

Fertilidade do solo e adubação em cana-de-açúcar

Fernando José Freire | Jefrejan Souza Rezende | Fábio Cesar da Silva |

Cristiano Alberto de Andrade | Thomaz Adolpho Rein | Luis Fernando Sanglade Marchiori

Introdução

O solo é resultante de transformações complexas que envolvem o intemperismo de rochas e minerais, a ciclagem de nutrientes e a produção e decomposição de biomassa. Esse recurso natural é o principal responsável pelo suporte da atividade agropecuária global, de forma a suprir a demanda da sociedade por alimentos, fibras, bioenergia e uma série de outras matérias-primas.

A presença de nutrientes é um dos aspectos fundamentais que garantem a boa qualidade dos solos e o seu bom uso e manejo, principalmente no caso de agroecossistemas (Glaze-Corcoran et al., 2020). A fertilidade do solo é o ramo da ciência que trata da disponibilidade dos nutrientes, ou seja, a quantidade de nutrientes disponíveis para a absorção pelas plantas (Kalidas-Singh et al., 2021). Embora a fertilidade do solo seja, naturalmente, associada ao crescimento e desenvolvimento das plantas, esses aspectos são insuficientes para conceituá-la, uma vez que a produtividade é consequência da interação complexa de vários fatores (Patsios et al., 2021).

Nesse contexto, torna-se fundamental avaliar a fertilidade do solo, no intuito de determinar a capacidade de suprir a demanda das culturas por nutrientes, sustentando produtividades competitivas e sem depauperar o recurso edáfico. A avaliação da fertilidade envolve processos de amostragem, métodos de análise, técnicas de diagnóstico dos resultados e modelos de in-

terpretação e de recomendação de corretivos e fertilizantes (Silva et al., 2021).

Nos últimos anos houve importantes avanços no sistema de produção da cana-de-açúcar, com desenvolvimento de variedades potencialmente mais produtivas e adaptadas aos diversos ambientes agrícolas, bem como resistentes a pragas e doenças. No entanto, as recomendações de manejo da fertilidade e nutrição da cultura não acompanharam os avanços no melhoramento genético, ficando limitadas a algumas questões mais pontuais, como o uso de micronutrientes. Nesse cenário atual, as variedades potencialmente mais produtivas não têm demonstrado o êxito esperado, em parte, pela dispersão dos resultados recentes das pesquisas no tema, além da consequente lacuna de atualização das recomendações de manejo da fertilidade dos solos com cana-de-açúcar.

Para se ter uma ideia da contribuição do manejo varietal para a cultura e a defasagem no manejo da fertilidade do solo com cana-de-açúcar, é importante um breve histórico. De 1970 a 2020, o rendimento médio da cana-de-açúcar aumentou 53%, passando de 46,2 t ha⁻¹ para 70,5 t ha⁻¹. Dados de 2020/2021 mostraram que o Centro-Sul atingiu produtividade média de 78 t ha⁻¹ (Cruz, 2022). Para safras futuras espera-se uma maior média de produtividade porque há melhor remuneração pela cana-de-açúcar, tem havido mais investimentos em produtos biológicos como micronutrientes, o perfil varietal é mais

moderno e os canaviais estão mais sistematizados. Assim, será possível chegar brevemente ao potencial de produtividade de 85 t ha⁻¹.

Para esses resultados, contribuíram, substancialmente, as pesquisas realizadas pelo Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar (Planalsucar), pela Rede Interuniversitária de Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (Ridesa), pela Cooperativa dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (Copersucar), pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC).

No caso do manejo da fertilidade, uma das principais referências técnicas para correção da acidez e adubação da cana-de-açúcar é o *Boletim Técnico 100*, do IAC (Raij et al., 1997), com a última atualização da versão impressa realizada na década de 1990. Embora o IAC e outras instituições de pesquisa, como a Embrapa e universidades, tenham realizado pesquisas para o manejo da fertilidade do solo e nutrição da cana-de-açúcar, os resultados não foram compilados e trabalhados para a atualização das recomendações.

É importante mencionar também que, na planilha de custos para a cana-de-açúcar, corretivos e fertilizantes respondem por 20 a 25% do custo de produção, num consumo estimado de 16,3% dos fertilizantes aplicados na agricultura brasileira (Conab, 2021), o que demonstra a necessidade de uso eficiente dos nutrientes pela cultura, em alinhamento com recomendações atualizadas de manejo da fertilidade do solo.

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os aspectos básicos da fertilidade do solo (amostragem e métodos de análise), as recomendações atualizadas de manejo da fertilidade do solo para cana-de-açúcar, o uso de fertilizantes (atributos de fertilidade do solo e resposta da cultura) e a utilização de gesso. Aspectos relacionados à calagem foram tratados em capítulo específico.

Amostragem de solo

Qualquer programa de manejo da fertilidade do solo e nutrição de plantas tem na análise do solo uma importante ferramenta para o diagnóstico do status de disponibilidade dos nutrientes e dimensionamento da necessidade de aplicação de fertilizantes (Resende et al., 2016). O primeiro passo, entretanto, é a obtenção de amostra de solo representativa do talhão de produção. É importante entender que a amostra é proveniente de uma população naturalmente heterogênea em suas características, cuja variabilidade decorre de processos pedogenéticos, de uso e manejo do solo, com componentes nas direções horizontal e vertical.

A tarefa de realizar uma adequada amostragem do solo é fundamental para que os resultados analíticos expressem a real condição do sistema edáfico, para balizar adequadamente as recomendações de manejo. Nesse sentido, o que se denomina de talhão ou gleba de amostragem é a maior área na propriedade que possa ser considerada homogênea em termos de relevo, tipo de solo, uso anterior e práticas de manejo. A amostra retirada e enviada para o laboratório deve representar o talhão amostrado, considerando-se também a profundidade, uma vez que diferentes culturas podem explorar o perfil do solo de modo diverso, além da questão da dinâmica dos nutrientes e elementos potencialmente tóxicos em camadas superficiais e subsuperficiais.

Um resultado analítico emitido pelo laboratório de análise de solo representa o valor médio do atributo X no talhão e a profundidade de amostragem, de forma que há certo erro associado à medida:

$$X = \mu + \mathcal{E}$$

em que X = atributo de fertilidade do solo [pH, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio

(Mg), etc.]; μ = valor médio estimado do atributo, determinado no laboratório; e ϵ = erro associado ao valor médio estimado (Cardoso et al., 2014).

Em geral, o erro de amostragem (ϵ_{am}) é maior que o erro analítico (ϵ_{an}), sendo 80% do erro devido ao procedimento de amostragem, enquanto 20%, ou menos, é atribuído ao procedimento analítico no laboratório (Cardoso et al., 2014). Assim, a exatidão na caracterização do talhão é muito dependente dos cuidados para minimizar o erro amostral no campo. Conforme mencionado anteriormente, a variabilidade do talhão é determinante no procedimento de amostragem que será adotado. No caso de um talhão totalmente homogêneo (situação fictícia), uma única amostra de solo seria suficiente para representar a condição dele. No entanto, num talhão aparentemente homogêneo, que apresenta variações horizontais e verticais naturais do sistema, são necessárias algumas amostras simples (subamostras) para uma boa estimativa do valor médio do atributo de interesse. Nesse sentido, o número de amostras simples necessárias na composição da amostra composta, para uma boa estimativa da média, cresce com o aumento da variabilidade do talhão, bem como do atributo considerado (Machado et al., 2015).

No solo, a heterogeneidade horizontal é detectável pela variabilidade entre indivíduos, sendo classificada (James; Wells, 1990), de acordo com a distância em que ocorrem as variações, em: a) macrovariações, que ocorrem em distâncias maiores que 2 m e decorrem de processos pedogenéticos (topografia, cobertura vegetal original, textura e condição de drenagem), porém, podem ser exacerbadas pelo uso e manejo do solo (uso agrícola e histórico de manejo); b) mesovariações, em que as variações nas características do solo ocorrem em distâncias entre 2 e 0,5 m; e c) microvariações, em que as variações nas características do solo ocorrem em distâncias menores do que 0,5 m. As meso e microvariações

— embora sejam decorrentes, também, da ação de fatores de formação dos solos — se relacionam mais com práticas agrícolas de manejo (preparo do solo, aplicação localizada de fertilizantes, uso de resíduos orgânicos, etc.).

Em cana-de-açúcar, as micro e mesovariações têm mais importância em cana-soca, enquanto as macrovariações são determinantes na amostragem de implantação e renovação de canaviais (cana-planta).

Verticalmente, a organização do solo em horizontes, onde pode haver transição difusa ou abrupta, e as práticas agrícolas, como fertilização localizada, contribuem para a heterogeneidade em profundidade. A ação do sistema radicular, também, exerce importante papel nessa variabilidade vertical do solo.

Ao considerar que a variação dos atributos químicos do solo tem uma relação com a distância, em que pontos mais próximos tendem a ser mais semelhantes, uma discussão importante que se faz é sobre o número de amostras simples e a extensão ou área do talhão (Schossler et al., 2019). Em cana-de-açúcar, isso é importante porque os talhões têm variações importantes na área.

Num primeiro momento, pode-se pensar que a variação de número de pontos com a área do talhão seja mais lógica, mas não se deve esquecer do conceito de talhão ou gleba mencionado anteriormente. O conceito traz a variação de uma área máxima com homogeneidade de relevo, tipo de solo, uso anterior, histórico de manejo, etc. Dessa forma, se poderia retirar um mesmo número de amostras simples independentemente da área considerada.

Outro aspecto importante diz respeito ao uso de uma única amostra para a determinação de diferentes atributos de interesse e cuja variabilidade não é semelhante no campo. Por exemplo, o manejo que altera substancialmente o pH e

os teores de Ca^{+2} e Mg^{+2} é a calagem, em que o corretivo é geralmente aplicado em área total. A adubação fosfatada e potássica, por sua vez, geralmente é feita no sulco de plantio e/ou em faixas ao lado da linha de cana-de-açúcar. Espera-se, dessa forma, que a variação do P e do K no solo seja superior a variação do Ca^{+2} , do Mg^{+2} e do pH (Oliveira et al., 2007); porém, uma mesma amostra deverá ser coletada no campo para representar os teores desses nutrientes e o valor do pH. De forma geral, se busca compatibilizar o número de amostras para atender satisfatoriamente a todos os atributos de interesse.

A amostra que representa o talhão, em cada profundidade de interesse, é uma amostra composta de um número n de amostras simples. A variabilidade de 5 amostras compostas provenientes de 10 a 20 amostras simples é similar à variabilidade esperada para um conjunto analítico de 30 amostras simples (Santos; Vasconcellos, 1987). Dessa forma, a amostragem composta traz economia no número de análises e pode refletir a mesma variabilidade de um maior número de amostras simples analisadas.

Para se estabelecer o número de amostras simples necessárias para obtenção do valor representativo do talhão, com vistas aos vários atributos de interesse, a seguinte equação pode ser utilizada:

$$IC = X \pm t (s^2/n)^{0,5}$$

em que IC = intervalo de confiança; X = estimativa do valor médio do atributo; t = valor t tabelado de Student para um nível α de probabilidade; s^2 = variância associada à média; e n = número de amostras (Santos et al., 2018).

Isolando-se o número de amostras n e rearranjando os demais termos, chega-se à estimativa do número de amostras simples:

$$n = (t \times CV/f)^2$$

em que n = número de amostras; t = valor t tabelado de Student para um nível α de probabilidade (1,96 para $\alpha = 5\%$; e 2,58 para $\alpha = 1\%$; CV = coeficiente de variação (%); e f = erro admitido em torno da média (%) (Santos et al., 2018).

Nas equações anteriores evidencia-se que quanto maior for o intervalo de confiança, ou a variância ou o coeficiente de variação, maior será o número de amostras simples necessárias para se estimar satisfatoriamente o valor médio do atributo. A relação entre número de amostras simples e a variação esperada em torno da média é mostrada na Figura 8.1.

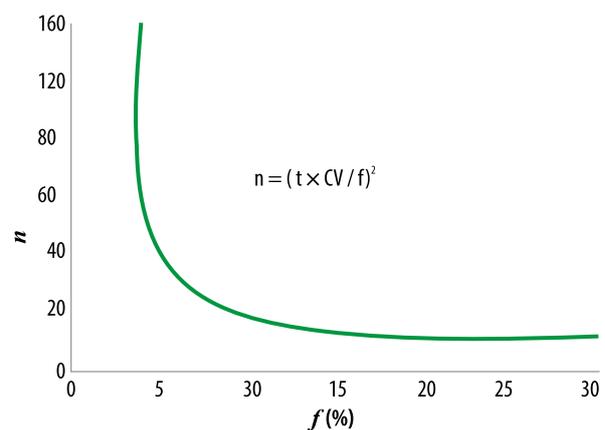


Figura 8.1. Número de amostras (n) necessárias para estimar a média do atributo do solo, considerando-se uma variação de 5 a 30% em torno da média (f).

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2018).

É importante perceber que, a partir de determinada variação em torno da média (f), não existe ganho significativo de se amostrar um maior número de pontos (Figura 8.1). Na Tabela 8.1 apresentam-se as estimativas do número de amostras simples a serem retiradas em torno do resultado analítico médio verdadeiro estimado a 95% de probabilidade e valores de f em torno da média entre 5 e 100%.

Obviamente se podem ajustar valores de erro aceitável dos atributos (f) de interesse por meio de amostragem prévia do solo, em alguns ta-

Tabela 8.1. Número de amostras coletadas em solos de terraço e encosta para diagnóstico da fertilidade.

<i>f</i> %	Terraço					Encosta				
	pH	P	K	Ca+Mg	Al	pH	P	K	Ca+Mg	Al
3	4	3181	1076	47	218	3	601	2226	298	204
10	1	796	269	12	55	1	149	557	75	51
15	1	354	120	6	25	1	67	248	34	23
20	1	199	68	3	14	1	38	139	19	13
25	1	128	44	2	9	1	24	90	12	9
30	1	89	30	2	7	1	17	62	9	6
35	1	65	22	1	5	1	13	46	7	5
40	1	50	17	1	4	1	10	35	5	4
45	1	40	14	1	3	1	8	28	1	3
50	1	32	11	1	3	1	6	23	3	3
60	1	23	8	1	2	1	5	16	3	2
70	1	17	6	1	2	1	4	12	2	2
80	1	13	5	1	1	1	3	9	2	1
90	1	10	4	1	1	1	2	7	1	1
100	1	8	3	1	1	1	2	6	1	1

Fonte: Barreto et al. (1974).

Ihões da propriedade. Nesses talhões é possível retirar aleatoriamente de 10 a 15 amostras simples e enviá-las individualmente para as análises previstas. De posse dos resultados analíticos, são obtidos o valor médio do atributo, a variância e o desvio-padrão, conforme procedimentos comumente utilizados em estatística descritiva. Tanto o coeficiente de variação (CV) como o erro percentual aceitável (*f*) devem ser utilizados como guia para ajustar o número de amostras simples que devem ser retiradas para representar o atributo químico.

A obtenção de amostra composta para análise e subsídio ao manejo da fertilidade do solo nos talhões deve observar alguns critérios. Um deles é a coleta de volume semelhante de solo em cada ponto de amostragem simples e a homogeneização das amostras simples antes da obtenção da composta.

A retirada das amostras simples pode ser realizada de forma sistemática ou aleatória. O método sistemático é muitas vezes utilizado em pesquisas de geoestatística que procuram representar a interdependência dos valores medidos em função de sua localização (Molin et al., 2015). Os resultados desse tipo de pesquisa são muito importantes para o entendimento do efeito do manejo do solo e das culturas na variação dos atributos, além de servir de base para a agricultura de precisão com aplicações de corretivos e fertilizantes em taxa variável, ou para o dimensionamento do número de pontos para amostragem do solo. O método aleatório é normalmente o mais usado, e, nesse caso, as amostras devem estar distribuídas ao acaso, em toda a área da unidade de amostragem. O caminhamento em zigue-zague deve ser preferencialmente escolhido, de modo que cada ponto tenha a mesma chance de ser amostrado (Figura 8.2).

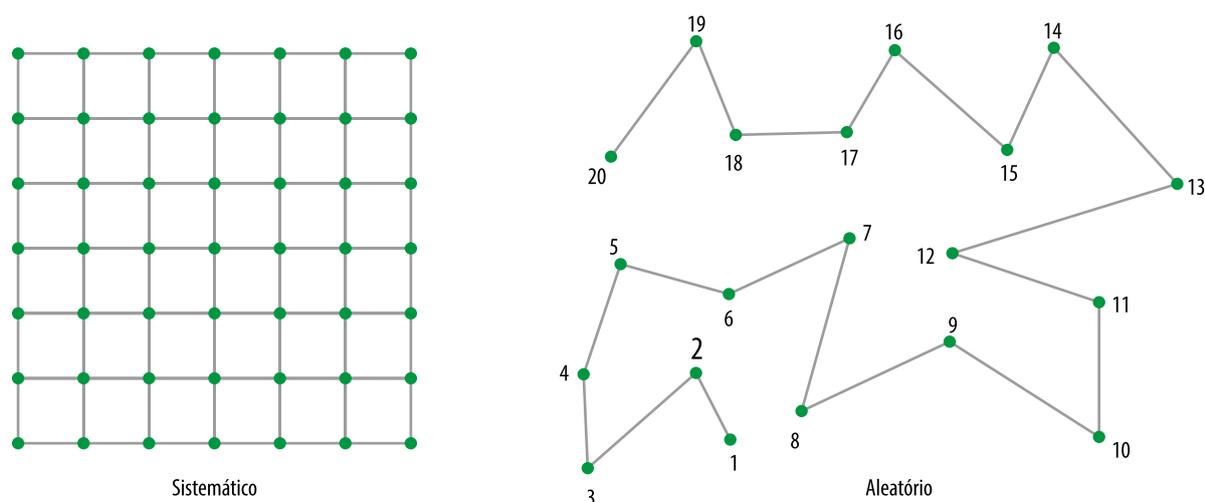


Figura 8.2. Malha de amostragem do solo com pontos para coleta de amostras simples, alocados de forma sistemática ou aleatória no talhão/gleba de produção.

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene, com bom potencial para explorar o perfil do solo, sendo que a profundidade de amostragem do solo deve considerar a efetividade do sistema radicular. Na implantação ou reforma do canavial, ocasião em que o manejo da fertilidade em profundidade é possível, devem-se retirar amostras de solo das camadas 0–20 cm, 20–40 cm e 40–60 cm. Na soqueira, a avaliação da fertilidade pode ser feita com o monitoramento da camada superficial (0–20 cm), ou, no máximo, até 40 cm (0–20 cm e 20–40 cm), quando há possibilidade de ocorrência de altos teores de alumínio trocável.

A localização dos pontos para a amostragem do solo é outra questão importante, uma vez que há geralmente a localização dos fertilizantes no sulco de plantio (implantação) e em faixas ao lado da linha (soqueira). Dessa forma, uma coleta posicionando-se dois quintos das amostras simples próximas à linha (15–20 cm da linha) de cana-de-açúcar e três quintos no meio da entrelinha para a obtenção da amostra composta é bastante razoável. A amostragem exclusivamente na linha de cana-de-açúcar, onde os fertilizantes são normalmente aplicados, pode subestimar a necessidade de reposição dos nu-

trientes via adubação, enquanto a amostragem somente nas entrelinhas pode superestimar a adubação.

Normalmente são utilizados trados na amostragem do solo (Figura 8.3), em que o mais importante é o adequado controle da profundidade de amostragem e a coleta de volumes semelhantes de solo entre os pontos de amostragem. Outras ferramentas, como pá de corte e enxada, podem ser utilizadas, porém, atentando para os dois aspectos mencionados.

Na agricultura de precisão, em que a aplicação dos corretivos e fertilizantes é feita em taxas variáveis, também são tomadas amostras compostas representando o ponto central da quadrícula. A definição da malha amostral, no caso da agricultura de precisão, pode considerar a distância mínima entre amostras compostas tomadas ao redor do ponto central para que elas sejam consideradas independentes, para determinada(s) variável(eis) de interesse, o que pode ser feito com o uso da geoestatística, particularmente do semivariograma (Schossler et al., 2019).

Para obtenção das amostras compostas, as amostras simples coletadas devem ser reunidas em um recipiente, de preferência de plástico, misturadas e homogeneizadas, retirando-se

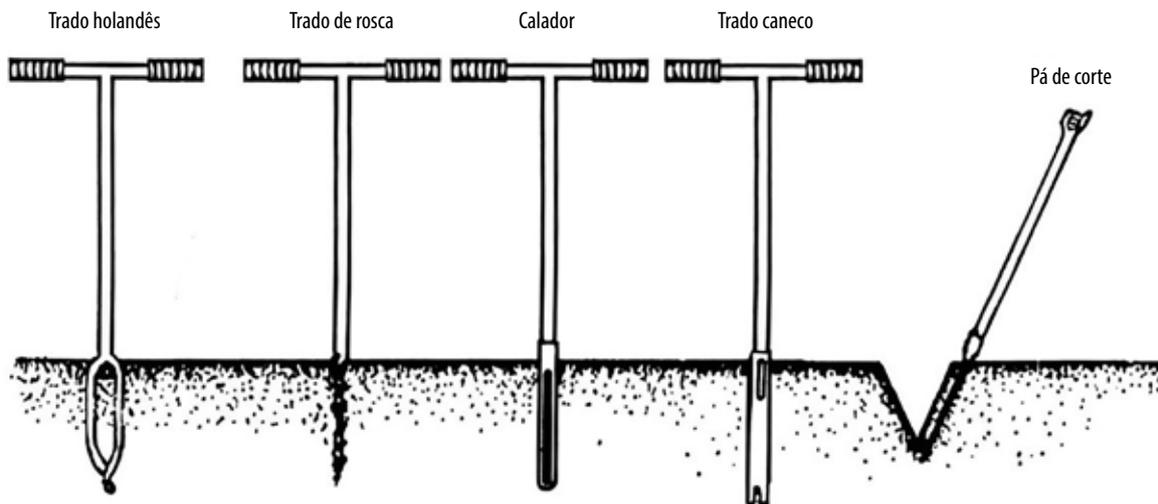


Figura 8.3. Ferramentas mais comuns utilizadas na coleta de amostras de solo.

Fonte: Freire et al. (2001).

uma subamostra com um volume de aproximadamente 500 cm³, a qual deverá ser enviada a um laboratório de fertilidade do solo para a realização das análises.

Para Cantarutti et al. (2007), o resultado das análises químicas aproxima-se da característica real do solo quando:

- A amostra composta é representativa do solo da unidade amostral (talhão ou gleba).
- Nenhuma alteração (modificação ou contaminação) tenha ocorrido na amostra antes da análise.
- As análises das subamostras tomadas no laboratório sejam representativas da amostra original.
- A análise seja exata e represente a informação requerida.

Métodos de análise química do solo para fins de fertilidade

A análise de solo, na agricultura moderna, é a base para a correção da acidez do solo e adubação. Para que esse processo seja eficaz, os méto-

dos de análise devem ser referendados pelo conhecimento científico, gerando resultados para recomendação da(s) quantidade(s) de corretivo e/ou fertilizantes conforme a demanda da cultura, com economia da produção e prezando pela qualidade ambiental (Raij et al., 2017).

A análise de solo é praticada em grande parte das regiões no mundo, estando seu sucesso na dependência da quantidade e qualidade da pesquisa sobre métodos utilizados, de sua correlação com a planta, de sua calibração e interpretação, da organização das informações e dos laboratórios de análise (Cardoso et al., 2014).

O emprego da análise de solo no Brasil foi muito limitado até o início da década de 1960. No entanto, nessa mesma década, um programa integrado de análise química de solo do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) e da North Carolina State University (EUA) foi muito relevante para o País, impulsionando a análise do solo em todo o Brasil, expandindo o número de laboratórios e amostras analisadas. De acordo com Raij et al. (2017), esse programa contribuiu para isso pelo desenvolvimento de sistemas de automação, uniformização de métodos de aná-

lise química, definição de critérios de interpretação e um eficiente sistema de comunicação.

Particularmente no caso da cultura da cana-de-açúcar, o Planalsucar tinha em suas bases operacionais laboratórios vinculados ao Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), que eram administrativamente ligados ao Mapa, cuja estrutura se atrelou ao programa brasileiro desenvolvido com a North Carolina State University (Rodella, 1983).

No presente capítulo, são apresentados os principais métodos usados na análise de solo para a cultura da cana-de-açúcar, com as referências bibliográficas pertinentes para que detalhes

possam ser acessados pelos interessados (Tabela 8.2).

O Brasil possui alguns programas de proficiência de laboratório de solos que prezam pela qualidade dos resultados analíticos. É recomendável que os laboratórios se credenciem em um ou mais desses programas de proficiência, a depender do pacote analítico oferecido. A participação do laboratório permite o acompanhamento da evolução dos métodos, a adoção de novas tecnologias de análise e o aprimoramento dos serviços oferecidos aos clientes, além da questão de imagem e marketing associados ao bom desempenho do laboratório no

Tabela 8.2. Métodos de extração e determinação realizados em análises químicas para avaliação da fertilidade de solos cultivados com cana-de-açúcar no Brasil.

Característica	Método de extração		Método de determinação	
	PTCE-1 ⁽¹⁾	PTCE-2 ⁽²⁾	PTCD-1 ⁽³⁾	PTCD-2 ⁽⁴⁾
pH	CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹ (1:2,5)	H ₂ O (1:2,5)	–	–
Al ³⁺	KCl 1 mol L ⁻¹	–	Titulometria	–
Ca ²⁺ e Mg ²⁺	Resina ⁽⁵⁾	KCl 1 mol L ⁻¹	Complexometria	Espectrofotometria de absorção atômica
Na ⁺	Resina ⁽⁵⁾	Mehlich-1	Fotometria	–
H + Al	Ca(OAc) 0,5 Mol L ⁻¹ pH 7,0	-	Titulometria	SMP ⁽⁶⁾
P disponível	Resina ⁽⁵⁾	Mehlich-1	Colorimetria	–
K disponível	Resina ⁽⁵⁾	Mehlich-1	Fotometria	–
S disponível	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 500 mg L ⁻¹ em H ₂ O	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 500 mg L ⁻¹ em HOAc	Turbidimetria	–
Fe, Mn, Cu e Zn disponíveis	DPTA ⁽⁷⁾	Mehlich-1	Espectrofotometria de absorção atômica	–
B disponível	Água quente	–	Espectrofotometria de absorção atômica	Colorimetria
Si solúvel	CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹	HOAc 0,5 mol L ⁻¹	Colorimetria	–
N total	Micro-Kjeldahl	–	Titulometria	–
Matéria orgânica	C oxidável por Cr ₂ O ₇ ²⁻	Incineração	Titulometria	Colorimetria

⁽¹⁾ Protocolo de extração 1. ⁽²⁾ Protocolo de extração 2. ⁽³⁾ Protocolo de dosagem 1. ⁽⁴⁾ Protocolo de dosagem 2. ⁽⁵⁾ Utiliza-se resina mista (catiônica + aniônica). ⁽⁶⁾ Solução mista de cloreto de cálcio, cromato de potássio, acetato de cálcio e trietanolamina, com pH tamponado em 7,5. ⁽⁷⁾ Ácido dietilenotriaminopentacético.

Fonte: Rajj e Camargo (1973), Korndörfer et al. (1999), Rajj et al. (2001) e Cantarutti et al. (2007).

programa. A busca pela exatidão analítica minimiza o erro analítico, aumentando-se a confiabilidade na avaliação da fertilidade, conforme discutido anteriormente.

Interpretação e recomendação da análise química do solo

Tabelas de interpretação

Os critérios de diagnóstico da fertilidade com base na análise química do solo são organizados em manuais estaduais, normalmente elaborados por uma comissão nomeada pelo órgão competente do governo do estado. Embora os manuais sejam regionais, algumas vezes têm caráter inter-regional em função da ocorrência de solos com características químicas e físicas semelhantes, bem como clima. Como a recomendação da adubação é vinculada aos métodos de análise de solos adotados, esse pacote analítico também direciona o uso de determinado manual de adubação. Esse último aspecto é especialmente importante na medida em que a cana-de-açúcar tem expandido para estados menos tradicionais na produção da cultura, em que se usam manuais de adubação dos estados com histórico mais consolidado na produção de cana-de-açúcar.

O modelo de diagnóstico para elaboração dos manuais de adubação se baseia nas classes de disponibilidade dos nutrientes no solo, balizadas pelo conceito de produção relativa (Tabela 8.3). O processo envolve o que se denomina “calibração” do método de análise do solo, realizada a partir de resultados de experimentos de campo em diferentes classes de solo, relacionando-se o teor do nutriente e a produtividade da cultura. As recomendações de adubação são estabelecidas em função da classe de disponibilidade do nutriente no solo, a partir da experimentação de campo, estudando-se doses do nutriente

aplicadas a solos originalmente com diferentes teores (classes) deste.

Para fósforo (P), por exemplo, se o método for Mehlich-1, se considera o teor de argila (Alvarez V. et al., 1999; Simões Neto et al., 2015; Manual..., 2016) ou o valor do P remanescente (P_{rem}) (Alvarez V. et al., 1999; Simões Neto et al., 2015) (Tabela 8.3). Quando o método é a resina, não são considerados outros fatores relacionados à capacidade de fixação de P no solo, somente o resultado analítico e as respectivas classes de disponibilidade (Raij et al., 1997). Para potássio (K), a eficiência de extração é influenciada pela capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0, interferindo na interpretação dos resultados do K disponível da análise de solo (Manual..., 2016) (Tabela 8.4).

Um sistema dinâmico com formas orgânicas e inorgânicas de nitrogênio (N), mediado pela atividade biológica de plantas e microrganismos, bem como influenciado pelas condições climáticas e práticas de manejo, regula a disponibilidade do N no solo. Essa intensa dinâmica, característica do N no solo, é o que torna a previsão de sua disponibilidade às plantas bastante difícil e desafiadora. Neste capítulo são apresentados e discutidos alguns fundamentos e índices para previsão da disponibilidade de N a partir de análises de solo.

O nitrogênio não é usualmente analisado no solo para interpretação de sua disponibilidade. Isso porque as formas orgânicas e inorgânicas no solo são muito dinâmicas e influenciadas por processos biológicos, pelas condições climáticas e por práticas de manejo (Castoldi et al., 2019). Uma alternativa adotada em alguns estados é a interpretação da disponibilidade de N a partir do teor de matéria orgânica do solo, conforme mostrado na Tabela 8.5, de modo a balizar, minimamente, o potencial de fornecimento de N no sistema.

Tabela 8.3. Classes de interpretação da disponibilidade de fósforo extraído pelo método Mehlich-1, conforme o teor de argila e fósforo remanescente (P_{rem}).

Característica tampão	Classe de interpretação ⁽¹⁾				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	(mg dm ⁻³)				
Rio Grande do Sul e Santa Catarina					
Argila (g kg⁻¹)					
>600	≤1,5	1,6–3,0	3,1–4,5	4,6–9,0	>9,0
410–600	≤2,0	2,1–4,0	4,1–6,0	6,1–12,0	>12,0
210–400	≤3,0	3,1–6,0	6,1–9,0	9,1–18,0	>18,0
≤200	≤5,0	5,1–10,0	10,1–15,0	15,1–30,0	>30,0
Pernambuco					
Argila (g kg⁻¹)					
>600	<3,5	3,5–5,5	5,6–9,5	9,6–12,0	>12,0
>350–600	<6,5	6,5–9,5	9,6–12,5	12,6–16,0	>16,0
150–350	<8,5	8,5–12,5	12,6–15,0	15,1–18,0	>18,0
<150	<10,5	10,5–13,5	13,6–17,0	17,1–20,0	>20,0
Prem (mg L⁻¹)					
0–12	<3,5	3,5–5,5	5,6–9,5	9,6–12,0	>12,0
12–17	<6,5	6,5–9,5	9,6–12,5	12,6–16,0	>16,0
>17–35	<8,5	8,5–12,5	12,6–15,0	15,1–18,0	>18,0
>35–60	<10,5	10,5–13,5	13,6–17,0	17,1–20,0	>20,0
Minas Gerais					
Argila (g kg⁻¹)					
>600	≤2,7	2,8–5,4	5,5–8,0	8,1–12,0	>12,0
350–600	≤4,0	4,1–8,0	8,1–12,0	12,1–18,0	>18,0
150–350	≤6,6	6,7–12,0	12,1–20,0	20,1–30,0	>30,0
≤150	≤10,0	10,1–20,0	20,1–30,0	30,1–45,0	>45,0
Prem (mg L⁻¹)					
0–4	≤3,0	3,1–4,3	4,4–6,0	6,1–9,0	>9,0
4–10	≤4,0	4,1–6,0	6,1–8,3	8,4–12,5	>12,5
10–19	≤6,0	6,1–8,3	8,4–11,4	11,5–17,5	>17,5
19–30	≤8,0	8,1–11,4	11,5–15,8	15,9–24,0	>24,0
30–44	≤11,0	11,1–15,8	15,9–21,8	21,9–33,0	>33,0
44–60	≤15,0	15,1–21,8	21,9–30,0	30,1–45,0	>45,0

⁽¹⁾ Para Minas Gerais as classes de teor alto e muito alto correspondem a bom e muito bom, respectivamente.

Fonte: Adaptado de Alvarez V. et al. (1999), Simões Neto et al. (2015) e Manual... (2016).

Tabela 8.4. Classes de interpretação da disponibilidade de potássio extraído pelo método Mehlich-1, conforme a capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0.

CTC a pH 7,0 ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	Classe de interpretação				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
>30	≤ 35	36–70	71–105	106–210	>210
15,1–30,0	≤ 30	31–60	61–90	91–180	>180
7,6–15,0	≤ 20	21–40	41–60	61–120	>120
$\leq 7,5$	≤ 15	16–30	31–45	46–90	<90

Fonte: Manual... (2016).

Tabela 8.5. Classes de interpretação da disponibilidade de nitrogênio, conforme os teores de matéria orgânica do solo.

Classe de interpretação		
Baixa	Média	Alta
Matéria orgânica		
(%)		
$\leq 2,5$	2,6–5,0	>5,0

Fonte: Manual... (2016).

Tabelas de recomendação

A recomendação da adubação da cana-de-açúcar no País é fundamentada em curvas de resposta, em que nutrientes são aplicados em doses crescentes e seus efeitos observados no incremento da produção. Conforme mencionado anteriormente para as classes de disponibilidade, a calibração e as recomendações são regionalizadas. Essa estratégia de avaliação da fertilidade do solo permite gerar tabelas de recomendação da adubação que trazem o componente científico, mas também algum empirismo e subjetividade. Assim, uma simples comparação entre tabelas de diferentes estados brasileiros gera diferentes recomendações para condições semelhantes de solo e de cultivo, e a mesma recomendação para diferentes solos (Tabela 8.6).

Métodos de recomendação da adubação mais objetivos e fundamentados em balanço de nutrientes (demanda da cultura para uma determinada produtividade esperada, capacidade do solo em fornecer o nutriente e quantidade de nutriente que deve ser aplicada via fertilizante, incluindo-se, nesse último aspecto, as perdas e a eficiência de recuperação pela cultura) são promissores e acompanhariam as alterações temporais de produtividade da cultura em razão de fatores climáticos, práticas de manejo e, principalmente, do lançamento de variedades mais produtivas. O ajuste de modelos mecanísticos de abrangência mais generalizada pode ser uma ferramenta eficaz para recomendações de fertilizantes para a cultura da cana-de-açúcar no Brasil.

Fundamento dos estudos para calibração da adubação

Estabelecido o método de análise por meio de estudos de correlação entre o que o método extrai e o conteúdo do nutriente na planta que determina os teores disponíveis, seguido dos estudos de calibração, torna-se necessário estabelecer valores de referência para essa disponibilidade e a definição de doses que devem ser aplicadas, fundamentadas em uma expectativa de resposta, de acordo com o diagnóstico da fertilidade.

Tabela 8.6. Doses de nitrogênio, fósforo e potássio recomendadas para cana-de-açúcar, de acordo com as classes de disponibilidade e/ou produtividade esperada, além do ciclo de cultivo (cana-planta ou soca).

Classes de teores	N			P ₂ O ₅			K ₂ O		
	SP ⁽¹⁾	MG ⁽²⁾	PE ⁽³⁾	SP ⁽⁴⁾	MG	PE	SP ⁽⁵⁾	MG ⁽⁶⁾	PE ⁽⁷⁾
	(kg ha ⁻¹)								
Cana-planta									
Não se aplica	60–90	0–60	40	–	–	–	–	–	–
Muito baixo	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Baixo	–	–	–	180–200	150	180	140–220	160	100
Médio	–	–	–	140–200	100	90	120–200	120	70
Alto	–	–	–	80–140	50	40	100–180	80	70
Muito alto	–	–	–	40–100	–	–	60–120	–	–
Cana-soca									
Não se aplica	80	100	100	–	–	–	–	–	–
Muito baixo	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Baixo	–	–	–	40–60	40	40	100–200	–	–
Médio	–	–	–	20–40	–	30	80–160	140	120
Alto	–	–	–	0–30	–	–	60–140	100	100
Muito alto	–	–	–	–	–	–	40–100	60	100

⁽¹⁾ Aplicar em cana-planta 30 kg ha⁻¹ em fundação e de 30 a 60 kg ha⁻¹ em cobertura, dependendo da produtividade esperada (>100; 100-130; 130-150; 150-170; e >170 t ha⁻¹); Em cana-soca para produtividades entre 80-100 t ha⁻¹, aplicar 100 kg ha⁻¹; Para produtividades entre 100-120 t ha⁻¹, aplicar 120 kg ha⁻¹; Para produtividades entre 120-140 t ha⁻¹, aplicar 140 kg ha⁻¹; e para produtividades acima de 140 t ha⁻¹, aplicar 160 kg ha⁻¹. ⁽²⁾ Não aplicar N em fundação. Dependendo da produtividade esperada, aplicar em cobertura até 60 kg ha⁻¹. Em Minas Gerais, a produtividade esperada para cana-planta é de 120 t ha⁻¹ e para cana-soca é de 80 t ha⁻¹. ⁽³⁾ Aplicar 20 kg ha⁻¹ em fundação e 20 kg ha⁻¹ em cobertura. A dose de N em cobertura deverá ser aumentada para 40 kg ha⁻¹ em solos arenosos e com baixos teores de matéria orgânica (<1,5%); Em Pernambuco, a produtividade esperada para cana-planta é de 75 t ha⁻¹ e para cana-soca é de 50 t ha⁻¹. ⁽⁴⁾ Tanto em cana-planta, como em cana-soca, deve-se elevar a dose recomendada de P₂O₅, dependendo da produtividade esperada. ⁽⁵⁾ em cana-planta, como em cana-soca, deve-se elevar a dose recomendada de K₂O, dependendo da produtividade esperada. ⁽⁶⁾ Não aplicar K em solos que apresentem teores superiores a 150 mg dm⁻³. Em solos arenosos ou de textura média, aplicar no máximo 90 kg ha⁻¹ de K₂O no sulco de plantio, acrescentando o restante em cobertura. ⁽⁷⁾ Aplicar metade da dose em fundação e a outra metade em cobertura. Em áreas fertirrigadas com vinhaça com doses acima de 150 m³ ha⁻¹, não aplicar K.

Fonte: Ribeiro et al. (1999), Cavalcanti (2008) e Cantarela et al. (2022).

As tabelas estaduais de adubação (dados apresentados na Tabela 8.6) são construídas a partir de uma série de ensaios de adubação. Especificamente para cana-de-açúcar, que é cultivada em extensas áreas, é possível realizar ajustes finos na adubação sob condições de cultivo mais específicas da propriedade ou do talhão, em sintonia com o ambiente de produção edafoclimático.

Para simular uma calibração de K, os dados tratados nesse estudo de caso são fictícios e servem apenas como referência técnica para orientar ajustes regionais ou na dimensão de propriedade rural. Considerando-se que o método de análise definido para avaliar o K disponível é o Mehlich-1 (Tabela 8.2) e após a realização de vários ensaios de campo com dois tratamentos

(sem e com alta adubação potássica para máxima produtividade), distribuídos de forma que, em cada ambiente de produção, haja pelo menos um ensaio, principalmente para diferentes solos, épocas de corte e variedades, os resultados de produção relativa em função dos teores de K são os apresentados na Tabela 8.7. Os resultados devem ser repetidos em diferentes anos e para as condições de cana-planta e/ou cana-soca. É importante que o único fator em estudo seja a adição de K (ou outro nutriente de interesse), mantendo-se os demais fatores de produção constantes, incluindo o fornecimento dos demais nutrientes.

As classes de disponibilidade do nutriente no solo podem ser obtidas a partir da Tabela 8.7, por meio de ajustes ao modelo matemático para observação da relação entre os teores de K no solo e a produção relativa na ausência do

seu fornecimento via adubação (Resende et al., 2016) (Figura 8.4).

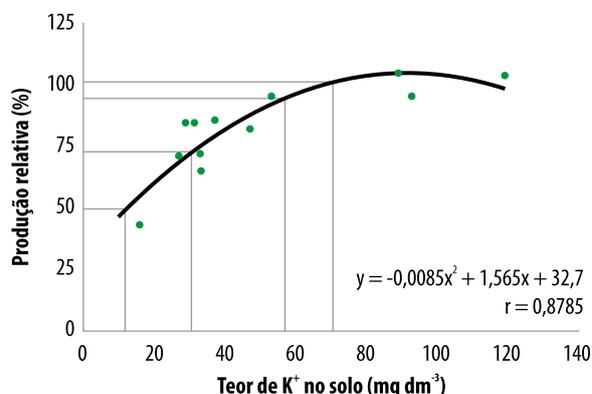


Figura 8.4. Definição dos limites críticos de k^+ no solo e classes de disponibilidade do nutriente no solo.

Nota: teor muito baixo (<50% produção relativa \approx resposta muito alta à adubação); teor baixo (de 50 a 70% da produção relativa \approx resposta alta à adubação); teor médio (de 70 a 90% da produção relativa \approx resposta média à adubação); teor alto (de 90 a 100% da produção relativa \approx resposta baixa à adubação); e teor muito alto (>100% da produção relativa \approx sem resposta ou resposta negativa à adubação).

Fonte: Resende et al. (2016).

Tabela 8.7. Produção absoluta e relativa de colmos na soqueira de cana-de-açúcar com ou sem aplicação de potássio (+K e -K, respectivamente) e teor inicial de potássio no solo extraído por Mehlich-1.

Produção de colmos		Produção relativa ⁽¹⁾	Teor de K no solo
- K	+ K		
(t ha ⁻¹)	(t ha ⁻¹)	(%)	(mg dm ⁻³)
16,3	38,0	43	16
75,0	105,1	71	27
86,3	102,2	84	29
59,3	70,8	84	31
61,0	84,7	72	33
80,7	123,5	65	33
82,7	97,1	85	37
71,7	87,3	82	47
100,7	105,5	95	53
14,9	143,0	104	89
159,7	168,4	95	93
196,0	190,9	103	119

⁽¹⁾Produção relativa = Produção - K x 100/Produção + K.

Para cada classe de disponibilidade do nutriente no solo, experimentos de curvas de resposta ao nutriente mostram que a dose para máximo retorno econômico proporciona em geral entre 80 e 90% da produção máxima (Resende et al., 2016). Essa dose de máxima eficiência econômica (MEE) leva em consideração a relação entre o custo do fertilizante e o preço do produto. Historicamente os gastos com adubação respondem por 25 a 30% do custo total de produção.

Outros aspectos influenciam a relação entre teores do nutriente no solo e a produtividade, como o método de análise (Tabela 8.2), a variedade de cana-de-açúcar, a idade da cultura (Simões Neto et al., 2011) e, principalmente, a sensibilidade do extrator ao fator capacidade tampão do solo (Novais et al., 2015).

Assim, Simões Neto et al. (2015) — utilizando regressões que descrevem a resposta de cana-de-açúcar a doses de P aplicadas ao solo (curvas de resposta) (Figura 8.5) e a recuperação do P pelo método Mehlich-1, de acordo com as mesmas doses aplicadas (Figura 8.6) — estabeleceram níveis críticos variáveis com o fator capacidade de P. O nível crítico de P no solo é aqui definido como aquele que propiciaria, na ausência de adubação, produtividade equivalente à obtida com a dose de MEE. Para o Latossolo de maior fator capaci-

dade, o nível crítico foi de 5 mg dm^{-3} de P, e para o Gleissolo de menor fator capacidade, o nível crítico foi de 10 mg dm^{-3} de P (Figura 8.5). As doses de MEE foram de 43 e 100 kg ha^{-1} , respectivamente para o Gleissolo e Latossolo (Figura 8.6).

Ao considerar que o conceito de nível crítico se relaciona com a dose de MEE, pode-se estabelecer que essa é a condição ideal de disponibilidade do nutriente no solo, sem falta, nem excesso e num alinhamento com a máxima produtividade.

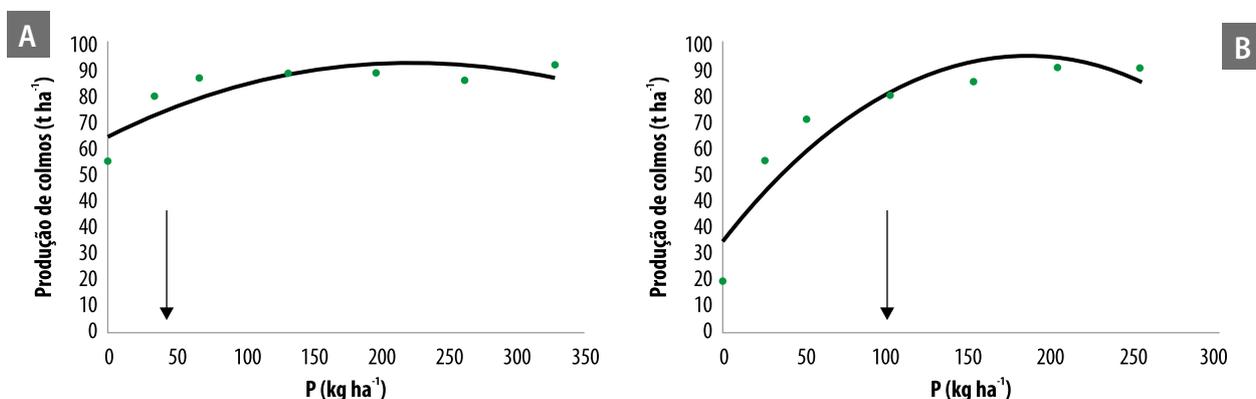


Figura 8.5. Produção de colmos de cana-de-açúcar em função de doses de fósforo aplicadas no sulco de plantio em Gleissolo Háplico Eutrófico (A) e Latossolo Amarelo Distrófico (B) de diferentes texturas e valor de fósforo remanescente (P_{rem}) e definição da dose de máxima eficiência econômica (MEE).

$$P_2O_5 (\text{kg ha}^{-1}) = P (\text{kg ha}^{-1}) \times 2,29.$$

Fonte: Adaptado de Simões Neto et al. (2015).

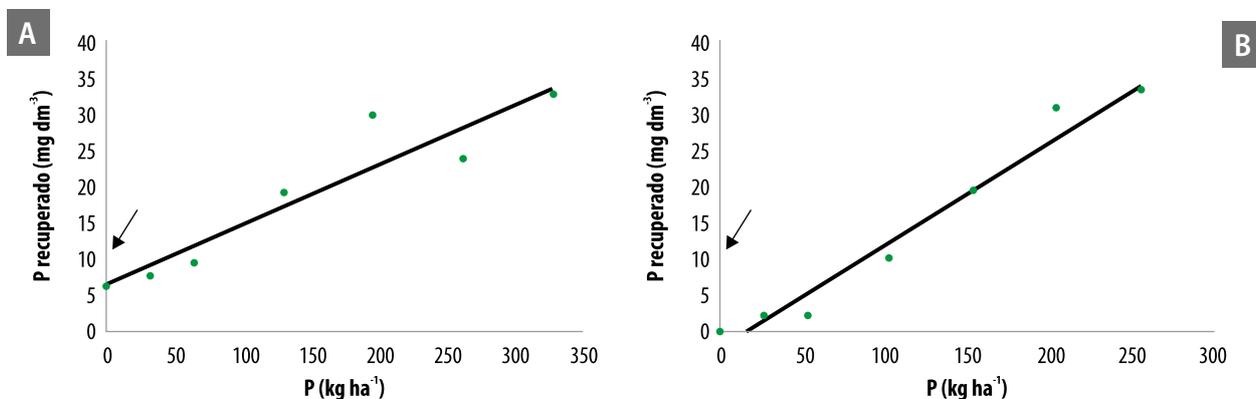


Figura 8.6. Teores de fósforo recuperados pelo método Mehlich-1 em função de doses de fósforo aplicadas no sulco de plantio em Gleissolo Háplico Eutrófico (A) e em Latossolo Amarelo Distrófico (B).

Nota: níveis críticos (NC) determinados de acordo com as doses de máxima eficiência econômica. $P_2O_5 (\text{kg ha}^{-1}) = P (\text{kg ha}^{-1}) \times 2,29$.

Fonte: Adaptado de Simões Neto et al. (2015).

O cálculo da dose para recomendação da adubação pode ser realizado usando-se a equação a seguir, que considera a condição de disponibilidade atual do nutriente, o nível crítico para MEE e o incremento relativo de P no solo em função da dose de P aplicada:

$$Dose\ recomendada = (NC - NA) / (Nrec / apl)$$

em que *Dose recomendada* = dose do nutriente recomendada para aplicação (kg ha^{-1} P); *NC* = nível crítico do nutriente no solo (mg dm^{-3}); *NA* = nível atual do nutriente no solo (mg dm^{-3}); e *Nrec/apl* = coeficiente angular da equação de regressão linear do nutriente recuperado em função do nutriente aplicado ($\text{mg dm}^{-3}/\text{kg ha}^{-1}$ P) (Alvarez V., 1996).

A partir da equação supracitada, é possível calcular a dose recomendada para qualquer nível crítico que corresponda à dose de MEE, conhecendo-se o coeficiente *Nrec/Napl* do solo em questão, adequando-se ainda ao momento econômico. Pode ser que, num determinado momento, a relação custo do fertilizante/preço do produto indique que o nível crítico de P no solo seja inferior em relação ao teor, proporcionando aproximadamente 90% da produtividade máxima, no exemplo das Figuras 8.5 e 8.6. Nesse caso, o novo valor de nível crítico seria usado (para a MEE, em vez de 90% da produção máxima), gerando a dose recomendada de P naquele momento.

Ao tomar como exemplo os valores apresentados nas Figuras 8.5 e 8.6, em que a dose para a MEE corresponde a 90% da produção máxima de colmos de cana-de-açúcar e os teores iniciais de P no solo são iguais a 2,0 e 6 mg dm^{-3} para o Latossolo e o Gleissolo, respectivamente, há as doses recomendadas para a adubação:

Latossolo

$$Dose\ recomendada = (5 - 2) / 0,0638937 = 47\ \text{kg ha}^{-1}\ \text{de P ou } 108\ \text{kg ha}^{-1}\ \text{de P}_2\text{O}_5$$

Gleissolo

$$Dose\ recomendada = (10 - 6) / 0,083851 = 48\ \text{kg ha}^{-1}\ \text{de P ou } 110\ \text{kg ha}^{-1}\ \text{de P}_2\text{O}_5$$

Essa fertilização, para atingir a dose de suficiência (nível crítico), é, frequentemente, a mais utilizada e se aplica ao modelo de diagnóstico da fertilidade e recomendação por meio da análise química do solo. Essa fertilização tem por base a reposição das quantidades dos nutrientes removidos pelas colheitas, constituindo o que se denomina lei da restituição (Resende et al., 2016).

Adubação em canaviais

Fertilização nitrogenada

Penatti (2013) avaliou 74 experimentos de campo conduzidos pela Copersucar e pelo IAC. Os resultados dos experimentos, individualmente, não evidenciaram respostas da cana-planta à adubação nitrogenada, porém, em conjunto, foi possível observar uma clara resposta e indicar $75\ \text{kg ha}^{-1}$ de N como dose econômica (Figura 8.7). Constatação semelhante foi feita por Oliveira et al. (2010) a partir de estudos de extração de N em 11 variedades de cana-de-açúcar no ciclo de cana planta.

Na prática, utilizaram-se doses de N na cana-planta entre 30 e $60\ \text{kg ha}^{-1}$, justamente pelos

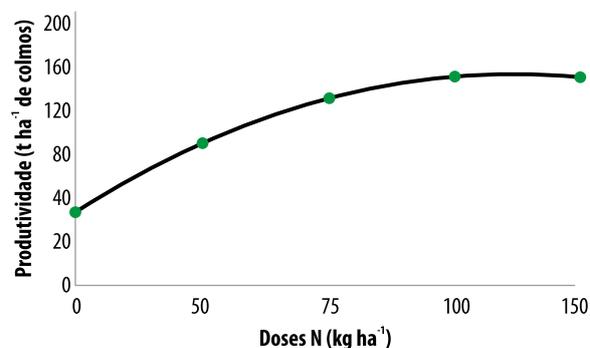


Figura 8.7. Resposta média (74 experimentos) da cana-planta à adubação.

Fonte: Adaptado de Penatti (2013).

resultados inconsistentes dos experimentos e variações sazonais de produtividade em função de outros fatores determinantes da produção. Doses mais elevadas de N são recomendadas para ambientes mais favoráveis à produção, em que o nível de resposta tende a ser maior em função do N aplicado. Esse é o caso da cana-de-açúcar irrigada, em que a máxima resposta de produtividade, igual a 190 t ha^{-1} de colmos, foi proporcionada pelo uso de 196 kg ha^{-1} de N (Figura 8.8). Somente a irrigação é responsável por um incremento médio de 54 t ha^{-1} de colmos, na ausência de N; enquanto essa diferença aumenta para 93 t ha^{-1} de colmos quando são consideradas as produtividades máximas (Dellabiglia et al., 2018).

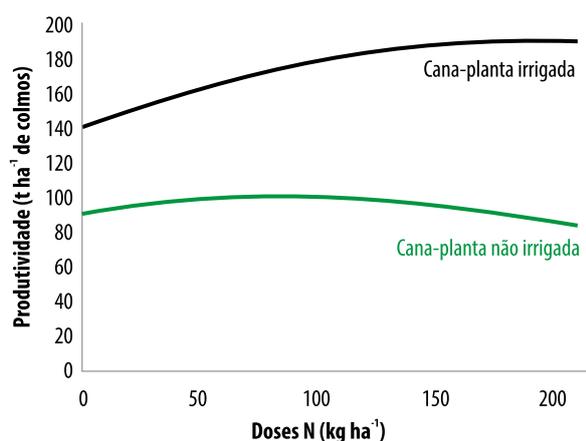


Figura 8.8. Respostas médias de produtividade de colmos da cana-planta var. RB 92579 irrigada e não irrigada (sequeiro), fertilizada com doses de nitrogênio até 210 kg ha^{-1} , em Jaú, SP.

Fonte: Adaptado de Dellabiglia et al. (2018).

Normalmente na adubação da cana-planta, a eficiência agrônômica das fontes nitrogenadas é semelhante, uma vez que são aplicadas no sulco de plantio. Desse modo, emprega-se a fonte que apresentar menor custo por unidade de N. Geralmente a ureia (sólida) e a aquamônia (líquida) são as fontes de menor custo-benefício.

No caso de aplicação de parte da dose do fertilizante nitrogenado em cobertura, deve-se

optar por fontes que apresentam menores ou não apresentam perdas de N por volatilização de amônia, como o sulfato de amônio, nitrato de amônio ou nitrato de cálcio. De acordo com Degaspari et al. (2020), havendo adaptação dos implementos para a incorporação do adubo ao lado da linha, qualquer fonte nitrogenada poderá ser utilizada.

No caso da adubação de soqueiras de cana-de-açúcar, um aspecto fundamental é a presença de palha na superfície, que dificulta a incorporação mecânica do fertilizante nitrogenado. Por essa razão, a aplicação incorporada de fertilizantes à base de ureia, prática usual de cultivo de soqueiras, tem dado lugar à aplicação superficial de fontes nitrogenadas mais estáveis com baixa perda de N por volatilização.

Em termos de N na soqueira, as doses aplicadas são geralmente superiores na comparação com as doses na cana-planta, apesar de o nível de incerteza de resposta ainda permanecer relativamente alto. Percentualmente, de 45 experimentos com adubação nitrogenada em cana-soca colhida mecanicamente, sem queima, 75% dos casos exibiram moderada ou nenhuma resposta à aplicação de N (Figura 8.9) (Otto et al., 2016). O mesmo caso foi verificado em estudo mais recente com dez experimentos avaliados em dois cortes (Otto et al., 2021).

A dose de fertilizante nitrogenado para aplicação na soqueira de cana-de-açúcar geralmente é da ordem de 60 a 150 kg ha^{-1} de N e dependerá, principalmente, da expectativa de produtividade de colmos. Como a produtividade da cana-de-açúcar decresce com os sucessivos ciclos de corte, essa adubação também acompanha a menor expectativa de colheita na medida em que os ciclos se sucedem até o momento da reforma do canavial.

Há décadas se conhece a fixação biológica de nitrogênio (FBN) na cana-de-açúcar, porém, sua

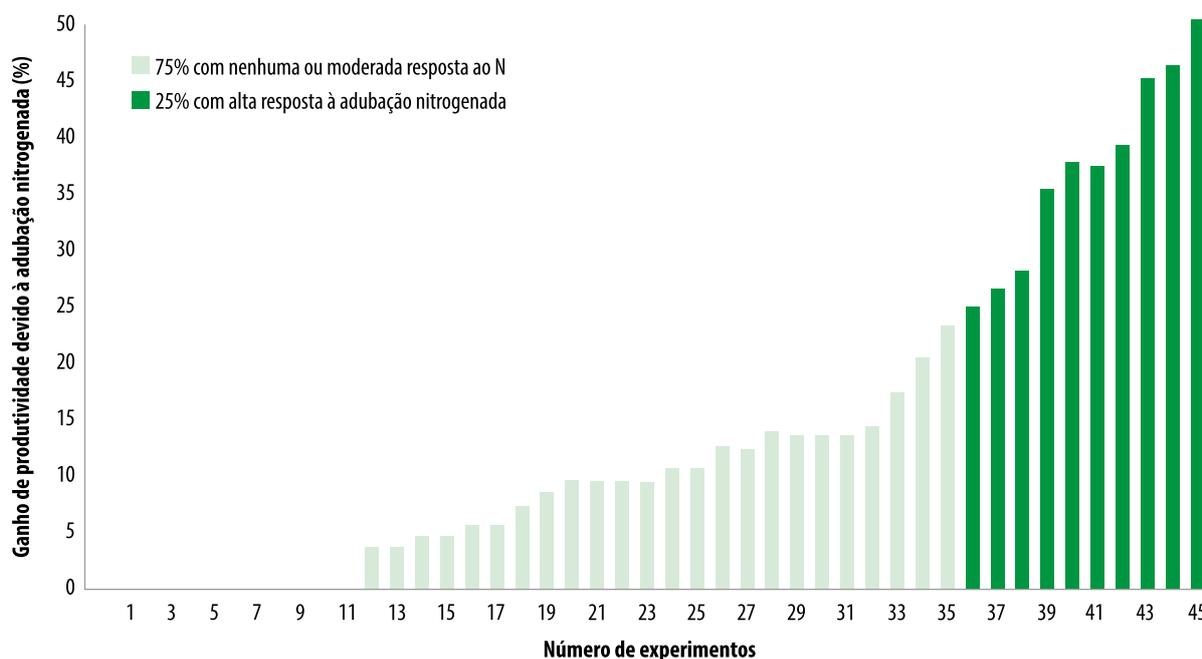


Figura 8.9. Nível de resposta à adubação nitrogenada da cana-soca colhida mecanicamente (sem queima prévia) em 45 experimentos.

Nota: resposta ausente ou moderada quando o ganho de produtividade foi <25%; e alta resposta quando o ganho de produtividade foi ≥25%.

Fonte: Otto et al. (2016).

contribuição para a nutrição mineral da cultura e a possibilidade de um bioinsumo para substituir parcial ou totalmente o uso de fontes orgânicas ou minerais de adubação não estão bem estabelecidas. Na verdade, a FBN na cana-de-açúcar sempre foi parte da explicação sobre a variabilidade de respostas à adubação nitrogenada mineral, bem como usada para justificar uma relação entre exportação de N superior à entrada de N via adubação.

Em 2008, a Embrapa lançou um produto à base de bactérias endofíticas com a finalidade de uso na cana-de-açúcar para a nutrição mineral da cultura (Pereira, 2011). Resultados promissores em laboratório (Oliveira et al., 2006) e uma relação de dependência quanto à variedade de cana-de-açúcar usada (Schultz, 2012) tornaram-se evidentes. No campo, entretanto, um número menor de resultados atestando a eficiência dos inoculantes e/ou bactérias num efeito similar à fertilização nitrogenada mineral foi obser-

vado. O efeito dessas bactérias na promoção de crescimento apareceu como mais consistente do que o efeito na FBN. As pesquisas têm avançado no intuito de compreender melhor a relação entre a planta e as bactérias, o que leva a crer que, num futuro próximo, a inoculação da cana-de-açúcar visando à nutrição em N será exitosa.

Com a manutenção da palha de cana-de-açúcar com a colheita mecanizada, também houve uma expectativa quanto à redução da quantidade de N necessário para aplicação via fertilizante, tendo em vista que parte do nutriente seria reciclado na decomposição do palhço e não mais perdido por volatilização na queima do canavial por ocasião da colheita. Isso, na verdade, não se comprovou, porque a dinâmica do N da palha é lenta. A palha de cana, com relação carbono:nitrogênio (C:N) entre 80:1 e 100:1, leva cerca de um ciclo (1 ano) para alcançar um valor de relação C:N de 30:1 a 40:1, quando, a

partir de então, se esperaria uma mineralização líquida de N (Pimentel et al., 2019). O que ocorre, no entanto, é que, no momento em que o N da palha seria liberado para o solo, uma nova quantidade de palha com relação C:N entre 80:1 a 100:1 é deixada sobre o solo em razão de nova colheita, tendendo a imobilizar parte do N que seria disponibilizado a partir da palha do ciclo anterior. Dessa forma, na prática, nenhuma redução de adubação nitrogenada é atualmente observada.

A adubação nitrogenada tem também um papel importante no desempenho ambiental dos produtos derivados da cana-de-açúcar, sobretudo do etanol, cuja adição na gasolina e/ou substituição se destaca no cenário nacional na redução de emissões de gases de efeito estufa e na mitigação às mudanças climáticas globais. Contudo, o que se viu na cana-de-açúcar é que o fator de emissão de óxido nitroso (N_2O) a partir do fertilizante nitrogenado mineral é, em geral, inferior ao valor default do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (do inglês Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC), de 1% (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006), 0,7% em média (Carvalho et al., 2021). No entanto, a aplicação do fertilizante nitrogenado mineral em conjunto com a vinhaça conduz a emissões de N_2O até três vezes. Estudos realizados por Silva et al. (2017b) mostraram que o efeito combinado da aplicação de vinhaça e fertilizante nitrogenado potencializou as emissões de N_2O , seja em cultivo irrigado, seja em condições de sequeiro (Figura 8.10).

A maior emissão de N_2O a partir do fertilizante aplicado junto ou em período muito próximo da aplicação de vinhaça se deve provavelmente à presença de C solúvel e água, ambos os fatores fundamentais para a emissão de N_2O nos processos de nitrificação e desnitrificação. A estratégia para evitar emissões elevadas de N_2O é o

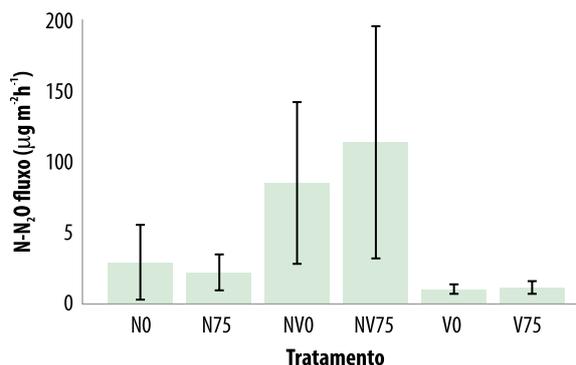


Figura 8.10. Efeito sinérgico da aplicação de vinhaça e fertilizante nitrogenado no fluxo médio de $N-N_2O$ (\pm um erro-padrão) para tratamentos na cana-de-açúcar.

Nota: N0, nitrogênio sem irrigação; V0, vinhaça sem irrigação; NV0, nitrogênio mais vinhaça sem irrigação; N75, nitrogênio sob irrigação; V75, vinhaça sob irrigação; NV75, nitrogênio mais vinhaça sob irrigação.

Fonte: Silva et al. (2017b).

planejamento temporal da aplicação do fertilizante e da aplicação da vinhaça, evitando-se fazê-los em períodos muito próximos.

Há que se ressaltar a prática atual de aplicação localizada de vinhaça enriquecida com N (principalmente ureia), o que possivelmente resulta em alta emissão de N_2O e, conseqüentemente, comprometimento do desempenho ambiental da produção de cana-de-açúcar e produtos derivados.

A presença de palha sobre o solo também tende mais comumente a aumentar a emissão de N_2O (Gonzaga et al., 2018; Vasconcelos et al., 2018), porém, talvez o impacto mais significativo seja na perda de N na forma de NH_3 (Pinheiro et al., 2018). A atividade da urease na palha da cana-de-açúcar é relativamente maior do que no solo, o que potencialmente agrava as perdas de N por volatilização (Mira et al., 2017).

A volatilização de N na forma de NH_3 é um problema ambiental, mas também agrônômico, uma vez que o percentual perdido reduz a eficiência de fertilização. A reação da ureia no solo envolve ação da urease e posterior carbonatação em contato com umidade (água), resultando numa

elevação excessiva do pH ao redor do grânulo de fertilizante. No caso de o fertilizante estar localizado na superfície do solo, as perdas podem chegar a 30% do aplicado, enquanto a volatilização tende a zero quando há cobertura com solo (adubo no sulco de plantio, por exemplo) ou a ocorrência de chuva logo após a aplicação (10 mm são suficientes para zerar perdas de amônia – NH_3).

Ao considerar que a ureia é a fonte de menor custo por ponto de N, há uma motivação no uso dessa fonte para aplicações em superfície, mesmo que com riscos maiores de insucesso. O uso de inibidor da urease em fertilizantes especiais reduz e atrasa a perda de NH_3 (Figura 8.11). É importante perceber que o atraso na perda de N por volatilização de NH_3 também representa maior chance de ocorrência de uma chuva de 10 mm, que reduz a zero a perda.

Fertilização fosfatada

A adubação fosfatada em cana-de-açúcar é fundamental para a maximização da produção da cultura, principalmente, em solos do Cerrado,

que são, em sua maioria, de baixa fertilidade natural em P.

Solos de outras regiões produtoras de cana-de-açúcar do País, como os do bioma Mata Atlântica, também apresentam baixa fertilidade natural em fósforo (P), porém, não são tão fixadores de P, como os do bioma Cerrado. Esse é o caso dos solos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste. Nesses solos, a fosfatagem corretiva pode ser ainda mais promissora e dissociada da adubação no sulco de plantio.

Em três experimentos foi estudado o efeito da fosfatagem corretiva associada à adubação de plantio no fundo do sulco. Na fosfatagem foi utilizado superfosfato triplo na dose de 100 a 150 kg ha^{-1} de pentóxido de fósforo (P_2O_5), aplicado a lanço e incorporado (Rein et al., 2015). Houve ganhos de 17 e 18 t ha^{-1} em um solo argiloso em Anicuns, GO; de 7 e 15 t ha^{-1} em um solo de textura média em João Pinheiro, MG; e de 9 e 6 t ha^{-1} em um solo de textura média em João Pinheiro, MG, para cana-planta e soca, respectivamente.

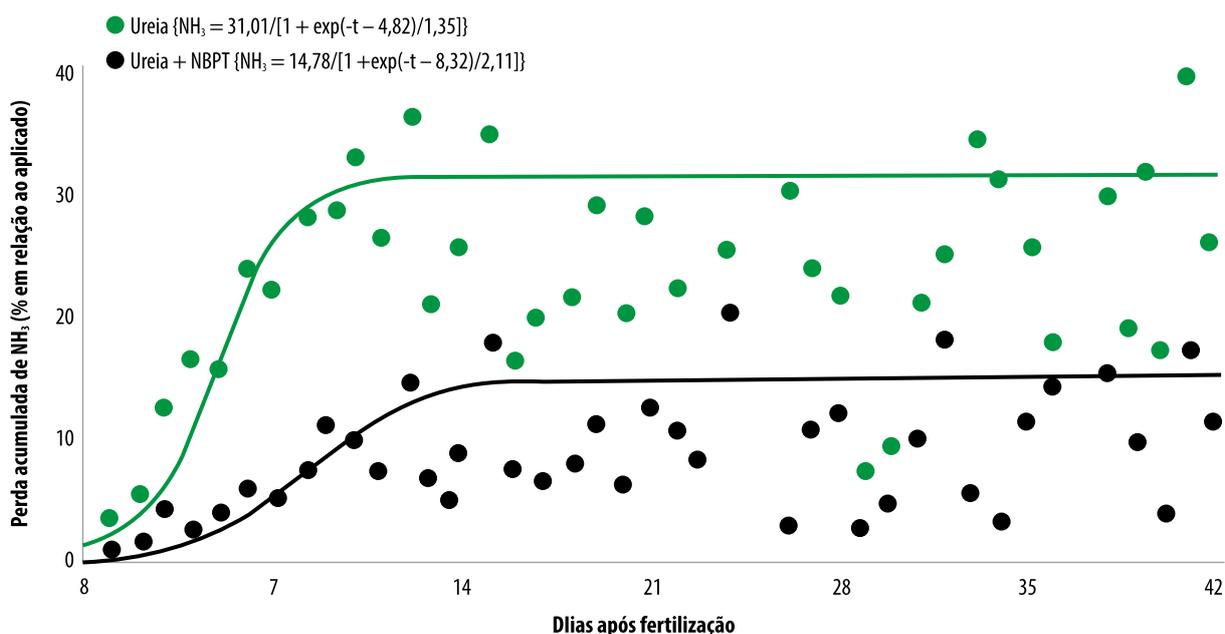


Figura 8.11. Perda acumulada de nitrogênio na forma de amônia (NH_3) em 42 dias após aplicação de ureia e ureia + inibidor da urease (ureia + NBPT) a partir de metanálise de 35 estudos.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2017a).

Curvas de respostas de cana-de-açúcar a doses de P foram estudadas em um Latossolo Vermelho muito argiloso em Brasília, com baixo teor de P, em cana-planta e duas socas (Rein; Sousa, 2013) (Figura 8.12). Esse trabalho evidenciou respostas significativas do rendimento de colmos com o uso de superfosfato triplo aplicado a lanço e incorporado no plantio, com ganhos expressivos até a dose de 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Na cana-planta, o rendimento mínimo (sem aplicação de P₂O₅) foi de 74,8 t ha⁻¹ e o rendimento máximo obtido foi de 129,9 t ha⁻¹, o que representou um aumento de 73,6%. Nas duas safras de cana-soca (2011 e 2012) os aumentos foram de 58,7 e 134,7%, respectivamente. Os aumentos significativos de produtividade de colmos, nas duas safras de cana-soca, mostraram o efeito residual do fertilizante, proporcionando mais longevidade ao canavial.

Experimentos realizados em diferentes regiões comparando doses e formas de aplicação de P em diferentes tipos de solos na produtividade da cana-de-açúcar (Rein et al., 2015) mostraram que a aplicação de P a lanço e incorporado

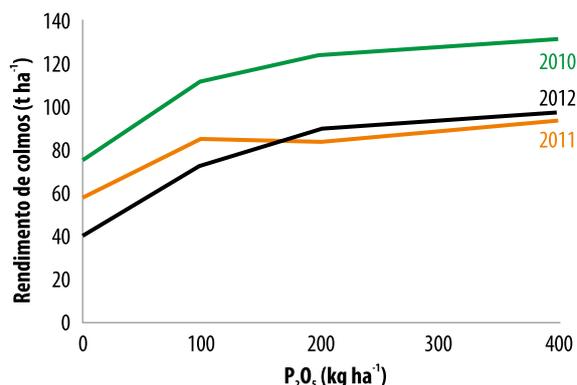


Figura 8.12. Rendimento de colmos de cana-de-açúcar a doses de fósforo aplicadas a lanço em Latossolo Vermelho muito argiloso.

Fonte: Adaptado de Rein e Sousa (2013).

proporcionou maiores rendimentos em comparação à aplicação no sulco de plantio (Tabela 8.8). Isso indica alta resposta da cana-de-açúcar à aplicação de P em maior volume de solo, que surge como possível alternativa à aplicação em sulco de plantio, tradicionalmente realizada na cana-de-açúcar. Esse fato pode estar associado ao acesso de uma maior fração do sistema radicular ao P quando aplicado a lanço com incorporação, embora em menor concentração no

Tabela 8.8. Produtividade da cana-planta em resposta ao modo de aplicação do fertilizante fosfatado no plantio, sem aplicação de fósforo (testemunha), e com o fertilizante fosfatado aplicado exclusivamente no sulco de plantio ou a lanço com incorporação.

Local	Solo/textura	P solo ⁽¹⁾ (mg dm ⁻³)	Dose de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	TCH cana-planta		
				Testemunha	Sulco	Lanço
				(t ha ⁻¹ por corte)		
Belmonte, BA	Argissolo/arenosa	2 (M)	100–200	28	96	115
Lençóis Paulista, SP	Argiloso/arenosa	9 (H)	100	62	85	97
Lençóis Paulista, SP	Neossolo/arenosa	3 (R)	200	69	104	148
Rio das Pedras, SP	Neossolo/arenosa	80 (R)	120	61	74	83
Junqueirópolis, SP	Latossolo/arenosa	13 (R)	100–200	126	144	145
Santa Rita, PB	Argissolo/arenosa	7 (M)	200	63	81	88
Carpina, PE	Argissolo/média	14 (M)	200	87	96	108

⁽¹⁾ Extratores de fósforo do solo: H=H₂SO₄ 0,25 mol L⁻¹ ("0,5 N"); M = Mehlich 1 (H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ + HCl 0,05 mol L⁻¹); R = resina trocadora de íons.

Fonte: Reis e Caballa-Rosand (1986), Morelli et al. (1987, 1991), Tomaz (2009) e Costa (2012).

solo. É baixa a mobilidade do P no solo, e sua ciclagem ao longo dos cortes, pois os teores de P na palhada são baixos.

Dois experimentos realizados na Usina Goiasa, em Goiatuba, GO, testaram o efeito da fosfatagem corretiva com superfosfato triplo associada à aplicação de P no sulco de plantio em dois Latossolos Vermelhos de textura média e argilosa (Rein et al., 2021) (Tabela 8.9). Os resultados mostraram um ganho médio na cana-planta de 14,6 t e 11,6 t ha⁻¹ ao ano nos solos de textura média e argilosa, respectivamente com dis-

ponibilidade baixa e adequada de P. Nas cinco safras de cana-soca, o ganho médio foi de 15,7 e 2,3 t ha⁻¹ ao ano nos solos de textura média e argilosa, respectivamente. Em relação ao solo com baixo teor de P, o ganho médio considerando-se as seis safras foi em torno de 15 t ha⁻¹ de colmos ao ano, o que mostrou alta resposta à adubação corretiva do solo.

No Nordeste foram conduzidos três ensaios em Argissolos de texturas arenosa, média e argilosa (Costa, 2012). O trabalho avaliou a produtividade da cana-de-açúcar nos dois primeiros

Tabela 8.9. Experimentos realizados na Usina Goiasa, em Goiatuba, GO. Efeito da fosfatagem corretiva com superfosfato triplo associada à aplicação de fósforo no sulco de plantio em dois Latossolos Vermelhos de textura média e argilosa.

Experimento 1				
Tratamento	P corretivo		Sulco de plantio	Soqueira ⁽²⁾
	Fonte ⁽¹⁾	Taxa		
P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)				
A	–	0	0	0
B	–	0	170	0
C	–	0	170	40
D	ST	150	170	0
E	ST	150	170	40
F	Arad, PR	150	170	0
G	Arraias, PR	125	170	0
H	–	0	100 + 70 ⁽³⁾	0
Experimento 2				
Tratamento	Fertilização corretiva		Sulco de plantio	Soqueira
	Fonte	Taxa		
P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)				
A	–	0	0	0
B	–	0	170	0
C	–	0	100 + 70 ⁽³⁾	0
D	–	0	170	40
E	ST	150	170	0

⁽¹⁾ ST, superfosfato triplo; e Arad PR e Arraias PR, rochas fosfáticas de Arad e Arraias, respectivamente. ⁽²⁾ Taxa de fósforo anual de manutenção como superfosfato triplo. ⁽³⁾ 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no sulco de plantio e 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em cobertura. Fonte: Rein et al. (2021).

ciclos de cultivo: cana-planta e a primeira soca. Para avaliar as formas de aplicação do P no solo, fracionou-se a dose de 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em aplicações a lanço e aplicada no fundo do sulco de plantio, totalizando-se seis tratamentos: testemunha (sem aplicação de P); 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no fundo do sulco; 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a lanço; 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a lanço e 140 kg ha⁻¹ P₂O₅ no fundo do sulco; 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a lanço e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no fundo do sulco; e 140 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a lanço e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no fundo do sulco. O P não foi aplicado em cana-soca. A forma de aplicação do adubo influenciou a produtividade agrícola da cana-de-açúcar nos solos de textura arenosa e média, bem como não teve efeito no solo de textura argilosa. Nos solos de textura arenosa e média, a aplicação a lanço do adubo incrementou a produtividade em 10,31 e 16,67% nos ciclos de cana-planta e cana-soca, respectivamente.

Em relação à calibração de P em solos do Cerrado, foram desenvolvidos estudos em cinco ciclos de cana-de-açúcar (cana-planta e quatro safras de cana-soca). Os resultados mostraram que o teor de P no solo, obtido pelo método da resina, em torno de 12 mg dm⁻³, proporcionou um rendimento relativo próximo a 100% (Figura 8.13). Esse valor é um pouco inferior ao nível crítico de P adotado nas tabelas de recomendação de adubação de P do Cerrado, que é de 15 mg dm⁻³. Ausência de resposta da cana-de-açúcar à adubação fosfatada em solos com teores de P pelo método da resina abaixo de 12 a 15 mg dm⁻³ tem sido verificada em outras regiões (Soltangheisi et al., 2019).

Simões Neto et al. (2015) mostraram que o nível crítico de P nos solos do Nordeste usando-se a resina como extrator foi bem superior que o preconizado para os solos do Cerrado, sugerindo que a mineralogia dos solos do Nordeste é menos fixadora de P, e, portanto, é

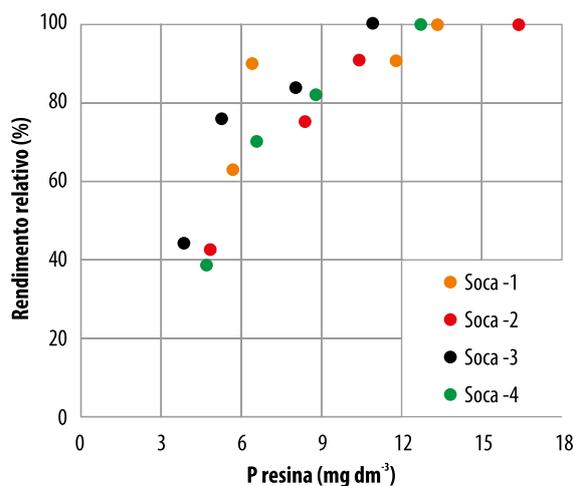


Figura 8.13. Calibração de fósforo em solos do Cerrado.

necessário manejar a adubação fosfatada de maneira diferente, considerando a especificidade regional.

Bases para a recomendação da adubação fosfatada

Citam-se as principais recomendações para manejo de P da Embrapa (Rein et al., 2015):

- Combinar as diferentes formas de aplicação (corretiva, sulco, soca).
- Elevar/manter os teores de P no solo no nível adequado.
- Considerar o potencial produtivo (determinado pelo ambiente e práticas agrícolas).
- Exportação de P nos colmos de 100 a 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ ao longo de cinco safras (cortes), perfazendo de 400 a 500 t ha⁻¹.

Adicionalmente, é necessário considerar a mineralogia dos solos da região de cultivo da cana-de-açúcar, que atualmente é cultivada em condições muito diversas de clima e solo.

Fertilização potássica

O potássio (K) é muito extraído pela cana-de-açúcar, como se mostra na Tabela 8.10. Isso indica a necessidade de uma adubação expressiva

Tabela 8.10. Extração de nutrientes pela cana-de-açúcar e alocação em diferentes em partes da planta, com ênfase na maior extração de potássio.

Compartimento	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	S
	(kg por 100 t)					
Colmos	84,0	35,0	148,0	36,0	41,0	23,0
Restos vegetais	62,0	18,0	88,0	38,0	13,0	13,0
Compartimento	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
	(g por 100 t)					
Colmos	200,0	43,0	3.178,0	1.424,0	346,0	–
Restos vegetais	233,0	44,0	119,0	1.073,0	236,0	–

Média de 24 estudos publicados entre 2002 e 2017.
 Fonte: Otto et al. (2019).

desse nutriente, a fim de suprir a demanda da cultura. A resposta para o nutriente é mais significativa quanto maior for a sua deficiência no solo, ou seja, as doses devem ser reduzidas com a elevação do teor de K no solo.

As respostas de aumento de produtividade para K são muito variáveis, principalmente pelo elevado consumo de luxo desse nutriente, quando comparado a N e P (Figura 8.14).

Essa variabilidade na relação entre produtividade e K na parte aérea (Figura 8.14) está relacionada à grande amplitude de teores de K, muito acima da necessidade da cultura, no caso de áreas com histórico de fertirrigação com vinhaça. Isso também é mostrado na Figura 8.15.

O K no palhço da cana-de-açúcar é rapidamente reciclado e disponibilizado para cultura em relação ao demais. Carvalho et al. (2013)

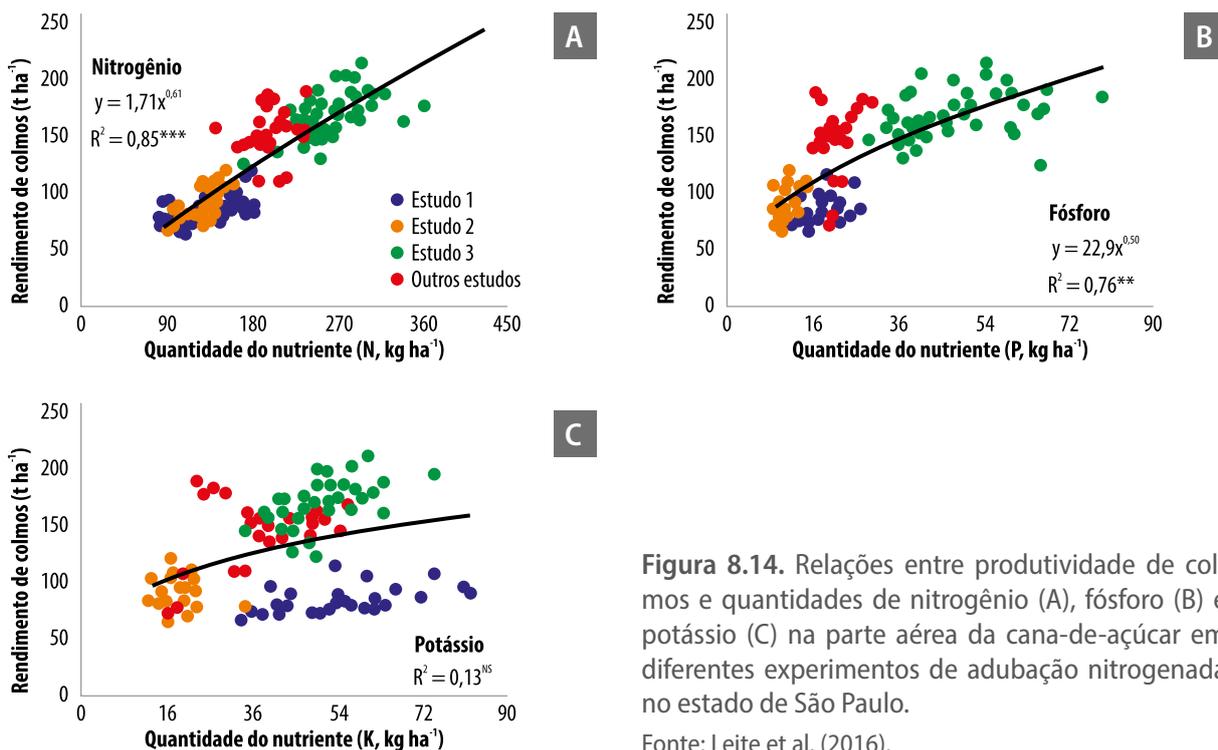


Figura 8.14. Relações entre produtividade de colmos e quantidades de nitrogênio (A), fósforo (B) e potássio (C) na parte aérea da cana-de-açúcar em diferentes experimentos de adubação nitrogenada no estado de São Paulo.

Fonte: Leite et al. (2016).

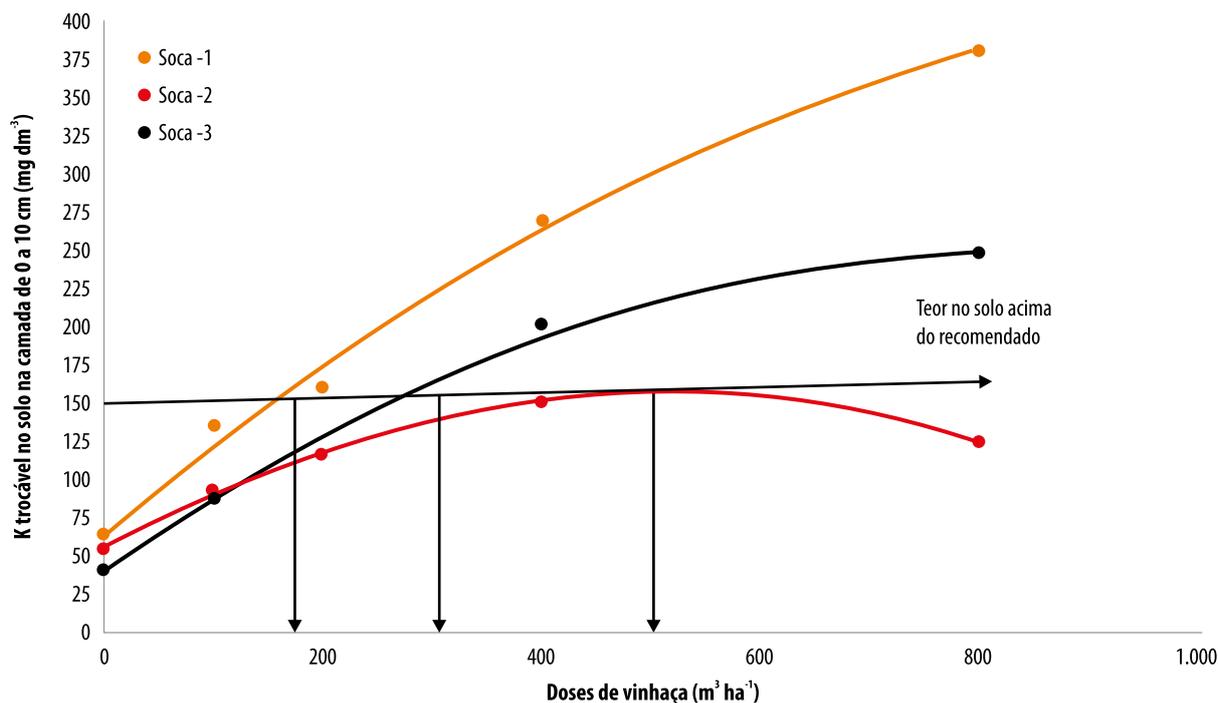


Figura 8.15. Efeitos da vinhaça nos teores de potássio trocável no solo, na camada de 0 a 10 cm.

Y = Teores de K (mg dm⁻³)
 Fonte: Silva et al. (2014).

verificaram que a decomposição ocorreu de forma significativa nos primeiros 180 dias e após 330 dias (Figura 8.16). A entrada de K chega a 144 kg ha⁻¹ durante as fases iniciais de decomposição do palhicho (Tabela 8.11).

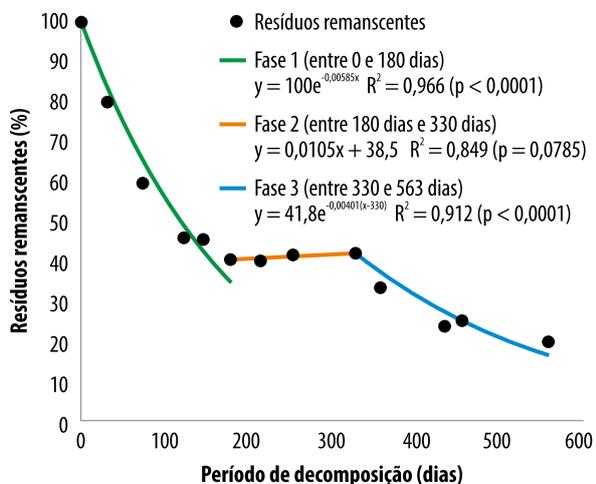


Figura 8.16. Decomposição do palhicho de cana-de-açúcar ao longo do tempo, compreendendo duas estações chuvosas e uma estação seca.
 Fonte: Carvalho et al. (2013).

Tabela 8.11. Quantidades iniciais e remanescentes de macronutrientes no palhicho de cana-de-açúcar, destacando-se o aporte de potássio.

Tempo	Palhicho (t ha ⁻¹)	Macronutrientes (kg ha ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Tempo zero	25	76	12	144	48	61	26
Após 270 dias	9	78	9	5	30	21	11

Fonte: Adaptado de Coelho (2015).

Adubação com enxofre e gessagem

O fornecimento de enxofre (S) é fundamental para o sucesso da cultura da cana-de-açúcar por causa das funções que ele desempenha na planta, pois está presente nos aminoácidos (metionina, cistina e cisteína), bem como na composição da ferredoxina, enzima-chave no processo da fixação simbiótica do N₂ atmosférico. Esses fatores, aliados à deficiência generalizada desse nutriente em solos com baixo conteúdo de

matéria orgânica, requerem especial atenção quanto ao seu manejo.

As áreas com maiores possibilidades de resposta ao S são:

- Áreas sem aplicação de resíduos orgânicos, ou de gesso agrícola.
- Áreas localizadas em solos mais arenosos com baixo teor do nutriente.

O S pode ser fornecido para a cultura da cana-de-açúcar das seguintes formas:

- Na utilização de fontes de P contendo S, como: superfosfato simples (12% S), termofosfato com S (6% S), fosfato parcialmente acidulado, fosfato natural reativo misturado com superfosfato simples (4% S) ou fosfato monoamônico (MAP) revestido com S, no programa regular de adubação.
- Na utilização de gesso agrícola, que, por questões de operacionalidade, se recomenda o uso na dose de 750 a 1.000 kg ha⁻¹ (100 a 150 kg ha⁻¹ de S), aplicados em área total.

A dose de S recomendada por corte ou safra, considerando-se os fatores nutricionais e de perdas, é de aproximadamente 50 a 60 kg ha⁻¹, considerando-se também os teores médios desse nutriente no solo.

Rocha et al. (2017) aplicaram diferentes doses de gesso e avaliaram a distribuição de cálcio (Ca) após um período de 90 dias em um perfil de Latossolo Vermelho Amarelo em campo, como se mostra na Figura 8.17.

Esses resultados mostraram a importância do gesso no aprofundamento de Ca em subsuperfície, favorecendo o aprofundamento do sistema radicular, o que possibilita uma maior capacidade de absorção de água e nutrientes, superando períodos de deficit hídrico.

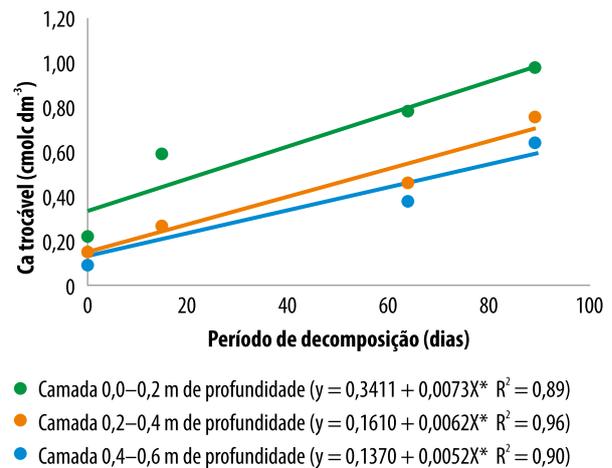


Figura 8.17. Movimentação de cálcio no perfil do solo em função do tempo de aplicação de gesso.

Fonte: Adaptado de Rocha et al. (2017).

Outra importância da gessagem é a movimentação de sulfato (SO₄) para as camadas inferiores do perfil do solo acompanhado por cátions (Ca, Mg e K), que posteriormente se dissociam, promovendo o processo de troca de cátions nos coloides em subsuperfície, liberando alumínio (Al) para a solução do solo. O Al, por sua vez, se associa ao SO₄ formando o íon AlSO₄⁺. Esse processo torna o Al não tóxico para as plantas, além de adicionar Ca, Mg e S em profundidade, auxiliando no desenvolvimento das raízes das plantas e, conseqüentemente, maximizando a capacidade de absorver água e nutrientes.

Rocha et al. (2017) também estudaram o efeito da aplicação de diferentes doses de gesso na mobilização do SO₄ em profundidade e observaram que o aumento da dose aplicada resultou numa maior movimentação do SO₄ em subsuperfície, ou seja, quanto maior foi a dose, maior foi a profundidade de mobilização do SO₄ (Figura 8.18). Isso reflete na capacidade do gesso em neutralizar o Al em subsuperfície, atuando em associação com o calcário, que tem efeito mais significativo na camada arável.

Uma característica muito importante do gesso é o seu efeito residual, muito importante para culturas de vários ciclos de produção, a exemplo da cana-de-açúcar.

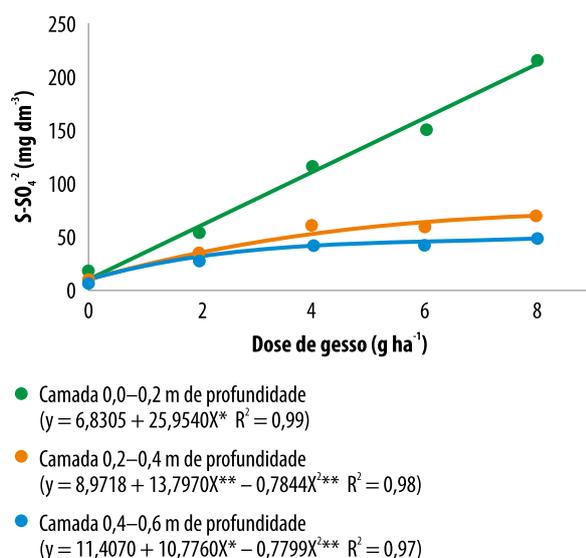


Figura 8.18. Distribuição do íon sulfato em profundidade em um Latossolo Vermelho Amarelo, com adição de diferentes doses de gesso.

Fonte: Adaptado de Rocha et al. (2017).

Araújo et al. (2016), ao estudarem a produção de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho distrófico em resposta ao uso de gesso no plantio (Figura 8.19), observaram que a aplicação de 5 t ha⁻¹ de gesso incrementou a produção de colmos, com aumento de 10% (13 t ha⁻¹) na cana-planta e um incremento médio de 20% (16 t ha⁻¹ por corte) de colmo, nas três safras de cana-soca subsequentes. Esse aumento foi atribuído ao fornecimento de S como nutriente e à melhoria do ambiente radicular em profundi-

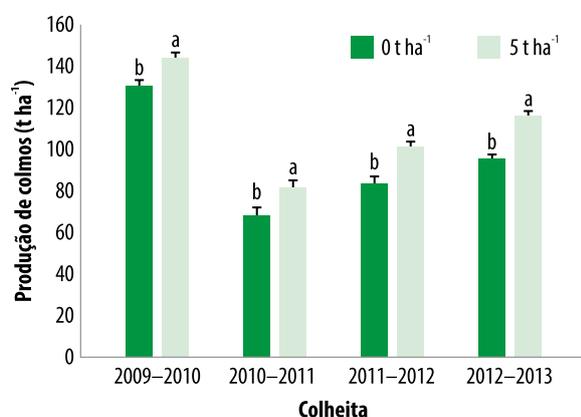


Figura 8.19. Produção de colmos de cana-de-açúcar com a aplicação de gesso.

Fonte: Araújo et al. (2016).

de, com grande aumento nos teores de Ca e redução na saturação por Al (Figuras 8.17 e 8.18). O ganho de produtividade nas soqueiras evidencia o efeito residual do gesso.

Esses resultados mostraram a importância da aplicação de gesso na produção de cana-de-açúcar em solos distróficos do Cerrado, que apresentam alta saturação de Al abaixo da camada arável. Além disso, observou-se nesse mesmo experimento que dose superior à recomendada (5 t ha⁻¹) não proporcionou ganhos de produtividade, causando ainda maior lixiviação de magnésio (Mg) da camada superficial (Araújo, 2018), ainda assim ao alcance do sistema radicular da cultura.

Na comparação do efeito do gesso na movimentação de SO₄ e Ca no perfil do solo, Araújo (2018) comparou a reação do gesso após 13 meses e 87 meses de aplicação nas doses de 0, 0,5, 5 e 10 t ha⁻¹. Observou-se aos 13 meses após a aplicação grande movimentação de SO₄ e Ca no perfil até pelo menos 60 cm com as maiores doses aplicadas (Figura 8.20). Aos 87 meses após a aplicação, o enriquecimento atingiu camadas mais profundas, principalmente com a dose de 10 t ha⁻¹, mas não resultando em ganhos de produtividade. Isso explica o efeito residual do gesso ao longo do tempo no cultivo de cana-de-açúcar no Cerrado brasileiro.

O efeito do gesso na redução da saturação de Al e também do Al trocável nas camadas subsuperficiais foi mostrado nesse mesmo experimento (Figura 8.21), aos 50 meses após a aplicação de 5 t ha⁻¹ de gesso (Araújo et al., 2016).

O efeito residual do gesso também foi observado no desenvolvimento de raízes da cana-de-açúcar, em que a aplicação de 5 t ha⁻¹ proporcionou aumento significativo da densidade de massa seca de raízes a partir da camada de 40 cm, representando um aumento médio de 56% no perfil aos 87 meses após a aplicação do gesso (Figura 8.22).

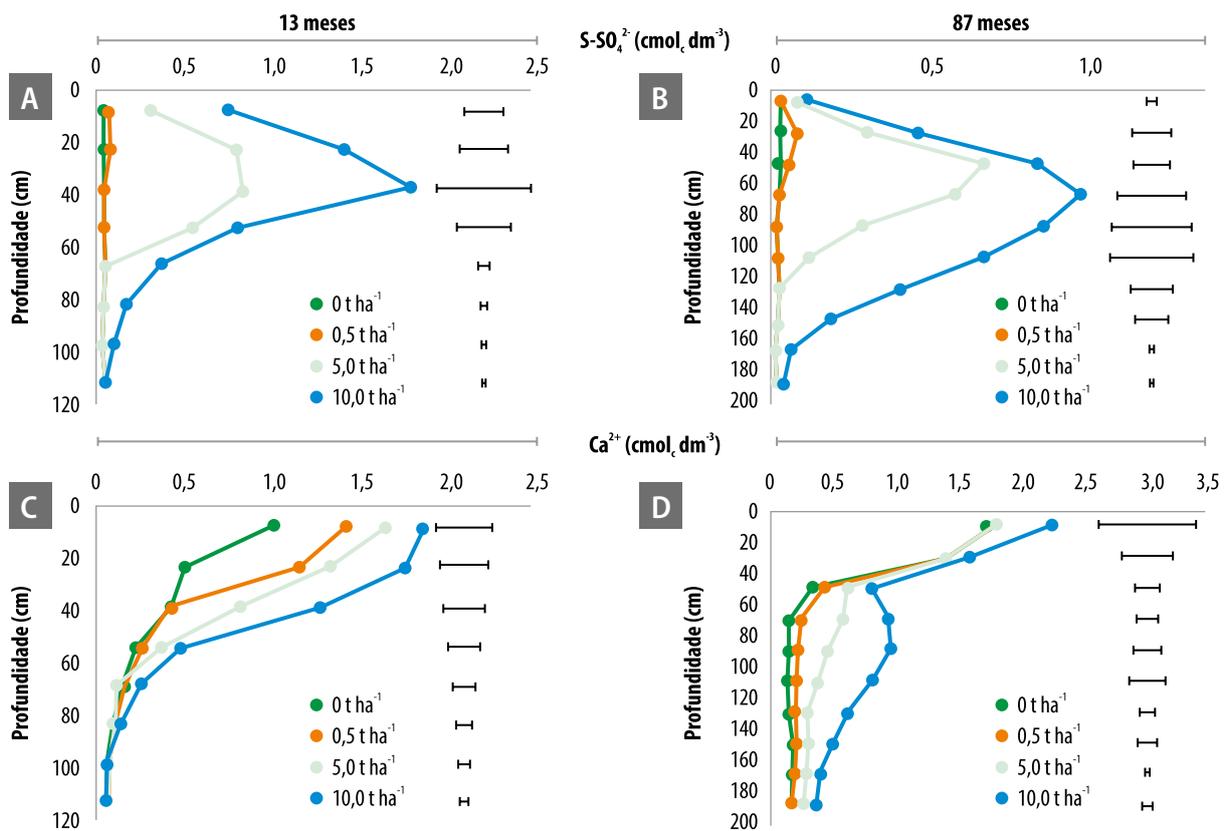


Figura 8.20. Efeito residual da aplicação de gesso na movimentação de $S-SO_4^{2-}$ (A) e Ca^{2+} (B) no perfil do solo. Fonte: Araújo (2018).

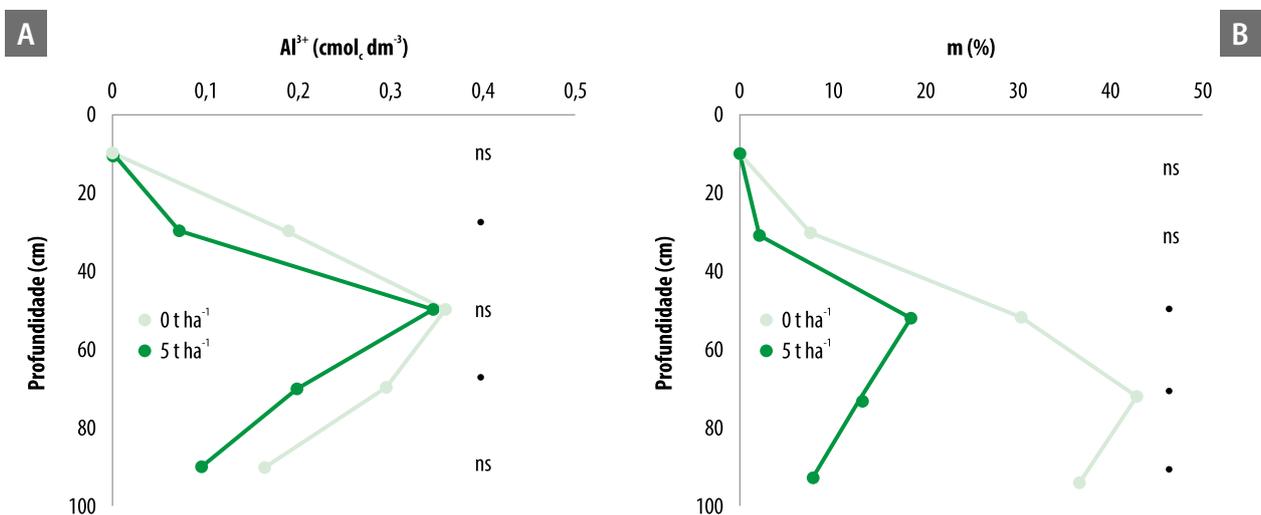


Figura 8.21. Redução dos teores de alumínio (A) e saturação por alumínio (B) no perfil do solo 50 meses após a aplicação de gesso.

Fonte: Araújo et al. (2016).

Além dos fatores citados anteriormente, o gesso pode proporcionar aumento no estoque de carbono do solo. Araújo et al. (2019), ao avaliarem o efeito do gesso no estoque de carbono, após 87 meses de aplicação do gesso, observaram um

aumento de 12,3 t ha⁻¹ em um perfil de 2,0 m de profundidade, em que 84% (10,3 t ha⁻¹) desse valor concentrou-se abaixo de 40 cm de profundidade (Figura 8.23). Isso está associado ao maior desenvolvimento do sistema radicular da

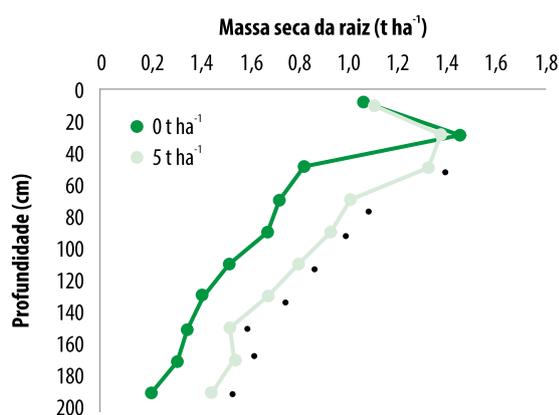


Figura 8.22. Efeito residual da aplicação de gesso na densidade de raízes de cana-de-açúcar.

Fonte: Araújo et al. (2019).

cana-de-açúcar proporcionado pela ação do gesso e pelo efeito da colheita que adiciona material orgânico ao solo. Esse acúmulo de carbono no perfil do solo com a aplicação do gesso pode ser visto como uma prática mitigadora do aumento do efeito estufa e do aquecimento global. Além disso, pode ter impacto direto na melhoria da fertilidade e dos atributos físicos do solo (aumento da porosidade, distribuição de água e redução da densidade e compactação do solo).

Os solos do Cerrado, em geral, são ácidos, com baixos teores de Ca e Mg na camada arável e com excesso de Al em subsuperfície, sendo necessárias as práticas de calagem e gessagem para sua correção, proporcionando, com isso,

o melhor desenvolvimento da cana-de-açúcar, porque a cultura demanda elevados teores de bases e não tolera elevada saturação por Al. Portanto, recomenda-se a aplicação de gesso quando a saturação por Al do solo for maior que 20% ou o teor de Ca^{2+} for menor que $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Adubação com micronutrientes

A cultura da cana-de-açúcar no Brasil apresenta produtividades abaixo do seu potencial genético, fato associado principalmente à deficiência hídrica (Dias; Sentelhas, 2018), mas também à baixa fertilidade natural dos solos, em que a cultura vem se expandido. Um dos fatores responsáveis por essa baixa resposta da cultura em termos de produtividade são os baixos teores de micronutrientes nesses solos. Nesse sentido, é fundamental o desenvolvimento de pesquisas que visem avaliar a eficiência desses micronutrientes na produção de cana-de-açúcar.

Mellis et al. (2016) realizaram 11 experimentos em 11 locais pertencentes às principais regiões produtoras do estado de São Paulo, com o objetivo de verificar o efeito da adubação com micronutrientes na produção de colmos de cana-de-açúcar (Tabela 8.12). Para isso, foram aplicados de forma isolada boro (B), cobre (Cu), manganês

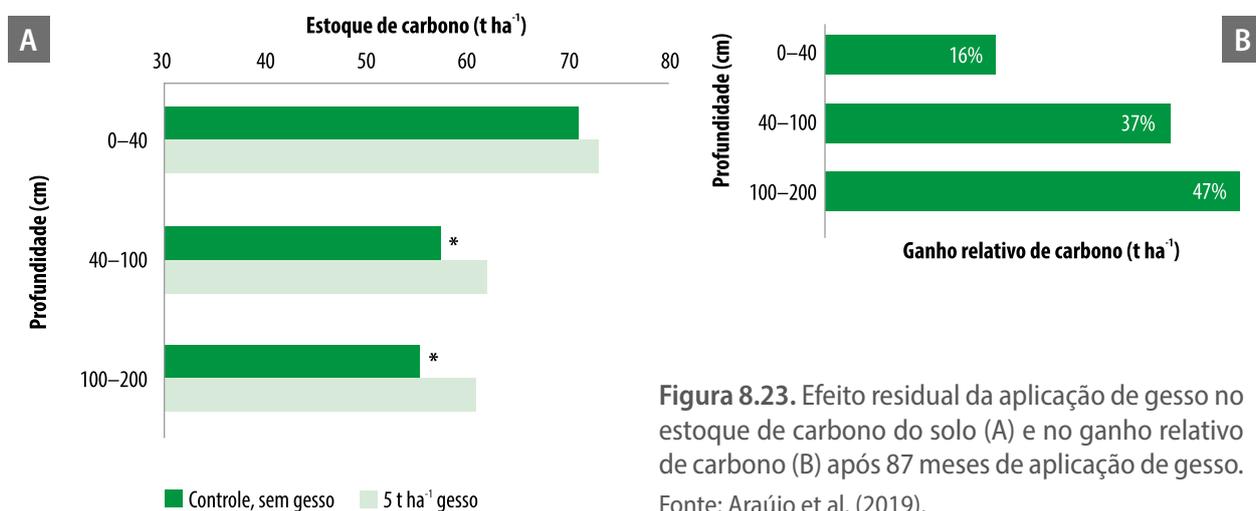


Figura 8.23. Efeito residual da aplicação de gesso no estoque de carbono do solo (A) e no ganho relativo de carbono (B) após 87 meses de aplicação de gesso.

Fonte: Araújo et al. (2019).

(Mn), zinco (Zn) e molibdênio (Mo) em sulco de plantio nas doses de 3, 10, 10, 10 e 2 kg ha⁻¹, respectivamente, além da associação desses micronutrientes. Os resultados mostraram que a aplicação individualizada dos micronutrientes promoveu aumento de produtividade. A adubação com B proporcionou ganhos significativos de produtividade em Orindiúva e José Bonifácio, com aumentos de 20 e 32 t ha⁻¹, respectivamente, em comparação à não aplicação de nutrientes (testemunha). A aplicação de Cu proporcionou ganhos significativos em Adamantina e José Bonifácio, com aumentos de 22 e 38 t ha⁻¹, respectivamente. A aplicação de Zn proporcionou ganhos em seis áreas avaliadas com aumentos, variando de 11 a 46 t ha⁻¹. A aplicação de Mn e Mo proporcionou ganhos em três locais, com aumentos variando de 8 a 30 t ha⁻¹, para a aplicação de Mn, e de 12 a 55 t ha⁻¹, para a aplicação de Mo. A aplicação dos micronutrientes de forma associada mostrou respostas significativas apenas em José Bonifácio, com aumento de 34 t ha⁻¹.

Esses resultados evidenciaram que a cana-de-açúcar tem elevada resposta à adubação com

micronutrientes, e que a intensidade da resposta vai depender do tipo de solo, cultivar e de condições climáticas, que são diferentes entre os locais avaliados. Nesse caso, as áreas de produção de cana-de-açúcar são antigas com até 80 anos de cultivo, com grande exportação desses nutrientes e sem reposição, esgotando, assim, o solo em micronutrientes. Além disso, houve uma grande expansão de cana-de-açúcar para solos mais pobres em fertilidade. Com isso, estudos com adubação de micronutrientes em áreas de cana-de-açúcar são cada vez mais necessários.

Silva et al. (2019), ao estudarem a disponibilidade e as reservas de ferro (Fe), Cu, Zn e Mn em solos cultivados com cana-de-açúcar no Nordeste e em diferentes contextos geológicos, concluíram que os teores no solo e os níveis foliares desses nutrientes estavam abaixo do referencial, sugerindo que está ocorrendo uma exportação contínua desses micronutrientes. Isso, certamente, causará deficiências significativas e interferência na produtividade. Portanto, sugere-se que, no manejo das adubações, já se inclua esses micronutrientes.

Tabela 8.12. Efeito dos micronutrientes na produtividade de cana-de-açúcar.

Tratamento	Local ⁽¹⁾											Frequência
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	(t ha ⁻¹)											
Controle	86	114	64	144	103	86	123	112	152	105	177	–
Zn	111 ^(*)	125	91 ^(*)	158 ^(*)	110	99	157 ^(*)	158 ^(*)	163 ^(*)	114	174	6/11
Mn	116 ^(*)	121	88 ^(*)	149	111 ^(*)	98	136	141	153	112	175	3/11
Cu	108 ^(*)	123	77	151	104	94	130	150 ^(*)	146	115	173	2/11
B	92	115	69	151	108	98	143 ^(*)	144 ^(*)	146	121	172	2/11
Mo	98	123	65	156 ^(*)	116 ^(*)	93	136	167 ^(*)	149	119	170	3/11
Completo	90	117	75	151	107	100	127	146 ^(*)	159	116	178	1/11
Média	100	120	77	151	108	96	135	149	152	115	174	–
CV (%)	11,3	8,3	9,7	5,1	5,2	12,0	9,6	15,1	4,2	13,8	3,9	–
F ⁽³⁾	5,17 ^(†)	0,90	5,11 ^(†)	1,24	2,63 ^(†)	0,89	2,71 ^(†)	2,72 ^(†)	2,81 ^(†)	1,11	1,24	–

⁽¹⁾ Local: 1-Adamantina 1; 2-Adamantina 2; 3-Paraguacú Paulista; 4-Serra Azul; 5-Assis; 6-Itapira; 7-Orindiúva; 8-José Bonifácio; 9-Olímpia; 10-Itapetininga; 11-Guaíra; ^(*) Valores no mesmo local diferem significativamente do tratamento controle (teste de Dunnett, P < 0,10); ⁽³⁾ F: F calculado; ^(†) Efeito significativo do tratamento (teste F, P < 0,10).

Fonte: Mellis et al. (2016).

Cavali (2020), ao avaliar o efeito da interação entre a calagem e a adubação com Zn em cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho argiloso (18 meses após o plantio), observou que a aplicação apenas de calcário dolomítico, em um solo com teor médio de Zn, proporcionou a máxima produtividade na dose de 1,5 t ha⁻¹ de calcário, ocorrendo, a partir desse valor, significativa redução da produtividade (Figura 8.24). No entanto, quando foram aplicados 10 kg ha⁻¹ de Zn, a perda de produtividade com o aumento da dose de calcário foi pouco pronunciada. Na dose de calcário de 3 t ha⁻¹, a produtividade foi 20 t ha⁻¹ superior com a aplicação de Zn. Com o aumento do pH, ocorre redução da disponibilidade de Zn no solo, e maior necessidade de sua aplicação para ganhos de produtividades.

Experimento realizado por Santos Junior e Ruiz (2019) mostrou a importância da aplicação foliar de micronutrientes. Os resultados apontaram um ganho significativo de produtividade

com aumento de 8,2 t ha⁻¹ de colmos, com a aplicação foliar aérea de 20 L ha⁻¹ de uma solução contendo micronutrientes (Figura 8.25).

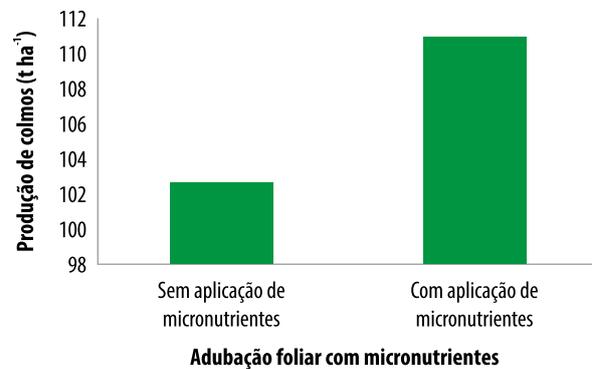


Figura 8.25. Rendimentos de cana-de-açúcar com e sem a aplicação de micronutrientes.

Fonte: Santos Junior e Ruiz (2019).

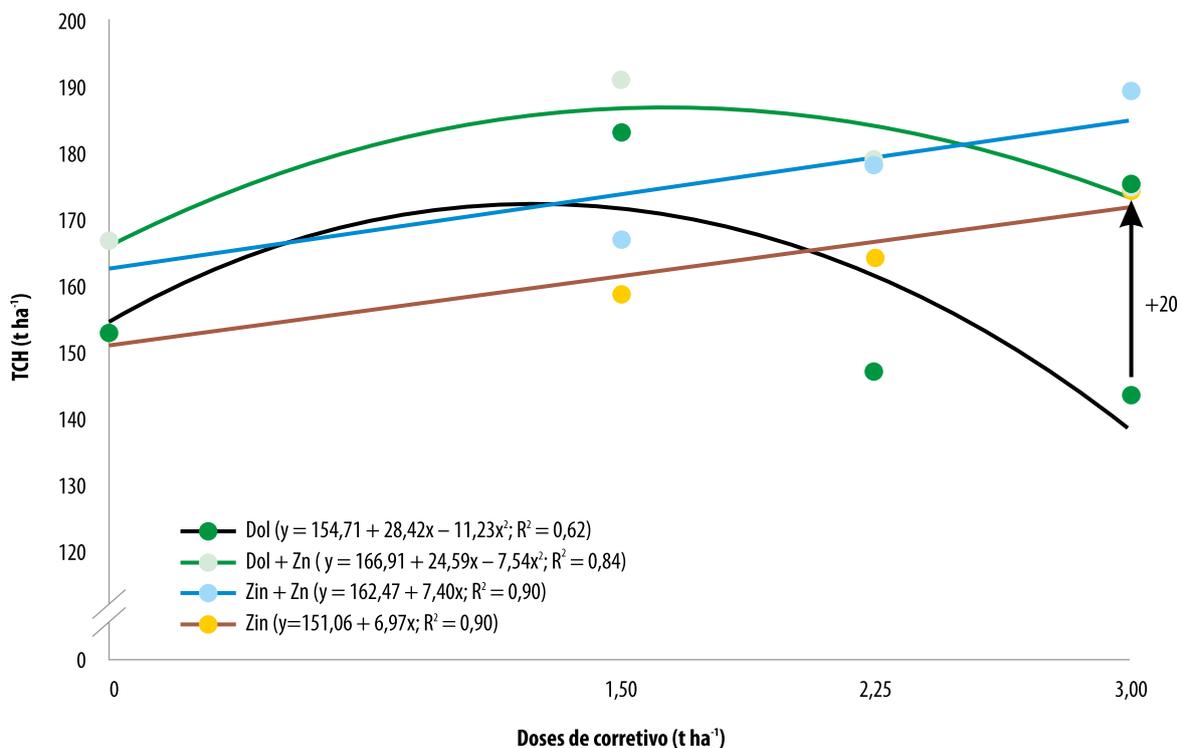


Figura 8.24. Efeito da calagem associada à aplicação de zinco em cana-de-açúcar.

Fonte: Cavali (2020).

Considerações finais

A estruturação das informações para modelar a demanda de nutrientes para determinada produtividade permite calcular o balanço nutricional e a recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da cana-de-açúcar. O balanço entre o que será preciso (demanda nutricional) e o que pode ser disponibilizado (suprimento) pelo solo representa a base para o desenvolvimento dos cálculos necessários para recomendar ou não fertilizantes. Portanto, o cálculo do balanço nutricional indicará a necessidade, ou não, da aplicação de fertilizantes.

Assim, essas recomendações de fertilizantes avançam substancialmente em relação às tabelas de recomendação por integrarem uma série de informações relacionadas ao sistema solo/planta, as quais vão além de uma calibração de caráter regional, normalmente desenvolvida para prestar informações médias sobre as classes de fertilidade e doses recomendadas. Isso faz com que, em muitos casos, o produtor esteja sub ou sobre-estimando a quantidade de fertilizante que está efetivamente aplicando em seu canavial.

No entanto, não se pode menosprezar a importância dessas tabelas de recomendação, pelo que elas têm proporcionado ao cultivo de cana-de-açúcar, principalmente por terem sido criadas, além dos estudos de correlação e calibração, com a experiência do conhecimento prático dos técnicos quanto às possibilidades de respostas da cana à aplicação de fertilizantes. O que se pretende é oferecer mais uma ferramenta baseada nas amplas informações oriundas da pesquisa científica com cana-de-açúcar para permitir aos técnicos e produtores um maior acervo de conhecimento sobre fertilidade do solo e nutrição de plantas, principalmente com os avanços dos últimos anos oriundos da introdução de novas variedades potencialmente bem mais produtivas.

Referências

- ALVAREZ V., V. H. Correlação e calibração de métodos de análises de solo. In: ALVAREZ V., V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (ed.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG: SBCS/UFV, 1996. p. 615-646.
- 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: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.
- ARAÚJO, L. G. **Gesso agrícola na cana-de-açúcar: produtividade, desenvolvimento radicular e estoque de carbono no solo**. 2018. 108 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- ARAÚJO, L. G.; FIGUEIREDO, C. C. de; SOUSA, D. M. G. de; NUNES, R. de S.; REIN, T. A. Influence of gypsum application on sugarcane yield and soil chemical properties in the Brazilian Cerrado. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 11, p. 1557-1563, 2016. DOI: [10.21475/ajcs.2016.10.11.PNE156](https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.11.PNE156).
- ARAÚJO, L. G.; SOUSA, D. M. G. de; FIGUEIREDO, C. C. de; REIN, T. A.; NUNES, R. de S.; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G. dos; MALAQUIAS, J. V. How does gypsum increase the organic carbon stock of an Oxisol profile under sugarcane? **Geoderma**, v. 343, p. 196-204, June 2019. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.02.029](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.029).
- BARRETO, A. C.; NOVAIS, R. F.; BRAGA, J. M. Determinação estatística do número de amostras simples de solo por área para avaliação de sua fertilidade. **Revista Ceres**, v. 21, n. 114, p. 142-147, 1974.
- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATOS JR., D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. van (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 3. ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agrônomo, 2022. 489 p. (IAC. Boletim técnico, 100).
- CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F. de; PRIETO, H. E.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; 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. 769-850.
- CARDOSO, J. A.; LACERDA, M. P. C.; REIN, T. A.; SANTOS JUNIOR, D. G. dos; FIGUEIREDO, C. C. de. Variabilidade de atributos de fertilidade do solo em áreas cultivadas com

- cana-de-açúcar no Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 506-515, abr. 2014. DOI: [10.1590/S0100-06832014000200015](https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200015).
- CARVALHO, A. M. de; COELHO, M. C.; SÁ, M. A. C. de; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G. dos; FRANZ, C. A. B.; REIN, T. A. Decomposição de resíduos vegetais de cana-de-açúcar no Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Ciência do solo: para quê e para quem: anais**. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 1-4.
- CARVALHO, J. L. N.; OLIVEIRA, B. G.; CANTARELLA, H.; CHAGAS, M. F.; GONZAGA, L. C.; LOURENÇO, K. S.; BORDONAL, R. O.; BONOMI, A. Implications of regional N₂O–N emission factors on sugarcane ethanol emissions and granted decarbonization certificates. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, p. 1-10, Oct. 2021. DOI: [10.1016/j.rser.2021.111423](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111423).
- CASTOLDI, G.; ROSOLEM, C. A.; CANTARELLA, H.; ANGHINONI, I.; DENARDIN, L. G. O.; PIVETTA, L. A.; SILVA, M. A. S.; DAMIN, V. Eficiência de uso de nitrogênio em agroecossistemas. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 10, p. 139-238, 2019.
- CAVALCANTI, F. J. de A. (coord.). **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. 3. ed. rev. Recife: IPA, 2008. 212 p.
- CAVALI, E. **Interação entre calagem e adubação com zinco em cana-de-açúcar**. 2020. 105 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônomo, Campinas.
- COELHO, M. C. **Efeitos da remoção do palhicho residual na ciclagem de nutrientes e no desempenho agrônomo da cana-de-açúcar**. 2015. 45 f. Dissertação. (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- CONAB. **Cana-de-açúcar: série histórica - custos - cana de açúcar - 2008 a 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-producao/planilhas-de-custo-de-producao/itemlist/category/800-cana-de-acucar>. Acesso em: 2 mar. 2022.
- COSTA, D. B. da. **Adubação fosfatada de cana-de-açúcar: disponibilidade de fósforo e formas de aplicação**. 2012. 83 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal rural de Pernambuco, Recife.
- CRUZ, D. M. **Depois da quebra em 2021, nova safra de cana deve retomar ganho em produtividade**. 28 jan. 2022. Disponível em: <https://www.energiaquefalacomvoce.com.br/2022/01/28/depois-da-quebra-em-2021-nova-safra-de-cana-deve-retomar-ganho-em-productividade>. Acesso em: 31 jan. 2022.
- DEGASPARI, I. A. M.; SOARES, J. R.; MONTEZANO, Z. F.; DEL GROSSO, S. J.; VITTI, A. C.; ROSSETTO, R.; CANTARELLA, H. Nitrogen sources and application rates affect emissions of N₂O and NH₃ in sugarcane. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 116, n. 3, p. 329-344, Apr. 2020. DOI: [10.1007/s10705-019-10045-w](https://doi.org/10.1007/s10705-019-10045-w).
- DELLABIGLIA, W. J.; GAVA, G. J. de C.; ARLANCH, A. B.; VILLAS BOAS, R. L.; CANTARELLA, H.; ROSSETTO, E. R. Produtividade de cana-de-açúcar fertirrigada com doses de N e inoculadas com bactérias diazotróficas. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 29-41, 2018. DOI: [10.15809/irriga.2018v1n1p28-41](https://doi.org/10.15809/irriga.2018v1n1p28-41).
- DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil – a multi-model approach for determining magnitudes and causes. **Science of the Total Environment**, v. 637-638, p. 1127-1136, Oct. 2018. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.05.017](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.017).
- FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; SOUZA, E. A.; ESPIG, S. A.; BROGGI, F. **Amostragem de solo para recomendação de corretivos e fertilizantes**. Recife: UFRPE, 2001. 3 p. (Boletim técnico).
- GLAZE-CORCORAN, S.; HASHEMI, M.; SADEGHPOUR, A.; JAHANZAD, E.; AFSHAR, R. K.; LIU, X.; HERBERT, S. J. Understanding intercropping to improve agricultural resiliency and environmental sustainability. **Advances in Agronomy**, v. 162, p. 199-256, 2020. DOI: [10.1016/bs.agron.2020.02.004](https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.004).
- GONZAGA, L. C.; CARVALHO, J. L. N.; OLIVEIRA, B. G. de; SOARES, J. R.; CANTARELLA, H. Crop residue removal and nitrification inhibitor application as strategies to mitigate N₂O emissions in sugarcane fields. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 206-216, Dec. 2018. DOI: [10.1016/j.biombioe.2018.09.015](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.015).
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: volume 1: general guidance and reporting**. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- JAMES, D. W.; WELLS, K. L. Soil sample collection and handling: technique based on source and degree of field variability. In: WESTERMAN, R. L. (ed.). **Soil testing and plant analysis**. 3. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1990. v. 3, p. 25-44. (Soil science society of America book series, n. 3). DOI: [10.2136/sssabookser3.3ed.c3](https://doi.org/10.2136/sssabookser3.3ed.c3).
- KALIDAS-SINGH, S.; BORA, I. P.; THAKURIA, D.; CHANGKIJA, S.; PUYAM A.; KHWAIRAKPAM, L. The comparative soil fertility in traditional and alder-based shifting cultivation of varied fallow lengths in Eastern Indian Himalayas. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 67, n. 6, 2021. DOI: [10.1080/00380768.2021.2009741](https://doi.org/10.1080/00380768.2021.2009741).

- KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H.; MIZUTANI, C. T. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 101-106, mar. 1999. DOI: [10.1590/S0100-06831999000100013](https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000100013).
- LEITE, J. M.; CIAMPITTI, I. A.; MARIANO, E.; VIEIRA-MEGDA, M. X.; TRIVELIN, P. C. O. Nutrient partitioning and stoichiometry in unburnt sugarcane ratoon at varying yield levels. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1-14, Apr. 2016. DOI: [10.3389/fpls.2016.00466](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00466).
- MACHADO, F. C.; MONTANARI, R.; SHIRATSUCHI, L. S.; LOVERA, L. H.; LIMA, E. de S. LIMA. Spatial dependence of electrical conductivity and chemical properties of the soil by electromagnetic induction. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1112-1120, July/Aug. 2015.
- MANUAL de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016. 376 p.
- MELLIS, E. V.; QUAGGIO, J. A.; BECARI, G. R. G.; TEIXEIRA, L. A. J.; CANTARELLA, H.; DIAS, F. L. F. Effect of micronutrients soil supplementation on sugarcane in different production environments: cane plant cycle. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 5, p. 2060-2070, Sept./Oct. 2016. DOI: [10.2134/agronj2015.0563](https://doi.org/10.2134/agronj2015.0563).
- MIRA, A. B.; CANTARELLA, H.; SOUZA-NETTO, G. J. M.; MOREIRA, L. A.; KAMOGAWA, M. Y.; OTTO, R. Optimizing urease inhibitor usage to reduce ammonia emission following urea application over crop residues. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 248, n. 19, p. 105-112, Oct. 2017. DOI: [10.1016/j.agee.2017.07.032](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.032).
- MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. do; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 224 p.
- MORELLI, J. L.; DEMATTÊ, J. L. I.; SILVA, J. A. V.; BAPTISTELLA, J. R.; GIOVANETTI, L. Z. Efeitos da aplicação do superfosfato simples em área total e dentro do sulco. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 4.; CONVENÇÃO DA ACTALAC, 13., 1987, Olinda. **Anais...** Piracicaba: Stab, 1987. p. 76-83.
- MORELLI, J. L.; NELLI, E. J.; BAPTISTELA, J. R.; DEMATTÊ, J. L. I. Termofosfato na produtividade da cana-de-açúcar e nas propriedades químicas de um solo arenoso de baixa fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 1, p. 57-61, 1991.
- NOVAIS, S. V.; MATTIELLO, E. M.; VERGUTZ, L.; MELO, L. C. A.; FREITAS, I. F. de; NOVAIS, R. F. Loss of extraction capacity of Mehlich-1 and monocalcium phosphate as a variable of remaining P and its relationship to critical levels of soil phosphorus and sulfur. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1079-1087, July/Aug. 2015. DOI: [10.1590/01000683rbc20140551](https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140551).
- OLIVEIRA, A. L. M. de; CANUTO, E. de L.; URQUIAGA, S.; REIS, V. M.; BALDANI, J. I. Yield of micropropagated sugarcane varieties in different soil types following inoculation with endophytic diazotrophic bacteria. **Plant and Soil**, v. 284, n. 1/2, p. 23-32, 2006. DOI: [10.1007/s11104-006-0025-0](https://doi.org/10.1007/s11104-006-0025-0).
- OLIVEIRA, E. C. A. de; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I. de; FREIRE, M. B. G. dos S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. da. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1343-1352, ago. 2010. DOI: [10.1590/S0100-06832010000400031](https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400031).
- OLIVEIRA, F. H. T. de; ARRUDA, J. A. de; SILVA, I. de F.; ALVES, J. do C. Amostragem para avaliação da fertilidade do solo em função do instrumento de coleta das amostras e de tipos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 973-983, out. 2007. DOI: [10.1590/S0100-06832007000500014](https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500014).
- OTTO, R.; ALTARUGIO, L. M.; SANCHES, G. M. Atualizações sobre exigências nutricionais da cana-de-açúcar para fins de manejo da adubação. **Informações Agronômicas**, n. 3, p. 1-10, set. 2019.
- OTTO, R.; CASTRO, S. A. Q.; MARIANO, E.; CASTRO, S. G. Q.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen use efficiency for sugarcane-biofuel production: what is next? **BioEnergy Research**, v. 9, n. 4, p. 1272-1289, 2016. DOI: [10.1007/s12155-016-9763-x](https://doi.org/10.1007/s12155-016-9763-x).
- OTTO, R.; SOUZA NETTO, G. J. M. de; ALMEIDA, R. F.; ALTARUGIO, L. M.; FAVARIN, J. L. Multisite response of sugarcane to nitrogen rates and split application under Brazilian field conditions. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 1, p. 419-435, Jan./Feb. 2021. DOI: [10.1002/agj2.20461](https://doi.org/10.1002/agj2.20461).
- PATSIOS, S. I.; KONTOGIANNOPOULOS, K. N.; BANIAS, G. F. Environmental impact assessment in agri-production: a comparative study of olive oil production in two European countries. In: BOCHTIS, D.; ACHILLAS, C.; BANIAS, G.; LAMPRIDI, M. (ed.). **Bio-economy and agri-production: concepts and evidence**. London: Academic Press, 2021. pt. 2, chap. 5, p. 83-116. DOI: [10.1016/B978-0-12-819774-5.00005-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819774-5.00005-9).
- PENATTI, C. P. **Adubação da cana-de-açúcar: 30 anos de experiência**. Itui: Editora Ottoni, 2013.
- PEREIRA, W. **Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar inoculada com bactérias diazotróficas**. 2011. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

- PIMENTEL, L. G.; CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. S.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Decomposition of sugarcane straw: basis for management decisions for bioenergy production. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 133-144, Mar. 2019. DOI: [10.1016/j.biombioe.2019.01.027](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.027).
- PINHEIRO, P. L.; RECOUS, S.; DIETRICH, G.; WEILER, D. A.; GIOVELLI, R. L.; MEZZALIRA, A. P.; GIACOMINI, S. J. Straw removal reduces the mulch physical barrier and ammonia volatilization after urea application in sugarcane. **Atmospheric Environment**, v. 194, p. 179-187, Dec. 2018. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2018.09.031](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.031).
- RAIJ, B. van; CAMARGO, O. A. de. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, v. 32, p. 223-231, 1973. DOI: [10.1590/S0006-87051973000100011](https://doi.org/10.1590/S0006-87051973000100011).
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Desenvolvimento de métodos de análises de solo: Impactos na agricultura brasileira. **O Agrônomo: Boletim Técnico-Informativo do Instituto Agrônomo**, 24 jun. 2017. Disponível em: <http://oagronomico.iac.sp.gov.br/?p=999>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- 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. atual. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundag, 1997. 285 p. (IAC. Boletim técnico, 100).
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ABREU, C. A. Os métodos de análise química do sistema IAC de análise de solo no contexto nacional. In: RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ABREU, C. A. de (ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. p. 5-39.
- REIN, T. A.; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos; SOUSA, D. M. G. de; CARVALHO, W. P. de; LEMES, G. de C. Corrective and maintenance phosphorus fertilization on sugarcane yield in Oxisols. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, p. 1-10, 2021. DOI: [10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02160](https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02160).
- REIN, T. A.; SOUSA, D. M. G. de. Sugarcane response to phosphorus sources and placement in a very clayey oxisol of the Brazilian Cerrado. **Proceedings of the International Society of Sugarcane Technologists**, v. 28, p. 477-485, 2013.
- REIN, T. A.; SOUSA, D. M. G. de; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G. dos; NUNES, R. de S.; KORNDÖRFER, G. H. **Manejo da adubação fosfatada para cana-de-açúcar no Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2015. 12 p. (Embrapa Cerrados. Circular técnica, 29).
- REIS, E. L.; CABALA-ROSAND, P. Respostas da cana-de-açúcar ao nitrogênio, fósforo e potássio em solo de tabuleiro do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, n. 2, p. 129-134, 1986.
- RESENDE, A. V. de; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; SANTOS, F. C. dos; KAPPES, C.; MOREIRA, S. G.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agrônomicas**, v. 156, p. 1-19, dez. 2016.
- 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: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 360 p.
- ROCHA, I. T. M.; BEZERRA, N. S.; FREIRE, F. J.; SOUZA, E. R. de; FREIRE, M. B. G. dos S.; OLIVEIRA, E. C. A. de; SIMÕES NETO, D. E. Aluminum buffering in acid soil under mineral gypsum application. **African Journal Agricultural Research**, v. 12, n. 8, p. 597-605, Feb. 2017. DOI: [10.5897/AJAR2016.12079](https://doi.org/10.5897/AJAR2016.12079).
- RODELLA, A. A. Métodos de análise de solo, tecido vegetal, vinhaça e torta de filtro. In: ORLANDO FILHO, J. (coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: Penalsucar, 1983. p. 351-368.
- SANTOS, H. L. dos; VASCONCELLOS, C. A. Determinação do número de amostras de solo para análise química em diferentes condições de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 97-100, 1987.
- SANTOS, R. L. dos; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, E. C. A. de; BARBOSA, J. de A.; MOURA, M. J. A. de; LOPES, N. R. da C.; COSTA, L. G. de A. F.; GUEDES, V. H. de F.; OLIVEIRA, D. M. de A.; SANTOS, M. B. da C. Sampling of sugarcane leaves in field experiments to determine the activity of nitrate reductase. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 1, p. 76-87, 2018. DOI: [10.1080/00103624.2017.1421648](https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1421648).
- SANTOS JUNIOR, P. R. de A.; RUIZ, J. G. C. L. Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar em função de adubação foliar com micronutrientes aditivados. **Science and Technology Innovation in Agronomy**, v. 3, n. 1, p. 163-170, dez. 2019.
- SCHOSSLER, T. R.; MANTOVANELLI, B. C.; ALMEIDA, B. G. de; FREIRE, F. J.; SILVA, M. M. da; ALMEIDA, C. D. G. C. de; FREIRE, M. B. G. dos S. Geospatial variation of physical attributes and sugarcane productivity in cohesive soils. **Precision Agriculture**, v. 20, p. 1274-1291, 2019. DOI: [10.1007/s11119-019-09652-y](https://doi.org/10.1007/s11119-019-09652-y).
- SCHULTZ, N. **Fixação biológica de nitrogênio associada à cultura de cana-de-açúcar: eficiência e contribuição da inoculação com bactérias diazotróficas**. 2012. 119 f. Tese. (Doutorado em Ciências) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

- SILVA, A. G. B.; SEQUEIRA, C. H.; SERMARINI, R. A.; OTTO, R. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: a meta-analysis. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 1, p. 1-13, Jan./Feb. 2017a. DOI: [10.2134/agronj2016.04.0200](https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0200).
- SILVA, A. P. M. da; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. de A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 38-43, jan. 2014. DOI: [10.1590/S1415-43662014000100006](https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000100006).
- SILVA, J. F. da; CARVALHO, A. M. de; REIN, T. A.; COSER, T. R.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q.; VIEIRA, D. L.; COOMES, D. A. Nitrous oxide emissions from sugarcane fields in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 246, p. 55-65, Aug. 2017b. DOI: [10.1016/j.agee.2017.05.019](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.019).
- SILVA, L. C. da; FREIRE, F. J.; MOURA FILHO, G.; OLIVEIRA, E. C. A. de; FREIRE, M. B. G. dos S.; MOURA A. B.; COSTA, J. V. T. da; REZENDE, J. S. Nutrient balance in sugarcane in Brazil: diagnosis, use and application in modern agriculture. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 14, p. 2167-2189, 2021. DOI: [10.1080/01904167.2021.1889591](https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1889591).
- SILVA, R. de C. F. da; SILVA, F. B. V. da; BIONDI, C. M.; NASCIMENTO, C. W. A. do; OLIVEIRA, E. C. A. de. Assessing the content of micronutrients in soils and sugarcane in different pedogeological contexts of northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, p. 1-15, 2019. DOI: [10.1590/18069657rbcS20180228](https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20180228).
- SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C. de; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. dos S.; OLIVEIRA, E. C. A. de; ROCHA, A. T. da. Adubação fosfatada para cana planta em solos representativos para o cultivo da espécie no Nordeste Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 1, p. 73-81, jan. 2015. DOI: [10.1590/S0100-204X2015000100008](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000100008).
- SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C. de; ROCHA, A. T. da; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S. dos; NASCIMENTO, C. W. A. do. Níveis críticos de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar em Pernambuco. **Revista Ceres**, v. 58, n. 6, p. 802-810, dez. 2011. DOI: [10.1590/S0034-737X2011000600018](https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000600018).
- SOLTANGHEISI, A.; WITHERS, P. J. A.; PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; ROSSETTO, R.; CARMO, J. B. do; ROCHA, G. C. da; MARTINELLI, L. A. Improving phosphorus sustainability of sugarcane production in Brazil. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 11, p. 1444-1455, Dec. 2019. DOI: [10.1111/gcbb.12650](https://doi.org/10.1111/gcbb.12650).
- TOMAZ, H. V. de Q. **Fontes, doses e formas de aplicação de fósforo na cana-de-açúcar**. 2009. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- VASCONCELOS, A. L. S.; CHERUBIN, M. R.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. E. P.; GMACH, M. R.; SIQUEIRA NETO, M. Greenhouse gas emission responses to sugarcane straw removal. **Biomass and Bioenergy**, v. 113, p. 15-21, June 2018. DOI: [10.1016/j.biombioe.2018.03.002](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.03.002).