368554](https://doi.org/10.1080/00103629109368554).

TAN, K.; KELTJENS, W. G.; FINDENEGG, G. R. Effect of nitrogen form on aluminum toxicity in sorghum genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 15, n. 9, p. 1383-1394, 1992. DOI: [10.1080/01904169209364405](https://doi.org/10.1080/01904169209364405).

TANG, C.; ZENGEL, Z.; DIATLOFF, E.; GAZEY, C. Responses of wheat and barley to liming on a sandy soil with subsoil acidity. **Field and Crops Research**, v. 80, n. 3, p. 235-244, Jan. 2003. DOI: [10.1016/S0378-4290\(02\)00192-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00192-2).

TAYLOR, G. J.; MCDONALD-STEPHENS, J. L.; HUNTER, D. B.; BERTSCH, P. M.; ELMORE, D.; RENGEL, Z.; REID, R. J. Direct measurement of aluminium uptake and distribution in single cells of *Chara corallina*. **Plant Physiology**, v. 123, n. 3, p. 987-996, July 2000. DOI: [10.1104/pp.123.3.987](https://doi.org/10.1104/pp.123.3.987).

TEIXEIRA, P. C.; CAMPOS, D. V. B. de; SALDANHA, M. F. C. pH do solo. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 199-202.

TISTALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers**. 3rd. ed. New York: MacMillan, 1975. 694 p.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. 4th. ed. New York: Macmillan Publishing, 1985. 754 p.

TOLRÀ, R. P.; POSCHENRIEDER, C.; LUPPI, B.; BARCELÓ, J. Aluminium-induced changes in the profiles of both organic acids and phenolic substances underlie Al tolerance in *Rumex acetosa* L. **Environmental and Experimental Botany**, v. 54, n. 3, p. 231-238, Nov. 2005. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2004.07.006](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.07.006).

VIATOR, R. P.; KOVAR, J. L.; HELMARK, W. B. Gypsum and compost effects on sugarcane root growth, yield, and plant nutrients. *Agronomy Journal*, v. 94, n. 6, p. 1332-1336, Nov. 2002. DOI: [10.2134/agronj2002.1332](https://doi.org/10.2134/agronj2002.1332).

VILELA, L.; RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E. Respostas da soja e do milho ao enxofre num Latossolo vermelho-escuro sob vegetação de cerrado no distrito federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 19, n. 2, p. 281-285, maio/ago. 1995.

VITTI, G. C. **Uso eficiente do gesso agrícola na agropecuária**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2000. 30 p.

VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre. In: FERNANDES, M. S. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 299-325.

VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C. de; MALAVOLTA, E.; DIAS, A. S.; SERRANO, C. G. de E. **Uso de gesso em sistema de produção agrícola**. Piracicaba: Gape, 2008. 104 p.

WADT, P. G. S. Alterações eletroquímicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo tratado com carbonato e sulfato de cálcio. *Scientia Agrícola*, v. 57, n. 3, p. 519-524, July/Sept. 2000. DOI: [10.1590/S0103-90162000000300023](https://doi.org/10.1590/S0103-90162000000300023).

WADT, P. G. S.; WADT, L. H. de O. Movimentação de cátions em amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo incubadas com duas fontes de cálcio. *Scientia Agrícola*, v. 56, n. 4, p. 1157-1164, out./dez. 1999. Suplemento. DOI: [10.1590/S0103-90161999000500018](https://doi.org/10.1590/S0103-90161999000500018).

ZAMBELLO JÚNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. **Adubação da cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil**. Piracicaba: PLANALSUCAR, 1981. 26 p. (PLANALSUCAR. Boletim técnico, 3).