

**INSTITUTO AGRONÔMICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO _
AGRICULTURA TROPICAL E SUBTROPICAL**

**ADUBAÇÃO FOLIAR COM MICRONUTRIENTES EM
CANA-PLANTA**

RAFAEL DE PAIVA ANDRADE

**Orientador: Dr. Estêvão Vicari Mellis
Co-orientador: Dr. Rafael Otto**

Dissertação submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Mestre** em Agricultura
Tropical e Subtropical, Área de Concentração
em Gestão de Recursos Agroambientais

Campinas-SP
2021

Ficha elaborada pela bibliotecária do Núcleo de Documentação Científica do Instituto Agrônômico

A553a Andrade, Rafael de Paiva
Adubação foliar com micronutrientes em cana-planta /
Rafael de Paiva Andrade. Campinas, 2021. 49 fls

Orientador: Estêvão Vicari Mellis

Co-orientador: Rafael Otto

Dissertação (Mestrado) Agricultura Tropical e Subtropical –
Instituto Agrônômico

1. Cana-de-açúcar 2. Nutrição de plantas 3. Fertilizantes
3. Bioenergia I. Mellis, Estêvão Vicari II. Otto, Rafael
III. Título

CDD 633.51



SECRETARIA DA AGRICULTURA E
ABASTECIMENTO AGÊNCIA PAULISTA DE
TECNOLOGIA DOS AGRONEGÓCIOS
INSTITUTO AGRONÔMICO
Pós-Graduação Agricultura Tropical e
Subtropical
Fone: (19) 2137.0659/2137.0601
Avenida Barão de Itapura, 1.481
13020-902 - Campinas, SP



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos 04 dias do mês de outubro de 2021, às 14:00 horas reuniu-se a Banca examinadora homologada pelo Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, composta pelos membros abaixo listados visando à defesa de dissertação de mestrado de Rafael de Paiva Andrade para obtenção do título de **"MESTRE"**, conforme **Processo SAA nº 1.133/2019**. A sessão presidida pelo Dr. Estevão Vicari Mellis, orientador do aluno, foi realizada em sessão pública aberta, síncrona, por videoconferência e transmitida via internet no canal do PPG-IAC. A sessão pública foi gravada e permanece em arquivo pelo tempo estabelecido pelo regimento do PPG-IAC para os devidos fins de comprovação. Iniciados os trabalhos, o candidato submeteu-se ao exame de sua dissertação, intitulada **"Adubação Foliar com micronutrientes em cana-planta"**. Terminado o exame, procedeu-se ao julgamento, cujo resultado foi o seguinte:

Dr. Estevão Vicari Mellis

aprovado (X) reprovado ()

Dra. Moniki Campos Janegtiz

aprovado (X) reprovado ()

Dr. Heitor Cantarella

aprovado (X) reprovado ()

Apurados os resultados, constatou-se que o(a) candidato(a) foi habilitado(a), fazendo jus, portanto, ao título de **"MESTRE EM AGRICULTURA TROPICAL E SUBTROPICAL"**, na área de concentração: **Gestão de Recursos Agroambientais**, do que, para constar, lavrou-se a presente ata, assinada pelo Presidente da Comissão Examinadora representando os demais membros da sessão remota.

Dr. Estevão Vicari Mellis

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre ter iluminado meu caminho e sem Ele nada teria sido possível e eu não chegaria aqui.

A toda a minha família, meus pai Ismael e Leandra Andrade, minha avó Edite Andrade e minha namorada Suellem Oliveira pela compreensão, apoio e incentivo, sem eles a caminhada seria mais árdua e mesmo estando distante muitas vezes, sempre estiveram presentes.

Ao Dr. Estêvão Vicari Mellis, pesquisador do IAC, pela oportunidade, orientação e ensinamentos transmitidos durante o curso.

Ao Dr. Rafael Otto por ser meu co-orientador e de ter proporcionado a oportunidade de fazer parte do PCEM/ESALQ-USP este grandioso projeto.

Ao Dr. Heitor Cantarella pelo apoio, ensinamentos e nossas conversas durante o curso.

A Dra. Moniki Campos Janegtiz, por me apresentar e estimular a carreira científica e ainda por ter me apresentado ao meu orientador.

Aos meus colegas de departamento, Lucas Ramos, Késia Lourenço, Bruna Oliveira, Diulie Morreira, Aryane Ferreira, Felipe Rodrigues, pelas companhias, pelos cafés, ensinamentos, amizade e companheirismo.

Aos meus amigos de longa data pelo incentivo e apoio prestado, e também ao meu amigo de república e amigo de vida Leandro Gonzaga, muito obrigado pelos momentos compartilhados, a ajuda e o incentivo.

A todos os grupos sucroalcooleiros que compõem o PCEM por terem contribuído com meu projeto de pesquisa, assim como para meu crescimento profissional e pessoal.

Ao Instituto Agrônômico (IAC), por meio do programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Centro de Solos do IAC, seus colaboradores, pesquisadores, funcionários e pós-graduandos que me receberam de braços abertos, local e pessoas com quem convivi a maior parte dos últimos dois anos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

A todos vocês, apresento o meu profundo agradecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Hipóteses.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivos específicos.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 Importância econômica e expansão de área de cultivo.....	2
2.2 Extração e exportação de micronutrientes em cana-de-açúcar.....	3
2.3 Funções e sintomas de deficiência de micronutrientes em cana-de-açúcar.....	4
2.4 Níveis críticos do solo e foliares de micronutrientes para a cana-de-açúcar...7	
2.5 Respostas da cana-de-açúcar à aplicação de micronutrientes.....	8
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1 Caracterização das áreas experimentais.....	13
3.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	15
3.3 Caracterização das áreas experimentais.....	14
3.4 Variáveis analisadas.....	16
3.4.1 Teor foliar de micronutrientes.....	16
3.4.2 Qualidade industrial e produtividade.....	17
3.5 Análise estatística.....	18
4 RESULTADOS.....	18
4.1 Produtividade e qualidade industrial.....	19
4.2 Diagnose Foliar.....	21
4.3 Análise conjunta dos dados.....	24
4.4 Análise de Viabilidade Econômica.....	30
5 DISCUSSÃO.....	31
6 CONCLUSÕES.....	40
7 REFERÊNCIAS.....	40
ANEXOS.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Localização, tipos de solo, clima, precipitação, temperatura, ambientes de produção e variedades de cana-de-açúcar nos sete experimentos.....	12
Tabela 2. Descrição das práticas corretivas e de adubações realizadas em cada local experimental.....	12
Tabela 3. Caracterização química dos solos das áreas experimentais em amostras coletadas antes da instalação dos experimentos.....	14
Tabela 4. Teores de macro e micronutrientes na folha diagnóstica da cana-de-açúcar para caracterização das áreas experimentais.....	15
Tabela 5. Descrição dos tratamentos aplicados.....	16
Tabela 6. Descrição das datas em que foram realizadas as coletas de dados.....	16
Tabela 7. Produtividade de colmos e qualidade industrial em função da aplicação foliar de micronutrientes na cana planta em cada local estudado.....	20
Tabela 8. Correlação linear simples entre os teores foliares de micronutrientes e nitrogênio e os parâmetros de produtividade e qualidade industrial por local.....	24
Tabela 9. Correlação linear simples entre os teores foliares e os parâmetros de produtividade e qualidade industrial avaliados, média de todos os locais.....	30
Tabela 10. Viabilidade econômica em função da aplicação foliar de micronutrientes e nitrogênio na cana-planta. Análise combinada dos resultados de 7 locais.....	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Valores de precipitação acumulada mensalmente (mm), temperaturas máximas e mínimas (°C) no período experimental na cultura da cana planta. A) Ivinhema-MS; B) Assis-SP; C) Marapoama-SP; D) São Joaquim da Barra-SP; E) Ribeirão Preto-SP e F) Ipaussu-SP. Valores médios obtidos das estações agrometeorológicas do IAC/APTA e INMET.....	13
Figura 2. A) Concentração de B; B) Concentração de Cu; C) Concentração de Mn; D) Concentração de Mo; E) Concentração de Zn e F) Concentração de N na folha diagnóstica da cana-planta em função da aplicação foliar de micronutrientes e nitrogênio, em cada local estudado. Barras dentro dos locais = Desvio padrão. Médias seguidas por letras iguais não se diferenciam pelo teste-t (LSD) ($p < 0,10$). ^{ns} = Não significativo.....	23
Figura 3. Produção de colmos (TCH) em função da aplicação foliar de micronutrientes e nitrogênio na cana-planta. Análise conjunta dos resultados de 7 locais.....	25
Figura 4. Açúcar total recuperável (ATR) em função da aplicação foliar de micronutrientes e nitrogênio na cana-planta. Análise conjunta dos resultados de 7 locais.....	26
Figura 5. Produtividade de açúcar por hectare (TAH) em função da aplicação foliar de micronutrientes e nitrogênio. Análise conjunta dos resultados de 7 locais.....	27
Figura 6. A) Concentração de B; B) Concentração de Cu; C) Concentração de Mn; D) Concentração de Mo; E) Concentração de N e F) Concentração de Zn na folha diagnóstica da cana-planta em função da aplicação foliar de micronutrientes e nitrogênio. Médias seguidas por letras iguais não se diferenciam pelo teste-t (LSD) ($p < 0,10$). ^{ns} = Não significativo.....	28
Figura 7. Detalhes do preparo das garrafas com as soluções contendo os tratamentos para as aplicações.....	47
Figura 8. Aplicação dos tratamentos nas parcelas e o detalhe nas folhas aplicadas.....	47
Figura 9. Comparativo de altura das plantas no dia da instalação em diferentes áreas.....	47
Figura 10. Amostragem de solo na área experimental.....	48
Figura 11. Amostragem foliar na área experimental.....	48
Figura 12. Lavagem, escorrimento e secagem das folhas em laboratório.....	48
Figura 13. Amostragem de colmos de colmos para análise de qualidade industrial.....	49
Figura 14. Detalhes da colheita mecanizada das parcelas.....	49

Adubação foliar com micronutrientes em cana-planta.

RESUMO

O Brasil é o principal produtor mundial de cana-de-açúcar, porém a produtividade média da cultura apresenta valores baixos, em torno de 76 t ha^{-1} e necessita de esforços na área de manejo para que haja incrementos de produtividade. Dentre os diversos fatores que afetam a produtividade, a deficiência de micronutrientes merece destaque. Pesquisas recentes indicam respostas positivas para altas doses aplicadas via solo, porém, devido às dificuldades do fornecimento desses nutrientes nessa forma, muitos produtores têm optado pela aplicação via foliar. No entanto, são escassas as pesquisas científicas validando a aplicação foliar de micronutrientes em cana-de-açúcar no Brasil. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da aplicação foliar de micronutrientes na nutrição, produtividade e qualidade industrial da cana planta cultivada em diferentes ambientes de produção. Para isso, foi conduzida uma rede de experimentos, em 7 locais na região Centro-Sul do Brasil, na safra 2018/2019. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, com 9 tratamentos e 5 repetições. Os tratamentos empregados foram: Controle (sem micronutrientes), Zn ($0,70 \text{ kg ha}^{-1}$), Cu ($0,35 \text{ kg ha}^{-1}$), Mn ($1,00 \text{ kg ha}^{-1}$), B ($0,30 \text{ kg ha}^{-1}$), Mo ($0,30 \text{ kg ha}^{-1}$), N ($10,00 \text{ kg ha}^{-1}$), Completo - N (todos os micronutrientes sem nitrogênio) e Completo + N. Os experimentos foram instalados entre dezembro de 2018 a janeiro de 2019, quando as plantas apresentavam cerca de 1,5 m de altura. Foram avaliados os efeitos da adubação, na nutrição, na produtividade de colmos por hectare (TCH) e qualidade industrial (açúcar total recuperável, ATR e toneladas de açúcar por hectare, TAH) da cana-planta. Foi realizada a análise estatística por local e conjunta dos dados por meio de análise de variância e posterior comparação de médias pelo teste t (LSD) a 10% de probabilidade. As respostas variaram de acordo com os locais. Houve incremento nos teores foliares de todos os micronutrientes estudados em relação ao tratamento controle. As aplicações isoladas de B e Mn proporcionaram aumento no TCH em 4,2% e 4,3%. O ATR, aumentou 1,6% com a aplicação do tratamento Completo - N, diferindo do tratamento controle. Os tratamentos utilizando B e Mn isolados resultaram no aumento do TAH em 3,6% e 2,1%. Nas condições estudadas pode-se concluir que: a aplicação isolada de B e Mn aumenta a produtividade por área e a qualidade industrial da cana-planta, enquanto que a aplicação de Mo diminui o TCH e ainda a aplicação isolada de B, Mn e Zn na fase de máximo desenvolvimento da cana-planta resultou em ganhos econômicos de R\$ 368,02; R\$ 222,64 e R\$ 108,92. Embora essa prática possa ser recomendada para os produtores, faz-se necessário estudos de doses e épocas de aplicação, para gerar recomendações de aplicação de micronutrientes via foliar mais sustentáveis.

Palavras-chave: *Saccharum spp* L., Nutrição de plantas, Fertilizantes, Bioenergia.

Foliar fertilizer with micronutrients in plant cane

ABSTRACT

Brazil is the main producer of sugarcane in the world, however, the average productivity of the crop has low values, around 76 t ha⁻¹ and demands efforts regarding management in order to increase productivity. Amidst the several factors that affect the sugarcane yield, micronutrient deficiency stands out the most. Recent studies show positive responses to high doses being applied via soil, however, due to the difficulties of supplying these nutrients in this form, many producers have been opting for foliar application. Nevertheless, scientific researches that validate foliar spray of micronutrients are scarce. This aim of this study to evaluate the effect of micronutrients foliar spray on nutrition, productivity and industrial quality of the plant-cane grown in different production environments. For this, a net of experiments was performed in 7 sites in the Center-South region of Brazil, during the 2018/2019 harvest. The experimental design consisted of randomized blocks with 9 treatments and 5 replicates. The treatments used were as follows: Control (without micronutrients), Zn (0.70 kg ha⁻¹), Cu (0.35 kg ha⁻¹), Mn (1.00 kg kg ha⁻¹), B (0.30 kg ha⁻¹), Mo (0.30 kg ha⁻¹), N (10.00 kg ha⁻¹), Complete - N (all micronutrients without nitrogen) and Complete + N. The experiments were set between December 2018 and January 2019. The effects of micronutrients fertilizer on nutrition, stalk yield (SY) and industrial quality (total recoverable sugar (TRS) and tons of sugar per hectare (TSH) of the plant-cane were evaluated. Statistical analysis was performed by sites and data set through analysis of variance and subsequent comparison of means by the t test (LSD) at 10% probability. Responses have varied by sites. There has been an increase in all micronutrients foliar contents in relation to the control treatment. Isolated applications of B and Mn have resulted in an increase of 4,2% and 4,3% on the SY. TRS has increased in 1,6% due to the application of Complete - N treatment, which has differed from control treatment. Treatments that used isolated B and Mn have resulted in an increase of 3,6% and 2,1% on the TSH. Under the investigated conditions, the possible conclusion is as follows: the isolated application of B and Mn increases the yield and the industrial quality of the cane-plant, while the application of Mo decreases the SY, besides, the isolated application of B, Mn and Zn in the highest growth phase of the plant-cane provided profits of BRL 368.02; BRL 222.64 and BRL 108.92. Even though this procedure can be recommended for producers, research on doses and times to micronutrients foliar spray are still necessary for recommendations of micronutrients foliar application can be more security and sustainable.

Keywords: *Saccharum spp* L., Plant nutrition, Fertilizers, Bioenergy.

1 INTRODUÇÃO

Apesar do Brasil ser considerado o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, a produtividade média da cultura em torno de 76 t ha⁻¹ (CONAB, 2020), ainda é baixa e pode ser melhorada. Um dos principais motivos decorrentes para essa baixa produtividade, é a expansão da cultura em ambientes menos favoráveis, onde predominam solos de baixa fertilidade natural ou desgastados pelo uso intensivo (Bordonal et al. 2018).

Para o bom desenvolvimento e crescimento, bem como para a produção de açúcar e etanol de boa qualidade e em quantidade suficiente para tornar o seu processamento industrial economicamente viável, a cana-de-açúcar necessita de um adequado suporte nutricional. Dessa forma, os solos cultivados com cana-de-açúcar têm exigido manejo mais adequado da fertilidade.

Embora, a maioria dos produtores brasileiros façam um bom manejo nutricional, incluindo calagem, adubação nitrogenada, fósforo, potássio e rotação de culturas, o fornecimento adequado de micronutrientes tem sido negligenciado. Portanto, o manejo adequado de micronutrientes, apresenta alto potencial para se elevar a produtividade da cultura.

Apesar de pesquisas recentes indicarem elevadas respostas da cana-de-açúcar à adubação com micronutrientes, utilizando doses mais altas que as recomendadas (Mellis et al. 2016), a adoção dessa prática pelos produtores ainda é baixa. Isso se deve principalmente a dificuldades de aplicação dessas dosagens, que requerem a utilização de novas tecnologias que tornam o rendimento operacional mais lento.

Diante disso, tem se encontrado no mercado diversos produtos contendo soluções multielementares que contém micronutrientes para aplicação foliar, porém, estudos sobre os impactos deste tipo de aplicação na produtividade e qualidade industrial da cana-de-açúcar ainda são muito escassos e pouco conclusivos, o que evidencia a necessidade de mais pesquisas que definam a eficiência dessa técnica para a cana-de-açúcar.

1.1 Hipóteses

- A aplicação foliar irá aumentar a concentração de micronutrientes na folha diagnóstica da cana-de-açúcar;
- A aplicação conjunta com nitrogênio, irá potencializar a absorção de micronutrientes pelas folhas de cana-de-açúcar;

- A produtividade e a qualidade industrial de colmos irá aumentar com a aplicação foliar de micronutrientes.

1.2 Objetivos

Avaliar o efeito da aplicação foliar dos micronutrientes B, Cu, Mn, Mo e Zn aplicados de forma isolada, todos associados e todos associados com N na nutrição, na produtividade e qualidade industrial da cana-planta cultivada em diferentes ambientes de produção.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar se a aplicação de micronutrientes via foliar na época de maior desenvolvimento vegetativo aumenta a concentração desses, no tecido foliar da cana-de-açúcar;
- Avaliar qual micronutriente aplicado via foliar irá aumentar a produção de colmos e a qualidade industrial na cana-planta;
- Avaliar se a aplicação associada de micronutrientes é mais eficiente que a aplicação isolada em cana-planta;
- Avaliar se a aplicação associada de micronutrientes com N é mais eficiente que a aplicação associada sem N.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância econômica e expansão de área de cultivo

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas produzidas no Brasil e tem alto impacto na economia nacional, sendo que o setor sucroenergético gera um PIB de cerca de 156 bilhões de reais anualmente (UDOP, 2020). A área cultivada no país chegou a 10.039,1 milhões de hectares, sendo que na safra 2019/2020, foram produzidos 642,7 milhões de toneladas de cana, 29,8 milhões de toneladas de açúcar e 34 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2020). O Centro-Sul é a maior região produtora da cultura no Brasil, correspondendo aos estados São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Paraná, Mato Grosso, Rio de Janeiro e Espírito Santo, sendo eles responsáveis por 589,9 mil toneladas (CONAB, 2020). Mesmo com este alto volume produzido e ainda que crescente, a produtividade média nacional de 76 t ha⁻¹

(CONAB, 2020), pode ser considerada baixa se comparada ao potencial genético das variedades disponíveis, e pode ser melhorada.

Um dos fatores responsáveis pela baixa produtividade da cultura, é a expansão crescente das áreas de cultivo em ambientes de produção mais restritivos, onde predomina solos arenosos e de baixa fertilidade (Bordonal et al. 2018). Além disso, o fato da intensificação do cultivo da cana-de-açúcar no mesmo solo por longos períodos, pode provocar o esgotamento do reservatório de nutrientes do solo, especialmente de micronutrientes. Fato esse ainda mais recorrente devido ao uso cada vez mais constante, de formulações de fertilizantes químicos mais concentradas, que não repõe os micronutrientes exportados pela cultura (Orlando Filho et al. 2001).

Para que a cana-de-açúcar produzida nesses ambientes de produção mais restritivos seja viável economicamente e mais sustentável, é necessário que se faça um bom manejo do solo, com calagem, gessagem, adubação com macronutrientes, adubação verde, rotação de culturas e adubação com micronutrientes (Mellis et al. 2018).

2.2 Extração e exportação de micronutrientes em cana-de-açúcar

Os micronutrientes apesar de exigidos em pequenas quantidades, são essenciais para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, sendo diretamente responsáveis pela ativação enzimática, crescimento celular, desenvolvimento radicular e perfilhamento, assimilação do nitrogênio, respiração e fotossíntese, além de aumentar a resistência a pragas e doenças, entre outras funções (Mellis et al. 2018).

Embora a importância dos micronutrientes seja mundialmente conhecida, a deficiência de micronutrientes limita a produtividade da cana-de-açúcar em diversas regiões produtoras no mundo (Mellis et al. 2016). A alta incidência de deficiência de micronutrientes, deve-se principalmente ao uso de fertilizantes com baixos níveis de micronutrientes, que aumentam a produtividade agrícola, e consequentemente a extração e exportação desses nutrientes sem a devida reposição, à diminuição dos níveis de matéria orgânica do solo, ao aumento do cultivo em áreas com solos de baixa fertilidade, e a redução da aplicação de resíduos orgânicos nas áreas cultivadas (Fageria et al. 2002).

Diante disso, tem sido comum a observação de deficiência de micronutrientes em áreas de expansão de cultivo em solos brasileiros, especialmente em regiões com solos arenosos no estado de São Paulo e no Cerrado brasileiro (Mellis et al. 2018).

A quantidade de nutrientes extraídos e acumulados pela cana-de-açúcar depende da variedade, idade da planta, do manejo do solo, do ciclo da cultura e da disponibilidade dos nutrientes no solo (Benett et al. 2012; Benett et al. 2013).

Apesar da importância dos micronutrientes para a cana-de-açúcar, há carência de informações sobre exportação desses nutrientes pelas variedades utilizadas no Brasil (Prado et al. 2002). A exportação de micronutrientes pela cana-de-açúcar se dá na seguinte sequência de grandeza: Fe>Mn>Zn>Cu>B>Mo (Orlando Filho et al. 2001).

Segundo Malavolta (1981), para uma produção de 100 t ha⁻¹ da variedade SP81-3250, é extraída uma quantidade de micronutrientes na ordem de 5300 g de Fe, 1500 g de Mn, 220 g de Zn, 130 g de B, 60 g de Cu e 1,6 g de Mo, porém esta variedade já não é muito utilizada atualmente.

Mesmo que as quantidades extraídas de micronutrientes sejam pequenas, estes podem proporcionar grandes limitações à produtividade da cana-de-açúcar no Brasil sendo o Cu, Zn, B, Mn e Mo os grandes limitantes (Orlando Filho et al. 1994; Mellis et al. 2008). Para os cultivos de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, não há registro de deficiência de Cl (Abreu e Raij 1997), até mesmo porque uma das fontes de potássio mais utilizadas é o cloreto de potássio. Em algumas áreas de cana-soca cultivadas em solos argilosos pode ocorrer a deficiência de Fe, ocasionada pela baixa translocação deste nutriente para os novos brotos que estão em formação, todavia ao decorrer do crescimento do sistema radicular é sanada esta deficiência (Orlando Filho 1982).

Uma deficiência de micronutrientes pode acarretar reduções de produtividade e inclusive a morte de plantas, pois estas são as consequências naturais decorrentes de desarranjos nos processos metabólicos, mesmo que as quantidades requeridas dos micronutrientes sejam relativamente baixas se comparada as dos macronutrientes, estas pequenas quantidades desempenham papel crucial no desenvolvimento das plantas (Gonçalves et al. 2013).

Um fato que deve ser ressaltado sobre a cana-de-açúcar é que ela apresenta regularmente um fenômeno denominado de “fome oculta” em relação aos micronutrientes, a planta possui uma deficiência nutricional, que é um fator limitante economicamente a sua produtividade, porém ela não apresenta sintomas característicos visíveis da deficiência, embora produtividade limitada possa ser um sintoma (Orlando Filho et al. 2001).

2.3. Funções e sintomas de deficiência de micronutrientes em cana-de-açúcar

O B é absorvido pelas plantas como ácido bórico H_3BO_3 , e exerce uma função importante no metabolismo de carboidratos, na translocação e acúmulo de açúcares (Dechen et al. 2018). Além disso, atua diretamente na divisão, maturação e diferenciação celular, na lignificação da parede celular dos vegetais e inibição da formação do amido pela combinação do B com o local ativo da fosforilase, ocasionando o impedimento da polimerização excessiva nos locais de síntese dos açúcares (Sobral e Weber 1983). Esse micronutriente exerce um papel importante no crescimento e formação de raízes, que influencia diretamente o perfilhamento da cana-de-açúcar (Mellis et al. 2018).

A mobilidade do B na planta é considerada intermediária (Marschner 2012), devido a isto, os sintomas de sua deficiência aparecem nas folhas mais novas. Quando há ocorrência de deficiência de B em cana-de-açúcar, gera um comprometimento do meristema apical, resultando em folhas novas e imaturas retorcidas, com pregas e vincos, e ainda com tendência do estreitamento da região do cartucho (Sobral e Weber 1983). Quando a planta está em estado avançado de deficiência, a planta apresenta um desenvolvimento retardado, podendo secar suas folhas e levar a morte (Sultanum 1972).

O Cu é absorvido pelas plantas na forma divalente (Cu^{2+}) (Dechen et al. 2018). O Cu tem uma importante função na cana-de-açúcar, pois pode atuar como fungicida e bactericida dependendo da fonte e dose utilizada (Carvalho et al. 2012). Este micronutriente atua em diversas enzimas, tais como, polifenoxilidase, fenolase, lacase, entre outras. Participa dos processos de lignificação e da fotossíntese, no transporte de elétrons via plastocianina e no metabolismo de carboidratos, lipídeos e nitrogênio (Taiz e Zeiger 2004).

Na planta, o Cu é considerado um elemento de mobilidade intermediária, o que resulta em sintomas de sua deficiência nas folhas mais novas (Marschner 2012). Nas plantas deficientes deste nutriente, as folhas mais novas tornam-se cloróticas e murchas, havendo o envergamento excessivo da lâmina foliar, podendo ocasionar a quebra. Um outro sintoma que pode ocorrer devido a perda de turgidez, é a quebra do colmo e do meristema, o qual ocasiona a quebra do ponteiro, sendo este fenômeno conhecido como “topo caído” ou “droopy top”. Em casos mais severos de deficiência desse micronutriente, pode ocorrer o aparecimento de manchas verdes nas lâminas foliares descoloridas (Sobral e Weber 1983; Orlando Filho et al. 2001).

O Mn é absorvido pelas plantas como Mn^{2+} (Dechen et al. 2018), e desempenha funções indispensáveis às plantas. Dentre as funções se destacam a ativação de enzimas, na formação, multiplicação e funcionamento dos cloroplastos e na síntese da clorofila. Este micronutriente também atua nos compostos cíclicos, como precursor de aminoácidos,

hormônios, fenóis e ligninas e no metabolismo do nitrogênio (Melarato et al. 2002). Na fotossíntese, o Mn atua como um doador de elétrons para o fotossistema II (Marschner 1995).

Os sintomas de deficiência de Mn ocorrem inicialmente nas folhas mais novas, devido a esse micronutriente apresentar baixa mobilidade nas plantas (Marschner 2012). Normalmente a deficiência de Mn é vista em canaviais cultivados em solos arenosos que são muito lixiviados, ou que foram indevidamente corrigidos com excesso de calcário (Sultanum 1972). As plantas deficientes de Mn apresentam estrias cloróticas longitudinais nos espaços internervais, do meio para a ponta das folhas, podendo causar o fendilhamento (Sobral e Weber 1983; Orlando Filho et al. 2001).

O Mo é absorvido na forma aniônica, MoO_4^{2-} (Reisenauer 1963) e tem grande importância para a cana-de-açúcar, estando estreitamente relacionado com o metabolismo e fixação biológica do N (Sobral e Weber 1983). As enzimas que contêm o Mo são poucas, porém possuem funções essenciais às plantas, como as catalíticas que possuem função estrutural e as enzimas que estão diretamente relacionadas as reações de oxido-redução do metabolismo do N, como a redutase do nitrato, nitrogenase e a xantina oxidase/dehidrogenase (Marschner 1995). Sendo assim, uma deficiência de Mo pode impactar diretamente no metabolismo de N e limitar a produtividade da cultura (Silva et al. 2018). Existe uma facilidade na mobilidade do Mo na planta, tanto no xilema, como no floema (Kannan e Ramani 1978; Kaiser et al. 2005). Os sintomas característicos da deficiência de Mo são difíceis de serem encontrados. As plantas deficientes, apresentam estrias cloróticas longitudinais, as quais se iniciam no terço apical das folhas mais velhas, devido a sua mobilidade na planta. Em estados mais avançados, a deficiência de Mo provoca o secamento prematuro das folhas do meio para o ápice das plantas, tornando os colmos mais finos e curtos (Orlando Filho et al. 2001). Geralmente, a deficiência de Mo níveis mais baixos de açúcares e de ácido ascórbico (Sobral e Weber 1983).

O Zn é absorvido pelas plantas principalmente na forma divalente (Zn^{2+}) (Dechen et al. 2018). Dentre os micronutrientes, o Zn vem se destacando por apresentar frequentemente deficiência em áreas de cana-de-açúcar. Este micronutriente afeta diretamente o perfilhamento e o crescimento da cana-de-açúcar. (Mellis et al. 2018).

Participando na síntese do triptofano, do qual é precursor do AIA, o Zn se destaca devido ser diretamente o responsável pelo alongamento celular (Marschner 1995). Por ser um elemento de mobilidade intermediária na planta (Marschner 2012) sua deficiência ocorrerá primeiro nas folhas mais novas. Quando a cana-de-açúcar está com deficiência de Zn, ela irá apresentar estrias cloróticas na lâmina foliar. Em casos mais severos, ocorre necrose das folhas,

a partir das pontas, o encurtamento dos internódios do colmo, colmos mais finos e que podem perder a turgidez (Sultanum 1972; Sobral e Weber 1983; Orlando Filho et al. 2001). Há relatos também de maior incidência de ferrugem e podridão vermelha em canaviais australianos com baixos teores de Zn na folha (Reghenzani 1990).

2.4 Níveis críticos do solo e foliares de micronutrientes para a cana-de-açúcar

Na literatura são poucos os trabalhos disponíveis que objetivam estabelecer um nível crítico de micronutrientes no solo para a cultura da cana-de-açúcar. Dados reunidos por Cantarella et al. (1998) com base em resultados de Raij et al. (1996), evidenciam limites considerados baixos para os micronutrientes disponíveis no solo, sendo eles iguais ou menores a 0,2; 4; 1,2 e 0,5 mg dm⁻³ para Cu, Fe, Mn e Zn respectivamente, extraídos por DTPA e de 0,2 mg dm⁻³ para B extraído em água quente.

Os teores foliares de micronutrientes considerados como críticos para a cultura da cana-de-açúcar pode variar de acordo com a variedade, tipo de solo, época de amostragem e interações entre os nutrientes (Orlando Filho e Zambello Junior 1977; Orlando Filho e Zambello Junior 1983).

Um levantamento contemplando 32 municípios do Estado de São Paulo realizado por Gallo et al. (1968) avaliando os teores foliares de micronutrientes nas variedades Co. 419 e CB 41-76, nas folhas +3, aos 9 meses de idade, obtiveram os seguintes teores: 16 a 18 mg kg⁻¹ de Zn, 4 a 8 mg kg⁻¹ de Cu, 50 a 100 mg kg⁻¹ de Mn, 10 a 25 mg kg⁻¹ de B, 0,03 a 0,08 mg kg⁻¹ de Mo e 100 a 200 mg kg⁻¹ de Fe. Com a análise desses resultados os autores consideraram como níveis críticos, os seguintes níveis: 6,5; 2,7; 22; 3; 0,02 e 70 mg kg⁻¹ para Zn, Cu, Mn, B, Mo e Fe. Essas variedades já não são mais cultivadas no Estado de São Paulo.

Em uma publicação de Malavolta et al. (1997) há uma recomendação para que sejam amostradas as folhas +3 e +1 de acordo com o sistema de ordenação de Kuijper descrito por Clements (1980) e que essas folhas sejam coletas 4 meses após a emergência da cultura ou rebrota. Essa recomendação ainda afirma que as folhas devem ser cortadas em três partes e utilizada a parte mediana e descartando a nervura central para consecutiva realização da diagnose foliar em cana-de-açúcar. Malavolta et al. (1997), consideraram como teores adequados de micronutrientes nas folhas +3 e +1 as seguintes faixas: 25 a 50 mg kg⁻¹ de Zn; 8 a 10 mg kg⁻¹ de Cu; 100 a 250 mg kg⁻¹ de Mn; 15 a 50 mg kg⁻¹ de B; 0,15 a 0,30 mg kg⁻¹ de Mo e 200 a 500 mg kg⁻¹ de Fe.

Para o Estado de São Paulo, Spironello et al. (1996) recomendam a amostragem da folha +1, seguindo o sistema de ordenação de Kuijper, descrito por Clements (1980), porém na fase de maior desenvolvimento vegetativo da cultura, conservando os 20 cm centrais da folha e excluindo a nervura central para a realização da diagnose foliar. Segundo esses autores, as faixas de teores de micronutrientes consideradas adequadas para a cana-de-açúcar são: 10 a 50 mg kg⁻¹ para o Zn; 6 a 15 mg kg⁻¹ para o Cu; 25 a 250 mg kg⁻¹ para o Mn; 10 a 30 mg kg⁻¹ para o B; 0,05 a 0,20 mg kg⁻¹ para o Mo e 40 a 250 mg kg⁻¹ para o Fe.

2.5 Respostas da cana-de-açúcar à aplicação de micronutrientes

Embora a importância da utilização de micronutrientes para as culturas seja mundialmente reconhecida, os resultados de pesquisas envolvendo a cana-de-açúcar ainda são insuficientes e até mesmo pouco conclusivos.

A maioria das pesquisas realizadas avaliaram o efeito da aplicação de micronutrientes no solo, sendo que grande parte desses estudos não apresentaram aumentos significativos na produtividade e qualidade industrial da cana-de-açúcar, especialmente em solos tropicais brasileiros (Alvarez e Wutke 1963; Siqueira et al. 1979; Alvarez et al. 1979; Andrade et al. 1995; Costa Filho e Prado 2008; Farias et al 2009; Franco et al. 2011 e Nicchio et al. 2020). Em contrapartida outros estudos demonstraram ganhos significativos em produtividade com a aplicação de micronutrientes (Marinho e Albuquerque 1981; Cambria et al. 1989; Malavolta, 1990; Korndörfer et al.; 1995; Mellis et al. 2016).

Mellis et al. (2016) avaliaram o efeito da aplicação de doses mais altas que as recomendadas no sulco de plantio, em 11 locais, com diferentes tipos de solo no Estado de São Paulo, na maioria solos arenosos de baixa fertilidade natural, e verificaram efeito significativo na produção de colmos com a aplicação de micronutrientes via solo, especialmente para Zn, Mo e Mn. Além de promover ganhos na cana-planta essas doses mais altas aplicadas no sulco de plantio é capaz de aumentar a produtividade das soqueiras, devido ao efeito residual.

Apesar de ser evidente a vantagem de se aplicar doses mais altas de micronutrientes na cultura da cana-de-açúcar como relatado anteriormente, na prática a aplicação dessas, apresentam uma série de dificuldades, principalmente operacionais, fazendo com que a adoção dessa tecnologia ainda seja baixa pelos produtores.

Uma alternativa que tem sido utilizada na prática, é a aplicação foliar de micronutrientes em cana-de-açúcar. Segundo Lira (2018), a disponibilização de micronutrientes às plantas, por meio de adubação foliar, por solução ou suspensão na parte aérea da planta,

resultará em plantas bem mais nutridas, podendo também, refletir de forma positiva na produção das culturas, porém são escassos os resultados de pesquisas utilizando esta técnica em cana-de-açúcar (Vitti e Mazza 2002).

Embora a aplicação foliar apresente algumas desvantagens em relação à aplicação via solo, bem como não proporcionar efeito residual em cortes consecutivos, a aplicação via foliar, permite uma distribuição mais uniforme dos micronutrientes, menor taxa de aplicação e resposta imediata da planta ao fertilizante aplicado (Jabran et al. 2011).

Azeredo e Bolsanello (1981) estudaram através de uma rede de experimentos, o efeito de Zn, B, Cu, Mn e Mo, aplicados de forma isolada e conjunta, via solo e foliar, com e sem calagem, nos estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e Espírito Santo. Foram empregados os seguintes tratamentos: uma aplicação via solo de 8,75 kg ha⁻¹ de Zn; 3,0 kg ha⁻¹ de B; 10,5 kg ha⁻¹ de Cu; 5,0 kg ha⁻¹ de Mn e 0,39 kg ha⁻¹ de Mo, e duas aplicações via foliar das seguintes concentrações, 1% de Zn e Cu; 1,5 % de B; 2,0 % de Mn e 0,02% de Mo. Os autores verificaram respostas positivas da cana-de-açúcar para a aplicação de Mn no tratamento sem aplicação de calcário em Minas Gerais, chegando a um aumento de 27% na produtividade da cana-planta, e para Mo um aumento de 10% na produtividade no tratamento com presença de calcário em um dos experimentos conduzidos no Rio de Janeiro. Além disso, de maneira geral, os autores não observaram diferenças entre as formas de aplicação dos micronutrientes, indicando que a aplicação via foliar pode ser tão eficiente quanto a aplicação via solo.

Estudos conduzidos por Crusciol et al. (2021) aplicando os micronutrientes, B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn (1,1; 4,0; 4,0; 5,2; 0,2 e 5,0 kg ha⁻¹) aplicados separadamente ou todos juntos no sulco de plantio encima do tolete combinado ou não com a utilização de torta de filtro em dois diferentes solos um Latossolo Vermelho e um Neossolo Quartzarenico típico, com ou sem torta de filtro a cultura respondeu positivamente nas três safras avaliadas a aplicação de micronutrientes no sulco de plantio aumentando o teor foliar dos micronutrientes e resultou em ganhos de até 10 t ha⁻¹ e 2 t ha⁻¹ em relação ao controle para toneladas de colmo e açúcar. Os autores ainda concluíram que a aplicação de micronutrientes no sulco de plantio foi capaz de proporcionar efeito residual na soca, com altas respostas à aplicação de B e Zn.

Vieira (2015) estudando a aplicação de diferentes doses de Mo (0,3; 0,6; 1,2 e 2,4 kg ha⁻¹), por meio de duas formas de aplicação, no sulco de plantio e foliar em dois locais do Estado de São Paulo, independentemente da forma aplicada observou aumentos significativos na produtividade de colmos, podendo chegar a 8,2% e 5,4%. Isso nos mostra que a aplicação via foliar de Mo pode ser uma alternativa para a aplicação desse elemento na cana-de-açúcar.

Pesquisa realizada por Nicchio et al. (2020) estudando a aplicação foliar de micronutrientes e nitrogênio e também doses de um fertilizante foliar misto + nitrogênio (B, Zn, Mn e N nas doses 0,2; 0,3; 0,3 e 5,0 kg ha⁻¹ e Fertilizante Micro Foliar + N-Foliar nas doses de 1,0 kg ha⁻¹ + 3,0 L ha⁻¹; 2,0 kg ha⁻¹ + 6,0 L ha⁻¹ e 3,0 kg ha⁻¹ + 10,0 L ha⁻¹) em três locais diferentes e foram aplicados no máximo crescimento vegetativo. Com a aplicação desses tratamentos os autores não obtiveram resposta significativas para a produção de colmos e de açúcar.

Queiroz et al. (2004), estudaram o efeito de aplicações foliares de micronutrientes em cana soca, na região de Piracicaba-SP, em um solo arenoso cultivado com a variedade RB 855156, utilizando como fonte óxidos micronizados em suspensão. As aplicações foliares foram realizadas aos 110 dias após o corte da cana-de-açúcar, quando esta apresentava aproximadamente 1,1 m, utilizando-se volume de solução de 300 L ha⁻¹. Os autores concluíram que a aplicação de 675 g ha⁻¹ de Zn não interferiu nos teores foliares de macro e micronutrientes, produtividade e atributos tecnológicos da cana-de-açúcar, nas condições estudadas.

Em contrapartida, alguns trabalhos utilizando micronutrientes nas aplicações foliares apresentaram respostas positivas nos EUA e Paquistão. Wang et al. (2005), aplicando as doses de 0; 4,4; 8,9; 17,9; e 33,8 kg ha⁻¹ no sulco de plantio e 1,3 kg ha⁻¹ via foliar de sulfato de Zn em solos ácidos e calcários dos Estados Unidos da América, obtiveram incrementos na produção de cana-de-açúcar nas doses 4,4 e 8,9 kg ha⁻¹, via solo, e na qualidade industrial dos colmos com a aplicação foliar.

Jamro et al. (2002), estudando o efeito de aplicações foliares com doses crescentes de B (0,25; 0,50 e 0,75 kg ha⁻¹), Cu (0,50; 1,00 e 1,50 kg ha⁻¹), Mn (1,00; 2,00 e 3,00 kg ha⁻¹) e Zn (1,50; 3,00 e 4,50 kg ha⁻¹) em soqueiras de cana-de-açúcar no Paquistão, observaram aumento no tamanho de internódios, na altura e perfilhamento com a aplicação das menores doses de Cu, Zn e Mn, indícios de um aumento de produtividade da cultura.

Panhwar et al. (2003), estudaram o efeito da aplicação de doses de NPK, com e sem aplicação de 10 kg ha⁻¹ de Zn via solo, e com e sem aplicação foliar de 1,5 kg ha⁻¹ de Zn via foliar em solos calcários e concluíram que a aplicação concomitante de Zn via solo e via foliar aumentou a produtividade da cana adubada com doses mais altas de NPK, em até 14 t ha⁻¹.

A aplicação de N via foliar tem o potencial de proporcionar uma maior absorção do nutriente, podendo acarretar o incremento da produtividade da cana-de-açúcar (Trivelin et al. 1988). De maneira geral, as formulações de fertilizantes foliares disponíveis no mercado para a cana-de-açúcar, contêm N na mistura com micronutrientes. Essa mistura é justificada pela

aplicação foliar ser eficiente para nutrir as plantas com N, e pelo fato de a ureia, aumentar a absorção dos micronutrientes (Boaretto et al. 1999).

Devido principalmente ao desempenho operacional, muitos produtores têm adotado na prática a aplicação via foliar de micronutrientes em cana-de-açúcar, porém informações científicas sobre doses, fontes e épocas de aplicação de micronutrientes via foliar, assim como a eficiência dessa tecnologia, praticamente são inexistentes e pouco conclusivas. Portanto, a realização de pesquisas que visam compreender o efeito da aplicação desses elementos na produtividade da cultura, bem como, embasar recomendações de adubação aos produtores, são de elevada importância e precisam ser realizados no mundo todo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização das áreas experimentais

O estudo foi composto por uma rede de sete experimentos em diferentes ambientes edafoclimáticos de importantes regiões canavieiras do Estado de São Paulo e Mato Grosso do Sul, no período de 2018 a 2019, em cana-planta. Os ensaios foram instalados em áreas pertencentes às seguintes unidades de produção: Grupo Adecoagro, localizado em Ivinhema-MS; Grupo Agroterenas, localizado em Assis-SP; Grupo COFCO, localizada em Marapoama-SP; Usina Alta Mogiana, localizada em São Joaquim da Barra-SP; Usina da Pedra, localizada em Ribeirão Preto-SP e Usina São Luiz, localizada em Ipaussu-SP.

As informações sobre localização, classificação do solo, clima, ambiente de produção e variedade plantada em cada local estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Localização, tipos de solo, clima, ambientes de produção e variedades de cana-de-açúcar nos sete experimentos.

Local	Município	Solo	Clima †	Precipitação ‡	Temperatura §	Classe textural	Ambiente de produção	Variedade
				mm	°C			
1	Ivinhema -MS	LVPd	Aw	1534	23,0	Franco arenosa	B	RB 96-6928
2	Assis-SP	LVAd	Cwa	1352	20,5	Arenosa	D	RB 86-7515
3	São J. da Barra-SP	LVd	Aw	1505	22,2	Argilosa	C	CTC 4
4	Marapoama-SP	LVal	Aw	1245	22,3	Franco arenosa	B	CTC 4
5	Ribeirão Preto-SP	RQ	Aw	1508	21,9	Areia franca	E	RB 85-5156
6	Ipaussu-SP	LVdf	Cwa	1350	20,5	Muito argilosa	B	RB 96-6928
7	Ipaussu-SP	LVaf	Cwa	1350	20,5	Muito argilosa	D	CTC 4

LVPd: Latossolo Vermelho-Amarelo Podzólico distrófico; LVAd: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVd: Latossolo Vermelho distrófico; LVal: Latossolo Vermelho Amarelo álico; RQ: Neossolo Quartzarênico; LVdf: Latossolo Vermelho Distroférrico e LVaf: Latossolo Vermelho aliferrico. † Classificação de Köppen (Aw: Tropical com inverno seco, Cwa: Subtropical quente com inverno seco). ‡ Média anual da somatória mensal. §: Média anual.

Em todas as áreas experimentais, a calagem, a gessagem, e a adubação de plantio e de cobertura foram realizadas conforme recomendações do corpo técnico das unidades sucroalcooleiras em que os experimentos foram conduzidos (Tabela 2).

Tabela 2. Descrição das práticas corretivas e de adubações realizadas em cada local experimental.

Local	Calcário	Gesso	Composto	Fosfato	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	B	Cu	Mo	Zn	Mn
	t ha ⁻¹				kg ha ⁻¹							
1	4,7	1,6	-	0,7	78	195	65	0,2	-	-	6,5	-
2	3,0	1,5	-	-	30	150	150	0,4	-	-	-	-
3	0,6	1,0	-	-	33	152	150	-	-	-	-	-
4	-	-	19,7	-	40	121	-	-	-	-	0,0004	0,0004
5	-	-	-	-	9	42	120	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	39	42	34	0,1	0,4	0,08	1,4	-
7	-	-	-	-	39	42	34	0,1	0,4	0,08	1,4	-

Locais: 1 – Ivinhema/MS, 2 – Assis/SP, 3 – São Joaquim da Barra/SP, 4 – Marapoama/SP, 5 – Serrana/SP, 6 e 7 – Ipaussu/SP.

Os dados climáticos referentes ao período experimental em cada local encontram-se na Figura 1.

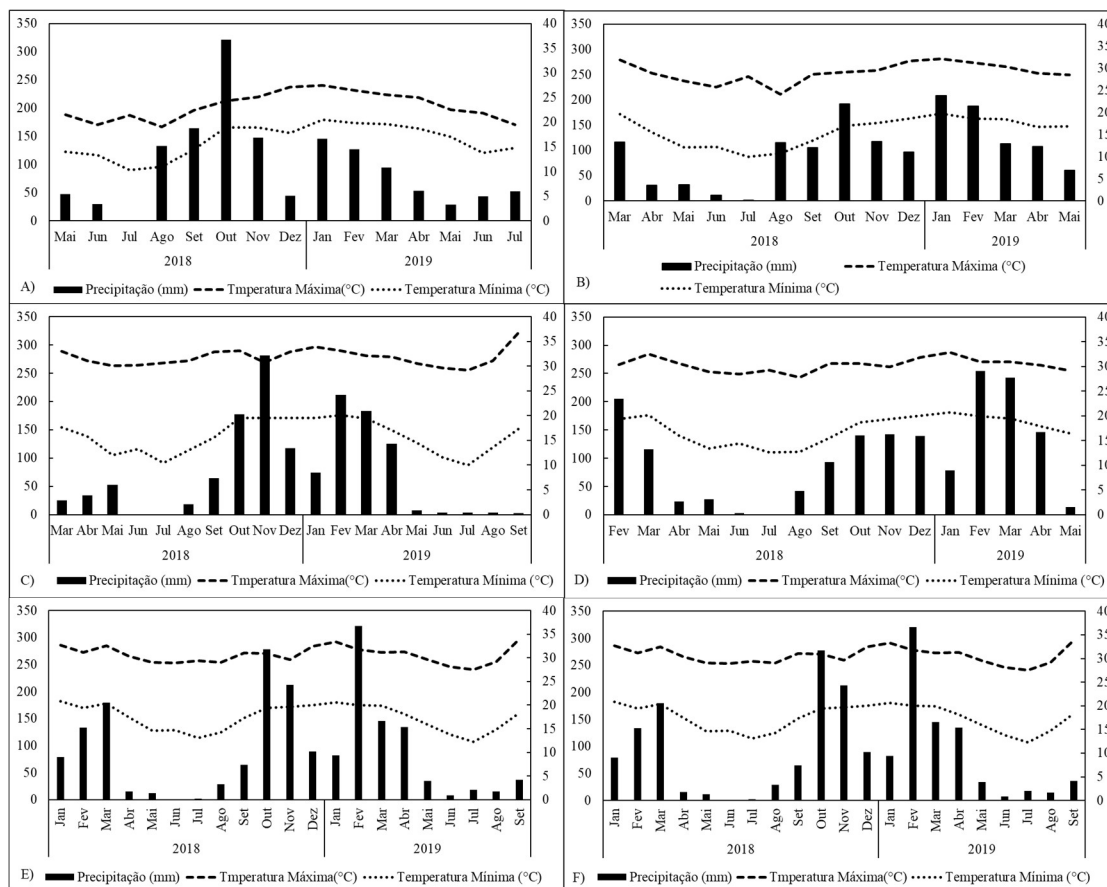


Figura 1. Valores de precipitação acumulada mensalmente (mm), temperaturas máximas e mínimas (°C) no período experimental em cada local. A) Ivinhema-MS; B) Assis-SP; C) Marapoama-SP; D) São Joaquim da Barra-SP; E) Ribeirão Preto-SP e F) Ipaussu-SP. Valores médios obtidos das estações agrometeorológicas do IAC/APTA e INMET.

3.2 Caracterização das áreas experimentais

Antes da aplicação dos tratamentos com micronutrientes nas folhas, foram coletadas amostras simples de solo na profundidade de 0 a 25 cm de forma aleatória em 15 pontos na linha de cultivo da cultura. As amostras coletadas em cada ponto foram dispostas em balde plástico de pvc, sendo ao final da coleta, realizada a homogeneização e a retirada de uma alíquota de 500 g de terra (Figura 10), que foi acondicionada em saco plástico devidamente identificado, para posterior análise química e granulométrica em cada local estudado. Essas amostras foram levadas ao laboratório de Fertilidade do Solo, do Instituto Agrônomo de Campinas, peneiradas e secas em estufa com circulação de ar forçada a 40° C.

Após esses procedimentos, foram determinados os parâmetros químicos de fertilidade do solo de acordo com os métodos propostos por Raij et al. (2001). Foram determinados os

seguintes parâmetros: matéria orgânica do solo (oxidação ácida do dicromato), pH (solução 0,01M CaCl₂), P, K, Ca e Mg (extração por resina de troca iônica), H + Al (determinação por potenciômetro em solução tampão SMP), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação da base do solo (V%), S (extração com Ca (H₂PO₄)₂ 0,01M L⁻¹; B (extração com água quente) e Cu, Fe, Mn e Zn (extração com DTPA) (Tabela 5). Também foram realizadas as análises granulométricas e os solos foram classificados de acordo com o manual oficial de classificação de solos do Brasil Embrapa (2006).

Tabela 3. Caracterização química dos solos das áreas experimentais em amostras coletadas antes da instalação dos experimentos.

Local	pH	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V%	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmolc dm ⁻³ -----				-----			%	-----mg dm ⁻³ -----				
				----- 0-25cm -----												
1	5,6	16	50	0,9	39	17	16	56,7	72,7	78	15	0,2	0,4	9	2,1	0,4
2	5,2	25	9	1,0	15	4	31	20,0	51,0	39	8	0,2	2,8	80	13,1	1,0
3	4,9	21	8	4,9	51	14	24	69,9	93,9	74	5	0,4	0,5	74	1,5	0,3
4	5,6	15	18	0,8	21	6	17	27,5	44,6	62	26	0,3	0,5	34	3,2	0,5
5	5,2	12	73	1,9	28	5	22	34,9	56,9	61	4	0,3	0,9	69	3,1	0,9
6	5,2	32	13	1,1	54	17	42	72,1	114,1	63	<6	0,2	2,6	21	3,5	0,9
7	4,9	21	10	0,9	45	10	52	55,9	107,9	52	34	0,2	7,1	13	67,6	4,8

Locais: 1 – Ivinhema/MS, 2 – Assis/SP, 3 – São Joaquim da Barra/SP, 4 – Marapoama/SP, 5 – Serrana/SP, 6 e 7 – Ipaussu/SP.

Antes da instalação dos experimentos foram coletadas em área total, amostras de 30 folhas diagnósticas (primeira folha expandida contada do topo para a base do colmo com a lígula visível, de acordo com o sistema de ordenação de Kuijper) (Clements, 1980), desprezando-se a nervura central, e os terços extremos (Raij e Cantarella 1996) a fim de caracterizar nutricionalmente a cana-de-açúcar das áreas experimentais (Figura 11). Após a coleta no campo, essas folhas foram acondicionadas em sacos de papel, devidamente identificados, colocadas em saco plástico limpos e vedados, e posteriormente refrigeradas em caixa térmica com gelo, até serem conduzidas o laboratório do IAC – Campinas/SP.

No laboratório, essas folhas foram lavadas com uma solução aquosa de detergente (0,1% v/v), em seguida enxaguadas em água corrente, e depois com água deionizada para retirar todas as impurezas. Após a lavagem, as folhas foram secas em toalhas de papel e novamente acondicionadas em sacos limpos de papel, identificados e colocados para secar em estufa de circulação forçada a 60°C por 72 horas, até atingir a massa constante (Figura 12). Após esta etapa, as folhas foram moídas em moinho do tipo Willey, com peneira de 1 mm de diâmetro. Em seguida efetuou-se a análise dos teores de nutrientes nas folhas seguindo os procedimentos descritos por Bataglia et al. (1983). O teor de N foi determinado pelo método de Kjeldahl, por

digestão sulfúrica (titulação). Os demais nutrientes foram determinados por meio da digestão nítrico-perclórica, enquanto o Mo foi determinado segundo método da Embrapa proposta por Polidoro et al. (2006) e adaptado por Vieira (2015). Os teores dos nutrientes extraídos foram determinados por meio de leitura em ICP-OES (Tabela 6).

Tabela 4. Teores de macro e micronutrientes na folha diagnóstica da cana-de-açúcar para caracterização das áreas experimentais.

Local	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹					
1	18,9	2,0	9,5	5,7	2	1,6	72,8	56,4	5,4	15,3	4,8	0,8
2	16,9	1,5	7,4	4,6	2,5	1,6	49,4	26,0	72,5	15,1	1,5	1,4
3	20,5	1,7	8,1	7,2	1,9	1,4	101,4	60,9	7,7	21,8	2,5	0,5
4	19,7	2,1	8,3	7,1	2,8	1,7	63,1	108,4	5,4	18,6	6,5	1,5
5	17,7	1,9	10,6	5,6	1,8	1,4	81,8	30,9	3,9	13,5	1,6	1,1
6	16,8	1,5	9,6	4,8	1,9	1,4	193,8	31,0	6,6	15,2	4,9	0,8
7	13,4	1,2	7,4	7,4	1,2	1,8	136,1	93,8	3,6	11,7	2,2	1,1

Locais: 1 – Ivinhema/MS, 2 – Assis/SP, 3 – São Joaquim da Barra/SP, 4 – Marapoama/SP, 5 – Serrana/SP, 6 e 7 – Ipaussu/SP.

3.3 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com nove tratamentos e cinco repetições, totalizando 45 parcelas. As parcelas foram constituídas por 6 linhas de 15 m de comprimento, espaçadas de 1,5 m, sendo as 4 linhas centrais considerada a área útil das parcelas. No Local 2, foi utilizado o espaçamento duplo alternado, dessa forma, as parcelas continham 4 linhas duplas, correspondendo ao espaçamento de 1,2 x 0,9 m, sendo as 2 linhas duplas centrais consideradas como área útil.

Os tratamentos aplicados, bem como as fontes de fertilizantes utilizadas no estudo estão descritos na Tabela 3. Foram utilizadas fontes de alta solubilidade. As doses de Zn, Cu, Mn e B foram baseadas em um estudo conduzido por Jamro et al. (2002). A dose de Mo foi baseada nos resultados obtidos por Vieira (2015). A dose de N aplicada foi de acordo com o manejo já adotado pelo grupo de usinas participantes.

Tabela 5. Descrição dos tratamentos aplicados.

Micronutriente	Dose (kg ha ⁻¹)	Fonte
Controle	Sem micronutrientes	-
Zinco (Zn)	0,70	Sulfato de Zn
Cobre (Cu)	0,35	Sulfato de Cu
Manganês (Mn)	1,00	Sulfato de Mn
Boro (B)	0,30	Ácido bórico
Molibdênio (Mo)	0,30	Molibdato de sódio
Nitrogênio (N)	10	Ureia
Zn; Cu; Mn; B; Mo	Todas (-N)	Todas (-N)
Zn; Cu; Mn; B; Mo + N	Todas (+N)	Todas (+N)

As soluções contendo os tratamentos foram preparadas em água deionizada e diluídas em garrafas plásticas de 2 litros (Figura 7), contendo a quantidade de água equivalente ao volume de calda de 150 L ha⁻¹. Os tratamentos foram aplicados manualmente em cada parcela com auxílio de pulverizador costal pressurizado com CO₂, contendo uma barra com duas pontas, espaçadas em 1,5 m, equipadas com bicos Magnojet 110° M302 a uma pressão de trabalho de 2,5 kgf/cm⁻² (Figura 8), sendo as aplicações dos tratamentos realizadas em único dia, no período da manhã.

As aplicações foram realizadas de dezembro/2018 a janeiro/2019 (Tabela 4), época em que as áreas apresentaram o máximo crescimento vegetativo da cultura (Figura 9).

Tabela 6. Descrição das datas em que foram realizadas as coletas de dados.

Local	Data do Plantio	Data da instalação	Data da coleta de folhas	Data da colheita	Dias entre a aplicação e a colheita
1	05/05/2018	03/12/2018	22/01/2019	05/07/2019	212
2	16/03/2018	12/12/2018	16/01/2019	15/05/2019	153
3	25/03/2018	09/01/2019	18/02/2019	06/09/2019	237
4	09/02/2018	07/12/2018	17/01/2019	24/05/2019	167
5	18/01/2018	08/12/2018	17/01/2019	11/09/2019	273
6	31/01/2018	09/12/2018	15/01/2019	26/06/2019	197
7	31/01/2018	15/01/2019	25/01/2019	27/06/2019	162

Locais: 1 – Ivinhema/MS, 2 – Assis/SP, 3 – São Joaquim da Barra/SP, 4 – Marapoama/SP, 5 – Serrana/SP, 6 e 7 – Ipaussu/SP

3.4 Variáveis analisadas

3.4.1 Teor foliar de micronutrientes

Com aproximadamente trinta dias após a aplicação dos tratamentos foram coletadas dez folhas diagnósticas aleatoriamente dentro da área útil de cada parcela, e determinado o efeito dos tratamentos nos teores foliares conforme metodologia descrita no item 3.3.

3.4.2 Qualidade industrial e produtividade

A qualidade industrial e a produtividade de colmos foram determinadas, assim que as plantas atingiram a maturidade fisiológica, em média, 6,6 meses após a aplicação dos tratamentos.

No dia da colheita de cada experimento (Tabela 4), foram coletados 10 colmos de forma aleatória na área útil de cada parcela, descartando-se os ponteiros e acondicionando-os em feixes devidamente identificados (Figura 13). Imediatamente após a coleta, as amostras foram levadas para o laboratório de cada unidade sucroalcooleira para a determinação da qualidade industrial (Açúcar Total Recuperável - ATR) do caldo nas unidades laboratoriais de cada unidade produtora. Os parâmetros tecnológicos foram determinados de acordo com o método descrito por Tanimoto (1960). O cálculo de ATR é resultante da seguinte expressão:

$$\text{ATR} = 9,5263 * \text{Pol cana} + 9,05 * \text{ARC}$$

Onde:

$\text{ATR} = \text{kg de açúcar t}^{-1} \text{ de cana};$

$\text{Pol cana} = \text{pol t}^{-1} \text{ de cana};$

$\text{ARC} = \text{açúcares redutores pol t}^{-1} \text{ de cana};$

A colheita dos experimentos foi realizada mecanicamente, onde foram colhidos e pesados os colmos das áreas uteis de cada parcela com auxílio de célula de carga acoplada em transbordo (Figura 14). A produtividade média de colmos por hectare (TCH – Toneladas de Colmo por Hectare) para todos os tratamentos foi calculada através da seguinte formula:

$$\text{TCH} = \text{Peso das parcelas} * 10000 / \text{área útil da parcela} / 1000$$

Além disso foi calculado as estimativas de produção de açúcar em um hectare realizada através da seguinte expressão:

$$\text{TAH (Toneladas de Açúcar por Hectare)} = (\text{produtividade agrícola [TCH]} * \text{qualidade industrial [ATR]}) / 1000$$

Para uma melhor compreensão da viabilidade econômica dos tratamentos foi calculado o lucro obtido com a produção da cana-de-açúcar (TCH) e com a qualidade industrial (TAH), através das seguintes equações:

Lucro cana: preço da cana-de-açúcar por tonelada * Δ TCH – custo por tratamento;

Lucro TAH: preço da tonelada de açúcar * Δ TAH – custo por tratamento.

Onde:

TCH = Produtividade de colmos por hectare ($t\ ha^{-1}$);

Δ TCH = Diferença entre o controle e o tratamento aplicado;

TAH = Toneladas de açúcar por hectare ($t\ ha^{-1}$);

Δ TAH = Diferença entre o controle e o tratamento aplicado.

3.5 Análise estatística

Os resultados obtidos em cada local foram submetidos à análise de variância, seguida de teste t (lsd) para comparação de médias, ao nível de significância de 90%. Além disso, foram realizadas análise de correlação simples entre as variáveis TCH, ATR e TAH e os teores foliares de B, Cu, Mn, Mo, Zn e N em cada um dos locais estudados. Além da análise por local, foi realizada a análise conjunta dos dados. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa estatístico SISVAR 4.3.

4 RESULTADOS

A resposta da cana-de-açúcar à aplicação foliar de micronutrientes variou em função dos ambientes e variedades de produção. Respostas significativas foram encontradas em relação às concentrações foliares de micronutrientes, à produtividade de colmos (TCH), e qualidade industrial Açúcar Total Recuperável (ATR) e Toneladas de Açúcar por Hectare (TAH).

4.1 Produtividade e qualidade industrial

O TCH variou de acordo com os locais e tratamento avaliados, apresentado aumentos significativos em função da aplicação dos micronutrientes em 3 dos 7 locais estudados (Tabela 7).

No local 2, a produtividade de colmos aumentou significativamente em relação aos demais tratamentos com a aplicação foliar de 1 kg ha^{-1} de Mn, produzindo 17 t ha^{-1} a mais em relação ao tratamento controle. O tratamento isolado com Zn, não diferiu estatisticamente do tratamento com Mn, apresentando a produtividade média de $164,4 \text{ t ha}^{-1}$, porém, este incremento não diferiu do tratamento controle.

A aplicação foliar dos tratamentos B, Cu, Mn, Zn, Completo - N e o Completo + N foram superiores estatisticamente que os demais tratamentos no local 3, produzindo em média 14, 25, 9, 13, 13 e 16 t ha^{-1} de colmos a mais em relação ao tratamento controle.

Aumentos significativos para aplicação de B e o Mn foram observadas no local 7. A aplicação desses tratamentos aumentou a produção de colmos em aproximadamente 9 t ha^{-1} em relação à média observada nas parcelas que não receberam aplicação foliar de micronutrientes.

No local 6 a aplicação dos tratamentos Cu, Mo e Completo + N e no local 7 os tratamentos Cu e Mo reduziram a produção de colmos em relação ao tratamento controle. Nesses locais houve o suprimento de B, Cu, Mo e Zn via solo (Tabela 7).

Tabela 7. Produtividade de colmos e qualidade industrial em função da aplicação foliar de micronutrientes na cana planta em cada local estudado.

Tratamentos	Locais						
	1	2	3	4	5	6	7
	TCH						
	-----t ha ⁻¹ -----						
Controle	132,0	152,8bcd	122,8ef	115,6	105,8	163,6abc	103,2bc
Zn	132,8	164,4ab	135,6bc	112,2	103,4	158,4cd	108,8ab
Cu	133,6	157,0abc	147,6a	105,6	105,8	149,4e	95,0d
Mn	130,6	169,4a	131,8cd	120,2	102,0	166,4a	112,0a
B	136,0	153,4bcd	136,4bc	120,2	111,6	165,8a	111,8a
Mo	129,0	147,4cd	120,0f	112,8	110,8	152,4e	96,6d
N	134,4	143,0cd	128,2de	110,4	109,0	160,2bcd	104,8b
Completo - N	133,2	144,0cd	136,0bc	110,4	105,8	164,8ab	97,2cd
Completo + N	129,6	139,4d	138,8b	112,6	106,6	158,0d	105,6b
Análise da Variância							
CV%	3,59	9,68	4,56	10,68	5,23	3,05	5,49
Valor de F	1,16 ^{ns}	2,32*	9,73*	0,76 ^{ns}	1,65 ^{ns}	7,56*	6,41*
	ATR						
	-----kg t ⁻¹ -----						
Controle	125,2b	147,6	178,0	138,4	157,6	154,8	146,0bc
Zn	120,8b	146,0	179,6	140,6	160,6	150,6	143,8c
Cu	125,8b	146,4	180,2	139,6	157,0	151,4	145,2c
Mn	123,0b	145,6	176,8	134,4	161,2	147,8	150,0a
B	133,8a	147,8	175,4	139,8	156,4	152,4	143,6c
Mo	123,8b	148,8	174,4	141,6	156,8	146,8	149,2ab
N	118,8b	146,4	181,8	141,2	160,4	148,6	146,8abc
Completo - N	123,4b	149,4	178,4	147,6	163,4	153,0	149,0ab
Completo + N	120,0b	145,6	181,2	134,4	158,0	153,8	143,8c
Análise variância							
CV%	5,61	2,73	3,18	4,69	2,63	3,07	2,17
Valor de F	2,01*	0,60 ^{ns}	1,00 ^{ns}	1,85 ^{ns}	1,68 ^{ns}	1,81 ^{ns}	3,15*
	TAH						
	-----t ha ⁻¹ -----						
Controle	16,4bc	22,6	22,0de	16,0	16,8	25,6a	15,0bcd
Zn	16,4bc	22,6	22,0de	16,0	16,8	25,6a	15,0bcd
Cu	16,2bc	23,8	24,4bc	15,6	16,4	23,8cd	15,6abc
Mn	16,8b	23,0	26,4a	15,0	16,8	22,8de	13,8e
B	16,0bc	24,6	23,4cd	16,2	16,4	24,4bc	16,6a
Mo	18,2a	22,4	23,8c	16,8	17,0	25,2ab	16,0ab
N	15,8bc	21,6	20,8e	16,0	17,4	22,2e	14,4de
Completo - N	16,0bc	21,0	23,0cd	15,6	17,2	23,8cd	15,2bcd
Completo + N	16,4bc	21,6	24,4bc	16,4	17,2	25,2ab	14,6cde
Análise variância							
CV%	6,99	10,29	5,78	11,20	7,27	4,11	6,19
Valor de F	2,44*	1,70 ^{ns}	7,66*	0,52 ^{ns}	0,58 ^{ns}	6,50*	4,07*

Locais: 1 – Ivinhema/MS, 2 – Assis/SP, 3 – São Joaquim da Barra/SP, 4 – Marapoama/SP, 5 – Serrana/SP, 6 e 7 – Ipaussu/SP. Médias seguidas por letras iguais na coluna não se diferenciam pelo teste-t (LSD) (p<0,10). *= Significativo a 10%. ^{ns}= Não significativo.

Para a variável ATR, dos 7 locais estudados, apenas 2 apresentaram efeito significativo. No local 1 (Tabela 7) apenas o tratamento com B diferiu dos demais, apresentando um aumento de $8,6 \text{ kg t}^{-1}$ de açúcar em relação ao controle. No local 7, o Mn foi mais responsivo com ganho de $4,0 \text{ kg t}^{-1}$ de açúcar em relação ao controle.

Observando os resultados para TAH, observamos que 4 locais (Tabela 7) apresentaram respostas significativas aos tratamentos. No local 1, a aplicação foliar de $0,30 \text{ kg ha}^{-1}$ de B e $0,35 \text{ kg ha}^{-1}$ de Cu aumentaram o TAH em $1,8 \text{ t ha}^{-1}$ e 8 t ha^{-1} em relação ao tratamento controle. No local 3, o TAH foi significativamente maior que no tratamento controle com a aplicação dos tratamentos Cu, Mn, Mo e Completo + N, que apresentaram respectivamente ganhos de 2,4; 4,4; 1,8 e $2,4 \text{ t ha}^{-1}$.

No local 6 a aplicação foliar dos tratamentos Cu, Mo e Completo - N diminuíram o TAH em relação ao tratamento controle, sendo esses. No local 7, também foi observado queda no TAH com a aplicação dos tratamentos Cu, Mo e Completo - N. Apesar disso, a aplicação foliar isolada de B nesse local aumentou significativamente o TAH em $1,6 \text{ t ha}^{-1}$ em relação ao tratamento controle.

4.2 Diagnose Foliar

Em relação a concentração foliar de micronutrientes nas plantas, observa-se que a aplicação foliar de forma geral aumentou o teor dos micronutrientes estudados na cana planta em comparação ao tratamento controle (sem aplicação de micronutrientes) principalmente quando aplicados de forma isolada (Figura 2).

Dentre todos os micronutrientes o Cu foi o único que apresentou respostas estatisticamente significativas em todos os locais estudados. A aplicação isolada de Cu aumentou o teor do micronutriente em relação ao tratamento controle em todos os locais avaliados, apesar disso, os incrementos foram pequenos, com exceção do estudo conduzido em Ivinhema-MS, onde a aplicação foliar isolada de $0,35 \text{ kg ha}^{-1}$ de Cu, aumentou em 851,08 % o conteúdo de cobre nas folhas. Este local era o que apresentava o menor teor disponível de Cu no solo, o que pode explicar esse grande incremento.

A aplicação foliar de B e Mo aumentou a concentração desses nutrientes nas folhas diagnósticas de forma significativa em cinco dos sete locais. Com relação ao B, embora tenha sido observado incrementos foliares, especialmente quando o micronutriente foi aplicado isoladamente (Figura 2B). A aplicação isolada de Mo apresentou as maiores concentrações do

micronutriente nas folhas diagnósticas, porém com a aplicação do tratamento completo com e sem N, os teores de Mo nas folhas também aumentaram em relação ao tratamento controle, mas em menor intensidade (Figura 2D).

O efeito da aplicação foliar de Zn e Mn aumentou significativamente a concentração foliar desses nutrientes em quatro locais. Em relação ao Zn, tanto a aplicação isolada, como conjunta, com ou sem N, de maneira geral aumentaram os teores foliares na cana-planta, em relação ao tratamento controle.

Em relação ao Mn, observou-se comportamento semelhante ao observado no Zn, porém a aplicação foliar isolada foi a que apresentou os maiores incrementos no teor foliar do micronutriente nos locais que apresentaram aumentos significativos em relação ao tratamento controle. Os tratamentos completo com e sem N, também aumentaram o teor de Mn nesses locais, mas os incrementos nos teores foliares de Mn nesses tratamentos foram ligeiramente menores que os observados no tratamento isolado.

Não houve efeito para a aplicação foliar de N em nenhum dos locais estudados (Figura 2F).

Na Tabela 8 estão apresentados os coeficientes de correlação simples entre os parâmetros agronômicos e de qualidade industrial e os teores foliares em cada local estudado. Embora, tenha sido observado efeito dos tratamentos no teor foliar de micronutrientes na maioria dos locais estudados, esses incrementos de maneira geral não apresentaram correlação com os parâmetros agronômicos (TCH) e de qualidade industrial (ATR e TAH).

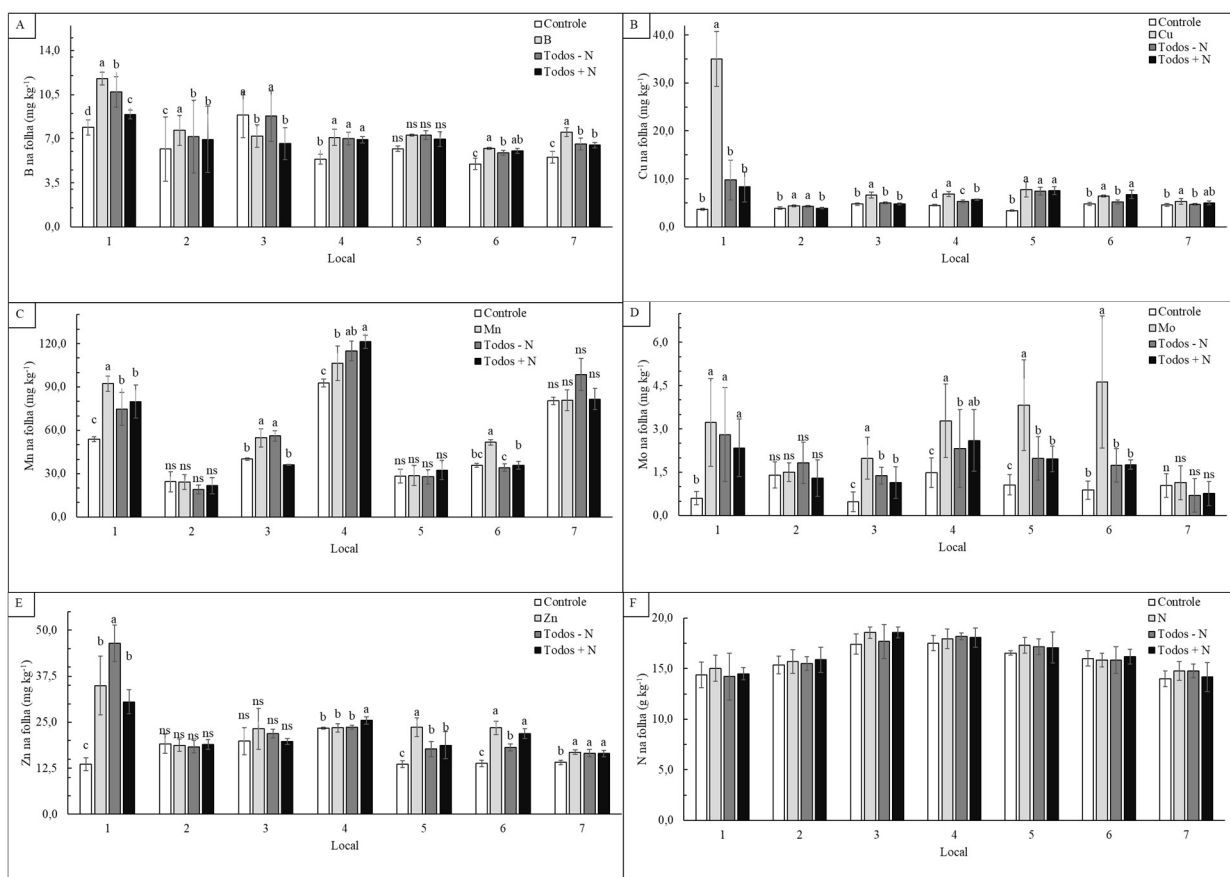


Figura 2. A) Concentração de B; B) Concentração de Cu; C) Concentração de Mn; D) Concentração de Mo; E) Concentração de Zn e F) Concentração de N na folha diagnóstica da cana-planta em função da aplicação foliar de micronutrientes e nitrogênio, em cada local estudado. Barras dentro dos locais = Desvio padrão. Médias seguidas por letras iguais não se diferenciam pelo teste-t (LSD) ($p < 0,10$). ns= Não significativo.

Observou-se correlações positivas entre os teores foliares de micronutrientes e TCH apenas no local 3, para as aplicações isoladas de Cu, Mn e Zn. O local 4 também apresentou correlações significativas, porém o efeito foi negativo, indicando que a produtividade de colmos diminui com o aumento dos teores de Cu e Zn nas folhas. Em relação ao ATR, observou-se correlações positivas significativas para B em dois locais (Local 1 e 6) e Cu no Local 3. O TAH apresentou correlação positiva para teor de B nas folhas nos locais 1 e 6 e para Cu e Zn no Local 3. No local 4, observou-se correlação negativa entre teor foliar de Cu e Zn e TAH (Tabela 8).

Tabela 8. Correlação linear simples entre os teores foliares de micronutrientes e nitrogênio e os parâmetros de produtividade e qualidade industrial por local.

TCH						
Locais	N	Mn	Cu	Zn	B	Mo
1	0,62	-0,37	0,18	0,00	0,28	-0,54
2	-0,07	0,33	-0,16	-0,17	-0,39	-0,32
3	0,42	0,57*	0,75*	0,73*	0,36	-0,30
4	-0,04	-0,34	-0,80*	-0,71*	-0,26	-0,33
5	0,51	-0,43	-0,19	-0,37	-0,16	0,36
6	-0,55	0,43	-0,56	-0,04	0,33	-0,42
7	0,20	0,43	-0,13	-0,17	-0,06	-0,52
ATR						
Locais	N	Mn	Cu	Zn	B	Mo
1	-0,06	-0,17	0,12	-0,29	0,60*	-0,18
2	-0,52	-0,28	0,52*	-0,18	0,44	0,61
3	0,15	0,08	0,42	0,09	0,20	-0,37
4	0,35	0,16	0,09	0,06	0,37	0,11
5	0,19	0,38	0,12	0,40	0,10	-0,13
6	-0,26	-0,13	0,29	0,25	0,59*	-0,39
7	-0,31	0,18	-0,32	-0,09	-0,35	0,23
TAH						
Locais	N	Mn	Cu	Zn	B	Mo
1	0,19	-0,26	0,16	-0,21	0,56*	-0,34
2	-0,15	0,30	-0,09	-0,20	-0,35	-0,25
3	0,40	0,52*	0,75*	0,67*	0,36	-0,33
4	0,22	-0,24	-0,80*	-0,70*	0,01	-0,28
5	0,48	-0,35	-0,39	-0,24	-0,05	0,28
6	-0,56	0,30	-0,35	0,07	0,51*	-0,49
7	0,11	0,50	-0,22	-0,20	-0,16	-0,48

Locais: 1 – Ivinhema/MS, 2 – Assis/SP, 3 – São Joaquim da Barra/SP, 4 – Marapoama/SP, 5 – Serrana/SP, 6 e 7 – Ipaussu/SP. * = significativos ao nível de 5%. TCH: Toneladas de Colmo por Hectare; ATR: Açúcar Total Recuperável; TAH: Toneladas de Açúcar por Hectare; N: Nitrogênio; Mn: Manganês; Cu: Cobre; Zn: Zinco; B: Boro e Mo: Molibdênio.

4.3 Análise conjunta dos dados

Como pode se observar as repostas aos tratamentos variaram muito em cada local. Além disso, em alguns locais, apesar da aplicação foliar de micronutrientes não proporcionar efeitos estatísticos significativos, houve aumento de TCH, ATR e TAH em comparação ao tratamento controle. Portanto, para melhor compreender os resultados, realizou-se a análise conjunta dos dados para essas variáveis.

Em relação ao TCH, observou-se aumento significativo em relação ao tratamento controle com a aplicação foliar isolada de B e Mn (Figura 7). O incremento médio geral no TCH com a aplicação isolada desses dois tratamentos em relação ao controle foi de 5,7 e 4,3 t ha⁻¹ respectivamente. A aplicação de Zn apresentou resposta intermediária, não diferindo dos tratamentos citados acima. Na média geral o TCH com a aplicação isolada de Zn foi 2,9 t ha⁻¹ maior que o observado no controle, porém essa diferença não foi significativa em relação ao tratamento controle.

O Mo apresentou um efeito deletério no TCH, reduzindo em 3,8 t ha⁻¹ a produtividade em relação ao tratamento controle, o que indica que a dose aplicada na fase de máximo desenvolvimento da cana-planta foi tóxica às plantas, embora não tenha sido observado sintomas visuais em nenhum dos experimentos.

A aplicação foliar isolada de N, bem como a aplicação conjunta dos micronutrientes, com ou sem N, não aumentaram a produtividade de colmos na cana-planta (Figura 7).

Conforme observando ambos os tratamentos não diferiram do tratamento controle e do tratamento com Mo. Esta falta de resposta pode ter sido ocasionada pelo Mo que houve uma competição por absorção dos nutrientes nesses tratamentos e ainda um excesso de sais nas folhas em uma única aplicação. Pode ser que o parcelamento destes tratamentos completo melhore a absorção dos nutrientes e aumente a produtividade.

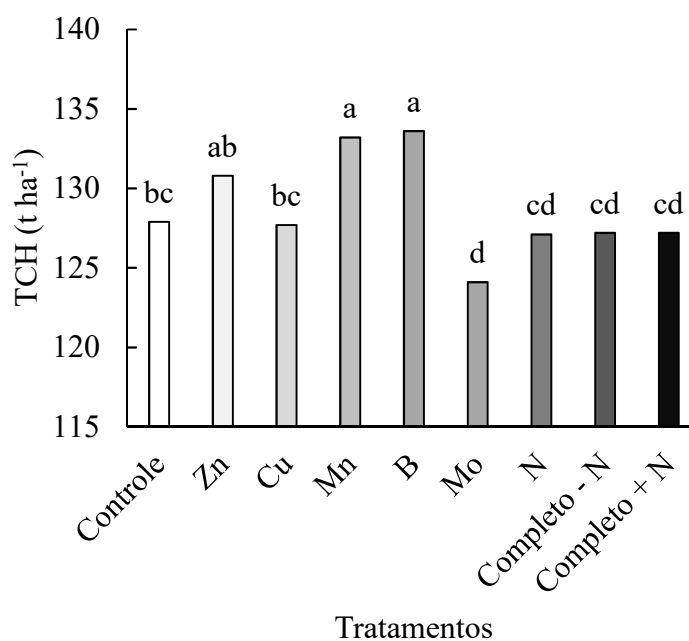


Figura 3. Produção de colmos (TCH) em função da aplicação foliar de micronutrientes e nitrogênio na cana-planta. Análise conjunta dos resultados de 7 locais.

Em relação ao ATR, observou-se que a aplicação do tratamento Completo - N, proporcionou um aumento de 2,4 kg t⁻¹, em relação aos demais tratamentos (Figura 4).

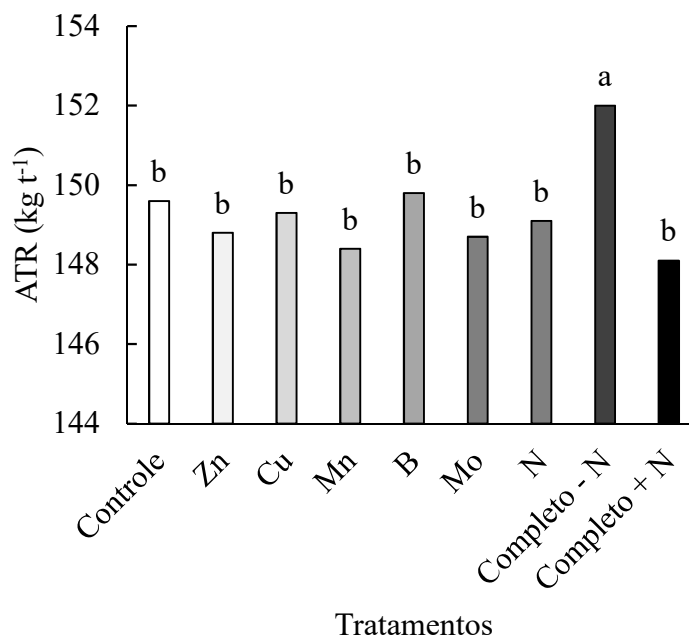


Figura 4. Açúcar total recuperável (ATR) em função da aplicação foliar de micronutrientes e nitrogênio na cana-planta. Análise conjunta dos resultados de 7 locais.

O TAH aumentou em 0,7 t ha⁻¹ com a aplicação isolada de B em relação ao controle (Figura 9). A aplicação de Zn e Mn isolada, assim como o tratamento Completo - N, apresentaram respostas intermediárias, não diferindo do controle, mas com incrementos de 0,2; 0,4 e 0,2 t ha⁻¹, respectivamente. Em contrapartida, a aplicação isolada de Mo diminuiu em 0,9 t ha⁻¹ o TAH em relação ao controle.

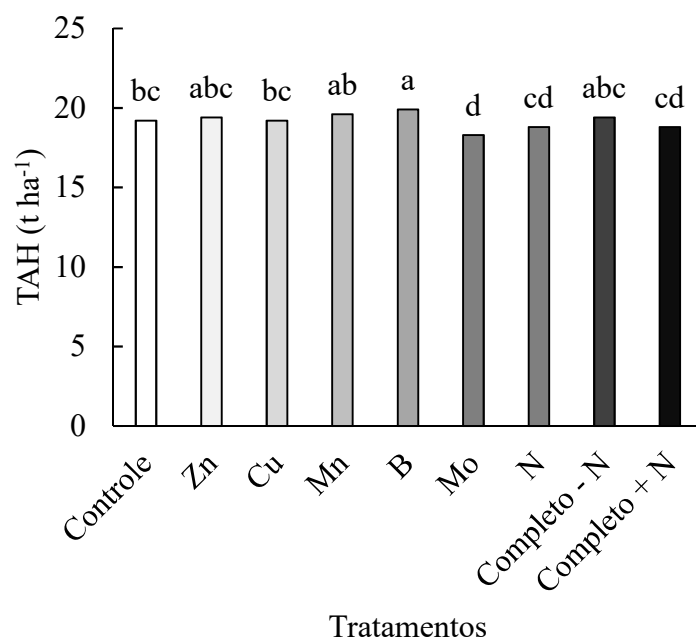


Figura 5. Produtividade de açúcar por hectare (TAH) em função da aplicação foliar de micronutrientes e nitrogênio. Análise conjunta dos resultados de 7 locais.

Em relação aos teores foliares, de maneira geral, observou-se incrementos nos teores foliares em relação ao tratamento controle com a aplicação de micronutrientes, especialmente com a aplicação dos tratamentos isolados (Figura 6).

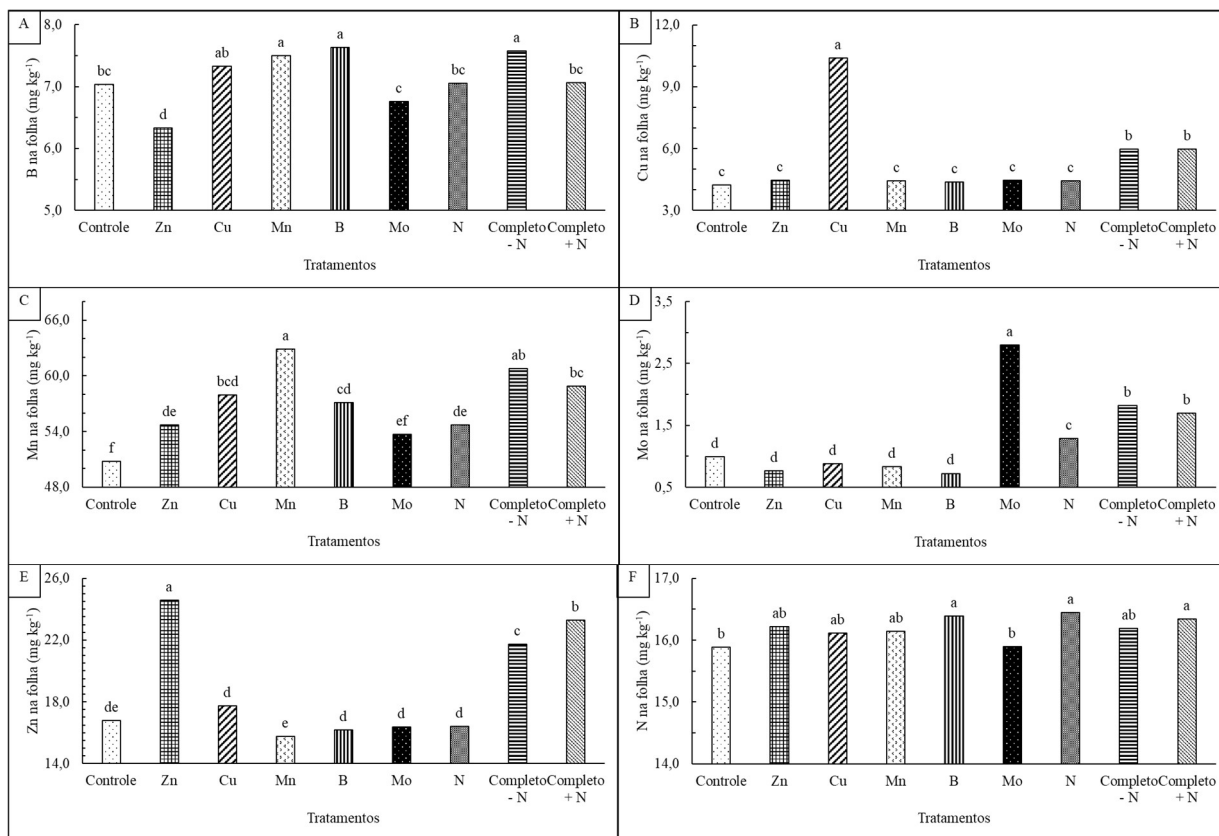


Figura 6. A) Concentração de B; B) Concentração de Cu; C) Concentração de Mn; D) Concentração de Mo; E) Concentração de N e F) Concentração de Zn na folha diagnóstica da cana-planta em função da aplicação foliar de micronutrientes e nitrogênio. Médias seguidas por letras iguais não se diferenciam pelo teste-t (LSD) ($p < 0,10$). ^{ns}= Não significativo.

Independentemente do local estudado, o teor de B nas folhas aumentou em média, 0,6 g kg⁻¹ em relação ao tratamento controle, com a aplicação isolada do micronutriente. Observou-se aumento no teor foliar de B em relação ao tratamento controle, também no tratamento Completo - N, no entanto quando se adicionou nitrogênio, o teor de B não diferiu do tratamento controle. O teor foliar de B com a aplicação de foliar de Cu e Mn, não apresentou diferença estatística em comparação aos tratamentos B e Completo - N. No entanto, a aplicação foliar isolada de Mo e Zn diminuíram o teor de B nas folhas. A aplicação foliar de Zn na cana-planta, reduziu inclusive o teor de B nas folhas em relação ao tratamento controle.

A análise conjunta indicou aumento significativo no teor de Cu em relação ao tratamento controle, principalmente com a aplicação isolada do micronutriente, que aumentou o teor de Cu em 145,86% em relação ao tratamento controle. Observou-se aumento no teor foliar de Cu também com a aplicação dos tratamentos completos, porém o incremento foi menor

em comparação ao tratamento controle. A aplicação isolada dos demais micronutrientes não interferiram no teor foliar de Cu na cana-planta em relação ao tratamento controle.

O teor foliar de Mn aumentou significativamente em relação ao tratamento controle com a aplicação foliar do micronutriente de forma isolada e conjunta com os demais nutrientes estudados (Completo - N), porém, quando adicionou-se na calda do tratamento Completo + N, observou-se na média geral de todos os locais estudados, diminuição no teor de Mn na folha diagnóstica. O incremento de Mn nesses tratamentos em relação ao tratamento controle foram 24 e 20%. A aplicação isolada dos demais micronutrientes também aumentou o teor foliar de Mn nas folhas da cana-planta em relação ao tratamento controle, exceto o tratamento com Mo.

A aplicação foliar de Mo aumentou significativamente os teores foliares do micronutriente em relação ao tratamento controle e demais tratamentos, tanto na forma isolada, quando na aplicação conjunta com os demais tratamentos. No entanto, observa-se na Figura 6A que a intensidade de aumento foliar de Mo nos tratamentos Completo - N e Completo + N foram significativamente menores que no tratamento isolado de Mo. O incremento de Mo nesses tratamentos em relação ao tratamento controle foram de 182, 84 e 71%.

A mesma tendência de resposta foi observada para o teor foliar de Zn na cana-planta. O teor de Zn na folha diagnóstica aumentou significativamente com a aplicação isolada, e dos tratamentos completo com e sem N. A aplicação isolada foi a que proporcionou o maior ganho, aumentando de 16,78 g kg⁻¹ no tratamento controle para 24,59 g kg⁻¹ no tratamento isolado. O tratamento completo aumentou o teor de Zn em 47% em relação ao tratamento controle, com a adição de N na calda esse aumento foi de 39%.

O teor foliar de N aumentou nas folhas com as aplicações isoladas dos tratamentos com B e N, e com a aplicação do tratamento Completo + N. Apesar disso, de maneira geral essas diferenças observadas na análise conjunta na prática não são significativas para o manejo da cultura.

Apesar dos incrementos observados nos teores foliares da cana-planta com a aplicação foliar de micronutrientes, não foram observadas correlações entre os teores foliares e os parâmetros agrônômicos e industriais determinados, exceto para Mo (Tabela 9). O aumento nos teores foliares de Mo correlacionaram-se negativamente com TCH e TAH.

Tabela 9. Correlação linear simples entre os teores foliares e os parâmetros de produtividade e qualidade industrial avaliados, média de todos os locais.

TCH					
N	Mn	Cu	Zn	B	Mo
0,38	0,44	-0,24	-0,08	0,35	-0,79*
ATR					
N	Mn	Cu	Zn	B	Mo
-0,02	0,02	0,11	0,28	0,45	0,06
TAH					
N	Mn	Cu	Zn	B	Mo
0,33	0,40	-0,13	0,02	0,49	-0,79*

* = significativos ao nível de 5%. TCH: Toneladas de Colmo por Hectare; ATR: Açúcar Total Recuperável; TAH: Toneladas de Açúcar por Hectare; N: Nitrogênio; Mn: Manganês; Cu: Cobre; Zn: Zinco; B: Boro e Mo: Molibdênio.

4.4 Análise de Viabilidade Econômica

Para auxiliar na interpretação dos resultados obtidos foi efetuada uma análise econômica com os resultados médios obtidos na análise conjunta dos dados, calculando-se o lucro obtido com a aplicação dos tratamentos em relação ao tratamento controle desconsiderando o custo da aplicação, pois estamos trabalhando com a aplicação quando utiliza-se da aplicação de fungicida na cultura, aproveitando-se desta operação (Tabela 9). Para o TCH, obteve-se retorno positivo com a aplicação foliar de Zn, Mn e B. Os lucros calculados para produção de cana crua no campo com esses tratamentos em relação ao tratamento controle, sem aplicação foliar de micronutrientes, foram respectivamente R\$ 194, R\$354 e R\$ 358. Para TAH, obteve-se retorno econômico positivo com a aplicação foliar dos tratamentos Mn, B, Zn e Completo - N. O maior lucro obtido foi com a aplicação isolada de B, R\$368, seguido do tratamento com Mn, R\$ 223 e Zn, R\$ 109. O tratamento Completo - N proporcionou o rendimento industrial positivo de R\$ 21. Cabe ressaltar, que a remuneração dos produtores de cana-de-açúcar no Brasil é baseada no TAH, portanto os lucros obtidos nesse parâmetro, refletem o que o produtor ganharia na realidade.

Tabela 10. Viabilidade econômica em função da aplicação foliar de micronutrientes e nitrogênio na cana-planta. Análise combinada dos resultados de 7 locais.

Tratamento	Dose§ kg ha ⁻¹	Custo Fertilizante§§ R\$	ΔTCH† t ha ⁻¹	ΔTAH†† t ha ⁻¹	Lucro Cana‡ R\$	Lucro TAH‡‡ R\$
Controle	-	-	-	-	-	-
Zn	0,30	7,60	2,9	0,2	194,47	108,92
Cu	0,35	22,70	-0,2	0,0	-36,63	-22,70
Mn	1,00	10,40	5,3	0,4	353,65	222,64
B	0,30	39,80	5,7	0,7	357,37	368,02
Mo	0,70	15,60	-3,8	-0,9	-280,38	-539,94
N	10,00	34,10	-0,8	-0,4	-89,84	-267,14
Completo - N	Todos	96,00	-0,7	0,2	-144,77	20,52
Completo + N	Todos	130,10	-0,7	-0,4	-178,87	-363,14

§: A quantidade necessária para fornecer as respectivas fontes de dose de micronutriente aplicada: sulfato de zinco hepta-hidratado (20,0%), sulfato de cobre penta-hidratado (26,0%), sulfato de manganês hepta-hidratado (26,0%), Ácido bórico (17%), molibdato de sódio (39,0%), e uréia (45%).

§§: Preços de fertilizantes fornecidos em outubro de 2020 (preço médio por dose de fertilizante utilizado em cada tratamento no período de 2019–2020).

†: ΔTCH diferença de produtividade entre o tratamento aplicado e o controle (R\$ 69,68 preço médio da tonelada de cana safra 2019/2020, compilado site www.udop.com.br).

††: ΔTAH diferença de produtividade entre o tratamento aplicado e o controle (R\$ 0,5826 preço médio do kg de açúcar na safra 2019/2020, compilado site www.udop.com.br).

‡: ΔTCH x 69,68 – Custo fertilizante.

‡‡: ΔTAH x 0,5826 – Custo fertilizante.

5 DISCUSSÃO

Atualmente não existem recomendações para adubação foliar publicadas nos principais boletins de adubação para a cultura de cana-de-açúcar no Brasil. Porém, essa é uma técnica que tem sido amplamente difundida no setor, sem a devida comprovação de eficácia científica. O presente estudo revelou respostas significativas da cana-de-açúcar à fertilização foliar com micronutrientes, com ganhos de produtividade em colmos e açúcar.

Analisando de forma geral a fertilidade do solo para a cultura da cana-de-açúcar se encontrava de média a alta em todos os locais (Tabela 5). Para os teores de micronutrientes, todos os locais apresentaram teores de médios a alto para Cu, Fe e Mn. Os locais 1, 2, 6 e 7 apresentaram teores baixos de B e o restante teores médios. Em relação ao Zn, os locais 1, 3 e 4 apresentaram teores baixos do micronutriente e os demais locais teores de médio a alto (Raij et al. 1996).

Em relação ao estado nutricional inicial da cana-de-açúcar em cada área experimental, os teores de Mn, Zn e Mo na folha diagnóstica estavam dentro da faixa considerada ideal a cultura antes da instalação em todos os locais (Tabela 6). Já para o Cu, apenas os locais 2, 3 e

6 apresentava teor adequado e o B em todos os locais o seu teor estava abaixo do considerado ideal para a cultura (Raij e Cantarella 1996).

De maneira geral, na média dos 7 locais estudados, a produtividade da cana-planta aumentou em 4,3 % com a aplicação foliar isolada de 0,30 kg ha⁻¹ de B e 1,00 kg ha⁻¹ de Mn. Embora não tenha diferido estatisticamente dos tratamentos controle e B e Mn, a produtividade da cana-planta aumentou em 2,3 % com a aplicação foliar de 0,70 kg ha⁻¹ de Zn. Este ganho de produtividade proporcionaria um lucro médio ao produtor de cana de 8, 5 e 3% respectivamente. Em contrapartida, os outros tratamentos não aumentaram a produtividade de colmos, mesmo os tratamentos completos, que receberam a aplicação de B, Mn e Zn, combinada com Cu (0,35 kg ha⁻¹), Mo (0,30 kg ha⁻¹) e N (10 kg ha⁻¹). Inclusive, a aplicação foliar isolada de 0,30 kg ha⁻¹ de Mo na fase de máximo desenvolvimento da cana-planta, diminuiu a produtividade de colmos em 3,2%, promovendo prejuízo financeiro.

Azeredo e Bolsanello (1981) estudaram através de uma rede de experimentos, o efeito de Zn, B, Cu, Mn e Mo, aplicados de forma isolada e conjunta, via solo e foliar, com e sem calagem na região sudeste brasileira. Foram aplicados 8,75 kg ha⁻¹ de Zn; 3,0 kg ha⁻¹ de B; 10,5 kg ha⁻¹ de Cu; 5,0 kg ha⁻¹ de Mn e 0,39 kg ha⁻¹ de Mo no sulco de plantio, e duas aplicações via foliar das seguintes concentrações, 1% de Zn e Cu; 1,5% de B; 2,0% de Mn e 0,02% de Mo. Os autores obtiveram aumento de até 27% na produtividade de colmos da cana-planta com a aplicação de Mn no tratamento sem aplicação de calcário, e de 10% com a aplicação isolada de Mo no tratamento com presença de calcário em dois locais. Além disso, de maneira geral, os autores não observaram diferenças entre as formas de aplicação dos micronutrientes, indicando que a aplicação via foliar pode ser tão eficiente quanto a aplicação via solo. No presente estudo, observamos que a aplicação foliar só apresentou resposta significativa com a aplicação de B e Mn, e em menor intensidade do que a observada por Azeredo e Bolsanello (1981). Essa menor intensidade de resposta observada pode estar relacionada ao momento da aplicação utilizada, acima de 150 dias após o plantio.

Queiroz et al. (2004), estudaram o efeito de aplicações foliares de micronutrientes em cana soca, na região de Piracicaba-SP, em um solo arenoso cultivado com a variedade RB 855156, utilizando como fonte óxidos micronizados em suspensão aos 110 dias após o corte da cana-de-açúcar, quando esta apresentava aproximadamente 1,1 m, e também não obtiveram respostas para TCH e ATR.

Em contrapartida, Mishra (2014) estudaram o efeito de aplicações foliares de micronutrientes em cana-de-açúcar cultivada em solo subtropical na Índia, e concluíram que três aplicações foliares isoladas de sulfato de Fe e Mn a 1%, no mês de maior perfilhamento

aumentou a produtividade e a qualidade industrial de colmos na cana-planta e soqueira. Jamro et al. (2002), estudando o efeito de aplicações foliares com doses crescentes de B (0,25; 0,50 e 0,75 kg ha⁻¹), Cu (0,50; 1,00 e 1,50 kg ha⁻¹), Mn (1,00; 2,00 e 3,00 kg ha⁻¹) e Zn (1,50; 3,00 e 4,50 kg ha⁻¹) subdivididas em duas épocas de aplicação, a primeira com a altura de 50 cm e a segunda com plantas acima de 75 cm de altura, no Paquistão, observaram aumento no tamanho de internódios, na altura, perfilhamento e produção de biomassa de cana-de-açúcar, com a aplicação das menores doses de Cu, Zn e Mn. Estes resultados indicam que a aplicação de alguns micronutrientes pode ter sido tardia no presente estudo.

Além disso, a falta de resposta à aplicação de alguns micronutrientes pode estar relacionada a teores baixos desses nutrientes no solo. Nesse caso, a aplicação foliar na época de máximo desenvolvimento, além de tardia, pode ser insuficiente para suprir a demanda da cana-planta. Lira (2018), conduziu uma pesquisa que demonstra que esta hipótese é possível. Em pesquisa conduzida em um argisolo na região de Dracena-SP, o autor estudou a interação da aplicação de doses de micronutrientes aplicados em conjunto no sulco de plantio, combinada ou não com a aplicação foliar de solução de micronutrientes contendo B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn em cana-planta e na primeira soqueira, e concluiu que na cana-planta não houve incrementos de TCH e ATR com a aplicação dos tratamentos. Em contrapartida, na primeira soqueira, a reaplicação foliar da solução contendo todos os micronutrientes aumentou o TCH em 6% e o ATR em 3 % em comparação às parcelas que receberam apenas aplicação de micronutrientes no sulco de plantio da cana-planta.

Outro fato que se deve destacar é a ausência de resposta à aplicação foliar conjunta de micronutrientes, haja visto, que a maioria dos fertilizantes foliares disponíveis no mercado para o uso dos produtores, normalmente são compostos por mistura de todos os micronutrientes.

Mellis et al. (2016), em estudo semelhante a esse, conduzido em 11 locais em solos tropicais brasileiros, obtiveram ganhos de até 16% com a aplicação isolada e em conjunto de 3 kg ha⁻¹ de B, 10 kg ha⁻¹ de Cu, Mn e Zn e 2 kg ha⁻¹ de Mo no sulco de plantio, especialmente com a aplicação isolada de Zn, Mn e Mo. Ainda nesse estudo, os autores concluíram que apesar da aplicação conjunta de todos os micronutrientes estudados no sulco de plantio ter aumentado a produtividade de colmos na cana-planta, a intensidade da resposta foi menor que a obtida com as aplicações isoladas. Além disso, os autores não obtiveram incrementos na qualidade industrial (ATR) em nenhum dos tratamentos.

Estudos conduzidos por Crusciol et al. (2021) utilizando a aplicação dos micronutrientes B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn (1,1; 4,0; 4,0; 5,2; 0,2 e 5,0 kg ha⁻¹) aplicados separadamente ou todos juntos no sulco de plantio, combinado ou não, com a utilização de torta

de filtro em solos tropicais brasileiros, obtiveram ganhos de até 10 t ha⁻¹ e 2 t ha⁻¹ em relação ao controle para toneladas de colmo e açúcar na cana planta. Os autores ainda concluíram que a aplicação de micronutrientes no sulco de plantio foi capaz de proporcionar efeito residual nas soqueiras, com altas respostas à aplicação de B e Zn, respostas intermediárias à aplicação de Cu, Mo e Mn e baixas respostas à aplicação de Fe.

Essa falta de resposta a aplicação conjunta de micronutrientes, se deve provavelmente ao excesso de sais aplicados com a mistura, e inibição competitiva. Além disso, o fato de os tratamentos completos não terem apresentado resposta neste estudo, pode ter sido devido a toxicidade por Mo, pois houve decréscimo de TCH com a aplicação isolada desse micronutriente.

Como o Mo atua diretamente nas enzimas nitrato redutase e nitrogenase, vários autores sugerem que a administração adequada desse micronutriente é importante para aumentar a fixação e assimilação de N na cana-de-açúcar (Sobral e Weber 1983; Orlando Filho et al. 2001; Boddey et al. 2003). Vieira (2015), realizou um estudo avaliando doses crescentes de Mo que variaram de 0,3 a 2,4 kg ha⁻¹ em cana-planta, aplicadas de duas formas, no sulco de plantio, e nas folhas aos 120 dias após a brotação da variedade RB 867515, e verificaram que as duas formas de aplicação aumentaram a produtividade de colmos da cana-planta, concluindo que para a aplicação foliar a dose de Mo ideal foi de 0,3 kg ha⁻¹. Acima dessa dosagem houve decréscimos de produtividade, mas ainda assim, o TCH obtido nas dosagens superiores foram maiores que no tratamento controle, sem aplicação de Mo.

Rengel et al. (2011), estudaram a extração e exportação de micronutrientes na variedade RB 855035 e observaram que o maior acúmulo de Mo se dá após 273 dias de cultivo, e que o acúmulo total de Mo foi de 33,4 g ha⁻¹. Além disso, os autores concluíram que a partir de 200 dias, o molibdênio se concentra mais nas folhas do que nos colmos. A dose aplicada nesse estudo foi de 0,30 kg ha⁻¹ de Mo, sendo a adubação foliar efetuada em média após 200 dias do plantio, ou seja, muito próximo a época de acúmulo máximo, o que pode ter provocado toxicidade na cana-planta.

Santos et al. (2019), estudaram o efeito da aplicação combinada de N e Mo no sulco de plantio da cana-de-açúcar em duas variedades, RB 867515 e RB 92759 e obtiveram ganhos de produtividade de colmos e de açúcar de 21% com a aplicação de 0,2 kg ha⁻¹ de Mo. Porém, o efeito positivo da aplicação de Mo ocorreu apenas na variedade RB 867515, o que indica que a resposta a adubação com esse micronutriente varia conforme o material genético cultivado. No presente estudo, a variedade RB 867515 foi empregada em apenas um local, isto pode explicar a falta de resposta à adubação molibídica.

Outra hipótese a ser considerada é a toxicidade por sódio. A fonte de Mo utilizada nesse foi o molibdato de sódio, Wahid (2004) estudou o efeito salino de NaCl em duas variedades de cana-de-açúcar no Paquistão, e verificou que o excesso de sais, principalmente a partir do período de máximo crescimento e na época de maturação afeta a produtividade de colmos. Segundo o autor, nas plantas que apresentaram teores maiores de Na nas folhas, ocorreu a diminuição do turgor e aumento da prolina livre, reduzindo o transporte de sacarose nos caules, seguido do aumento da atividade sucrolítica nos internódios, resultando na diminuição do rendimento da cana-de-açúcar.

Apesar dos tratamentos completos não terem aumentado a produtividade de colmos, a qualidade industrial, ATR (Açúcar Total Recuperável), na cana-planta aumentou 1,6 % com a aplicação do tratamento Completo - N.

Recentemente, diversos autores não observaram incrementos significativos no ATR com a aplicação de micronutrientes em cana-de-açúcar no Brasil (Siqueira et al. 1979; Benett 2011; Teixeira Filho et al. 2013; Mellis et al. 2016; Lira 2018; Cavalli 2020; Crusciol et al. 2021).

Segundo Lira (2018), o aumento da produção de açúcar está muito mais atrelado ao aumento de produção de colmos promovido pela aplicação de micronutrientes do que pelo aumento na concentração de açúcares. O TAH aumentou 4% com a aplicação isolada de B em relação ao controle (Figura 9). A aplicação de Zn e Mn isolada, assim como o tratamento Completo - N, apresentaram respostas intermediárias, promovendo incrementos de TAH de 2, 1 e 1% respectivamente.

O B tem função importante no metabolismo de carboidratos, na translocação e acúmulo de açúcares, além de atuar diretamente na divisão, maturação e diferenciação celular (Dechen et al. 2018). Razões essas que tem levado ao uso de B como maturador de crescimento em cana-de-açúcar mediante a aplicação foliar antecedendo a colheita.

A aplicação de B via solo traz dificuldades devido à baixa quantidade em que o nutriente é requerido, e a estreita faixa entre a essencialidade e a toxicidade que este micronutriente apresenta. Recentemente alguns autores relataram fitotoxicidade com a aplicação via solo que ocasionaram perdas de produtividade em cana-de-açúcar (Mellis et al. 2016, Franco et al. 2011, Orlando Filho et al. 2001). Além disso, Franco et al. (2009), avaliando o aproveitamento do ácido bórico na cana-planta através da aplicação via solo por meio de boro marcado, observaram que a recuperação do fertilizante foi em torno de 2% pela cultura, indicando baixa eficiência do fertilizante.

A adubação com B resultou em respostas positivas no TCH e TAH com a aplicação de 0,3 kg ha⁻¹ de B via foliar na forma de ácido bórico, com ganhos na rentabilidade econômica do canavial de 5% por hectare. Leite et al (2009), estudaram a aplicação foliar de maturadores comerciais, em comparação com a aplicação de KNO₃ + B em cana-de-açúcar, e concluíram que a aplicação de B nas folhas aumentou o TAH, propiciando maior retorno econômico por hectare, o que explica a resposta da cana-planta a aplicação desse micronutriente aos 200 dias após o plantio.

O fornecimento foliar de Mn acarretou ganhos médios econômicos de 4,1 % por hectare em relação ao tratamento controle o segundo maior ganho econômico. Similarmente, Mishra et al. (2014) obteve respostas positivas com a aplicação foliar de Mn em estudo realizado na Índia. No entanto, os autores testaram a aplicação de Mn juntamente com a adição de N. A adição de Mn juntamente com o N não apresentou resposta positiva nas condições estudadas, podendo ter sido influenciado pela presença dos demais nutrientes, que acarretou o excesso de sais para a planta.

Apesar do Zn ter proporcionado em média ganhos econômicos de 2% por hectare, na média geral o efeito da aplicação de 0,7 kg ha⁻¹ de Zn nas folhas na forma de sulfato de Zn na época de máximo crescimento, pode não ter suprido a demanda da cana-planta pelo micronutriente. O Zn atua no enraizamento, perfilhamento, crescimento e alongação celular na cana-de-açúcar (Mellis et al. 2018), portanto o suprimento adequado desse micronutriente é vital para o bom desenvolvimento da cultura. A grande maioria dos locais estudados apresentavam baixos teores disponíveis de Zn no solo, o que sugeri que a aplicação tardia não seja suficiente para promover o máximo desenvolvimento possível da cana-planta.

Estudos recentes conduzidos em solos calcários no Paquistão e nos EUA, apresentaram aumentos expressivos com a aplicação combinada de Zn no e nas folhas de cana-de-açúcar. Panhwar et al. (2003), estudaram o efeito da aplicação de doses de NPK, com e sem aplicação de 10 kg ha⁻¹ de Zn via solo, e com e sem aplicação foliar de 1,5 kg ha⁻¹ de Zn via foliar em solos calcários e concluíram que a aplicação concomitante de Zn via solo e via foliar aumentou a produtividade da cana adubada com doses mais altas de NPK, em até 14 t ha⁻¹. Wang et al. (2005), aplicando as doses de 0; 4,4; 8,9; 17,9; e 33,8 kg ha⁻¹ no sulco de plantio e 1,3 kg ha⁻¹ via foliar de sulfato de Zn em solos ácidos e calcários dos Estados Unidos da América, obtiveram incrementos na produção de cana-de-açúcar nas doses 4,4 e 8,9 kg ha⁻¹, via solo, e na qualidade industrial dos colmos com a aplicação foliar.

Queiroz et al. (2004), estudaram o efeito de aplicações foliares de micronutrientes em cana soca, em solo arenoso deficiente em Zn, e concluíram que a aplicação de 675 g ha⁻¹ de Zn

não interferiu na produtividade e atributos tecnológicos da cana-de-açúcar, nas condições estudadas. Cavalli (2020), estudando a interação da calagem e a adubação com Zn no solo em cana-planta, concluiu que a aplicação de 10 kg ha⁻¹ de Zn no sulco de plantio aumenta consideravelmente a produtividade da cana, tornando a calagem mais eficiente. Esses resultados indicam que as respostas da cana-planta à aplicação foliar de Zn nos solos tropicais brasileiros, podem ser superiores, se efetuada em conjunto com a aplicação no solo, especialmente em solos com baixos teores disponíveis no solo desse importante micronutriente.

Apesar da aplicação foliar conjunta de todos os micronutrientes ter propiciado ganhos em ATR, observando-se o retorno econômico calculado em função do TAH, verifica-se que a margem de lucro em relação ao tratamento controle, sem aplicação foliar de micronutrientes foi muito pequena. Isso pode ter acontecido devido a inibição competitiva ou até mesmo dosagens elevadas de alguns micronutrientes, como o Cu e Mo.

A aplicação de N via foliar tem o potencial de proporcionar uma maior absorção do nutriente, podendo acarretar o incremento da produtividade da cana-de-açúcar (Trivelin et al. 1988). De maneira geral, as formulações de fertilizantes foliares disponíveis no mercado para a cana-de-açúcar, contêm N na mistura com micronutrientes. Essa mistura é justificada pela aplicação foliar ser eficiente para nutrir as plantas com N, e pelo fato de a ureia, aumentar a absorção dos micronutrientes (Boaretto et al. 1999). Trevelin et al. (1988) mostrou que mais de 50% do N na forma de ureia aplicado via foliar é absorvido em até 6 horas após a aplicação e rapidamente translocado para outros órgãos da planta. Devido a rápida absorção e facilidade de translocação do N na forma de ureia, esperava-se que o fornecimento isolado de N, assim como a aplicação de N com os demais nutrientes avaliados fossem responsáveis por acarretar respostas positivas para a cultura. No entanto, tanto a suplementação de N individual como o tratamento Completo + N, não trouxeram respostas em produtividade, gerando prejuízos de R\$ 267 e 363 por hectare, respectivamente. Em um trabalho robusto realizado por Otto et al. (2020), onde foi avaliada a adubação nitrogenada em cana-de-açúcar em 25 locais com épocas de aplicação diferente, os autores concluíram que a época de aplicação e colheita da cana-de-açúcar, influencia na resposta ao nitrogênio. No geral após a aplicação as concentrações foliares de N também ficaram abaixo da faixa considerada ideal para a cultura que é de 18 a 25 g kg⁻¹ (Raij et al. 1996).

Apesar da cana-planta responder a aplicação foliar de micronutrientes, aumentando a produtividade de colmos e qualidade industrial, especialmente com a aplicação de B, Mn e Zn, de maneira geral, não foram observadas correlações positivas entre teores foliares e essas variáveis. Embora as aplicações foliares tenham proporcionado aumento nos teores de

micronutrientes nas folhas diagnósticas, de maneira geral os incrementos foram baixos para a maioria dos nutrientes aplicados. Os baixos incrementos, ou até mesmo o não aumento dos teores de micronutrientes nas folhas, pode ser ocasionado por um efeito de diluição desses nutrientes na planta, sendo este efeito caracterizado quando a taxa de crescimento relativo de matéria seca é superior à taxa de absorção relativa do nutriente (Fontes, 2001).

Com relação ao B, embora tenha sido observado incrementos foliares, especialmente quando o micronutriente foi aplicado isoladamente os teores foliares estão abaixo da faixa considerada adequada para a cultura, de 10 a 30 mg kg⁻¹ de B (Raij et al. 1996), mesmo nas amostras que receberam aplicação foliar de ácido bórico. Mellis et al. (2016), em uma rede de experimentos semelhante a essa, estudaram o efeito da aplicação de 3 kg ha⁻¹ de B no sulco de plantio em cana-planta e verificaram que os teores B na folha, apesar de aumentar não atingiram o nível foliar adequado.

De maneira geral a observação de teores foliares abaixo do nível crítico pode ser explicado devido ao efeito de diluição, ou seja, com a adubação as plantas se desenvolvem mais, e com o maior crescimento a concentração de nutrientes é diluída na planta (Jarrell e Beverly 1981).

Outro fator que pode explicar esses valores é a época de amostragem. No presente estudo as folhas foram coletadas um mês após a aplicação dos tratamentos, quando os canaviais ultrapassavam os 9 meses de idade. Orlando Filho et al. (1979), estudaram a influência da época de amostragem no teor foliar de Fe em cana-planta e concluíram que a partir dos 9 meses há uma tendência de queda nos teores foliares de nutrientes na cana-planta. Segundo dados compilados por Reis Junior e Monserat (2002), as maiores concentrações foliares de micronutrientes em cana-de-açúcar são observados em folhas diagnósticas amostradas aos 4 meses após a brotação.

Em relação ao teor de Cu nas folhas, observa-se que a aplicação foliar do micronutriente, seja na forma isolada, ou em conjunto com os demais nutrientes estudados, aumentaram o teor de Cu, mantendo as plantas com níveis adequados de concentração foliar para a cultura, que é de 6 a 15 mg kg⁻¹ de Cu (Raij et al, 1996).

Em contrapartida, apesar da aplicação foliar de Mn e Zn, ter promovido incrementos nos teores foliares desses micronutrientes na cana-planta com a aplicação dos mesmos, observou-se nesse estudo que de maneira geral, todos os tratamentos apresentam teores foliares de Mn e Zn adequados segundo Raij et al (1996). Estudos recentes com adubação de Mn e Zn em cana-de-açúcar apresentaram resultado semelhantes (Benett et al. 2012, Teixeira Filho et al. 2013, Mellis et al. 2016; Cavalli, 2020, Nicchio et al. 2020).

Segundo Raij et al. (1997), a faixa de Mo considerada ideal para a cultura é de 0,05 a 0,20 mg kg⁻¹. No presente estudo o valor médio em todos os locais no tratamento controle, sem aplicação de Mo, encontra-se acima da faixa considerada adequada. Com a aplicação foliar de Mo, seja isolado ou combinado com os demais nutrientes estudados os teores foliares de Mo ultrapassaram 1,5 mg kg⁻¹, chegando a 2,5 mg kg⁻¹ com a aplicação isolada de molibdato de sódio, 1150% acima do teor limite. Outros autores também observaram teores foliares superiores a faixa considerada adequada em experimento com adubação de molibdênio em cana-de-açúcar (Mellis et al. 2016; Vieira 2015; Santos et al. 2019), isso indica que essa faixa considerada adequada por Raij et al. (1997), precisa ser revista. Essa discrepância de valores se deve provavelmente a escassez de estudos com Mo em cana-de-açúcar no período em que foi determinada a faixa adequada para a cultura. Além disso, a metodologia utilizada na determinação de Mo tanto no presente estudo, quanto nos estudos conduzidos por Mellis et al (2016) e Vieira (2015), utilizaram uma metodologia adaptada de Polidoro et al (2007), no qual as leituras são feitas em ICP-OES, que tem uma precisão de determinação de Mo, muito maior que nos espectrômetros de absorção atômica.

De maneira geral, embora a aplicação dos tratamentos completos, com e sem N, terem proporcionado aumento nos teores de todos os micronutrientes estudados em relação ao tratamento controle, verifica-se que com a aplicação conjunta o incremento nos teores de B, Cu, Mn, Mo e Zn foram menores quando comparados com os resultados observados nas plantas que receberam aplicações isoladas de cada micronutriente. Esse resultado evidencia a inibição competitiva de absorção foliar entre os micronutrientes nas condições estudadas.

Apesar da aplicação foliar apresentar algumas desvantagens em relação à aplicação via solo, bem como não proporcionar efeito residual em cortes consecutivos, a aplicação via foliar, permite uma distribuição mais uniforme dos micronutrientes, menor taxa de aplicação e resposta imediata da planta ao fertilizante aplicado (Jabran et al. 2011).

Devido principalmente ao desempenho operacional, muitos produtores têm adotado na prática a aplicação via foliar de micronutrientes em cana-de-açúcar, porém informações científicas sobre doses, fontes e épocas de aplicação de micronutrientes via foliar, assim como a eficiência dessa tecnologia, praticamente são inexistentes e pouco conclusivas. Portanto, a realização de pesquisas como essa, que visam compreender o efeito da aplicação desses elementos na produtividade da cultura, bem como, embasar recomendações de adubação aos produtores, são de elevada importância e precisam ser realizados com maior frequência no mundo todo.

6 CONCLUSÕES

Nas condições estudadas, com a aplicação de micronutrientes na fase de máximo crescimento da cana-planta, pode-se concluir que:

- As aplicações isoladas e em conjunto aumentam os teores de micronutrientes na folha diagnóstica;
- As aplicações isoladas de B e Mn na cana planta, proporcionam os maiores ganhos de produtividade de colmos e qualidade industrial;
- A aplicação conjunta de micronutrientes com N diminui a produtividade de colmos e qualidade industrial.
- A aplicação conjunta de foliar sem N melhora a qualidade industrial da cana-de-açúcar.
- A aplicação de micronutrientes via foliar isolada de B, Mn e Zn e a aplicação Completa - N aumentam a rentabilidade econômica da cana-planta.

7 REFERÊNCIAS

- Abreu, C. A. de e Raij, B. van. (1997). Adubação com micronutrientes. In: Raij, B. van; Cantarella, H., Quaggio, J. A. e Furlani, A. M. C. (Eds). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. Ed. Campinas: Instituto Agrônômico. (Boletim Técnico no 100).
- Andrade, L.A.B., Casagrande, A.A., Vitti, G.C. e Perecin. D. (1995). Efeitos das aplicações de fritas e de fontes solúveis de boro, cobre e zinco, via solo, na cultura da cana de açúcar (*Saccharum spp*), variedade SP 70-1143. STAB, 13, 5, 21–27.
- Alvarez, R. e Wutke, A. C. P. (1963). Adubação da cana-de-açúcar IX – Experimentos preliminares com micronutrientes. *Bragantia*, 22, 51, 647-650. <https://www.scielo.br/pdf/brag/v22nunico/59.pdf>.
- Alvarez, R., Wutke, A. C. P., Arruda, H. V. e Godoy Jr., G. (1979). Adubação da cana-de-açúcar XV – Experimentos com micronutrientes nas regiões canavieiras do Estado de São Paulo. *Bragantia*, 38, 03, 19-23. <https://www.scielo.br/pdf/brag/v38n1/03.pdf>.
- Azeredo, D. F. e Bolsanello, J. (1981). Efeito de micronutrientes na produção e na qualidade da cana-de-açúcar no Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais (Zona da Mata) – estudo preliminar. *Brasil Açucareiro*, 93, 3, 9-17.

- Bataglia, O. C., Furlani, A. M. C., Teixeira, J. P. F., Furlani, P. R. e Gallo, J. R. (1983). Métodos de análise química de plantas. Campinas: Instituto Agrônômico. (Boletim Técnico, 78).
- Benett, C. G. S. Doses e fontes de manganês na cultura da cana-de-açúcar. 2011. 69 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.
- Benett, C. G. S., Buzetti, S., Silva, K. S., Teixeira Filho, M. C. M., Garcia, C. M. P. e Andreotti, M. (2012). Fontes e doses de manganês no acúmulo de nutrientes na palhada em cana-de-açúcar. *Bioscience Journal*, 28, 1, 8-16. <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/12436/8341>.
- Benett, C. G. S.; Buzetti, S.; Silva, K. S., Teixeira Filho, M. C. M.; Costa, N. R.; Maeda, A. S. e Andreotti, M. (2013). Acúmulo de nutrientes no colmo de cana-de-açúcar em função de fontes e doses de manganês. *Semina: Ciências Agrárias*, 34, 3, 1077-1088. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n3p1077>.
- Boaretto, A. E., Schiavinato Neto, P., Muraoka, T., Oliveira, M. W. e Trivelin, P. C. O. (1999). Fertilização foliar de nitrogênio para laranjeira em estágio de formação. *Scientia Agricola*, Piracicaba, 56, 3, 621-626. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161999000300015>.
- Boddey, R. M., Urquiaga, S., Alves, B. J. e Reis, V. M. 2003. Endophytic nitrogen fixation in sugarcane: present knowledge and future applications. *Plant and Soil*, 252, 1, 139-149.
- Bordonal, R. O., Carvalho, J. L. N., Lal, R., Figueiredo, E. B., Oliveira, B. G. e La Scala, N. 2018. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38, 2, 1-23. <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>.
- Cambria, S., Boni, P. S. e Strabelli, J. (1989). Estudos preliminares com micronutrientes-zinco. *Boletim Técnico Coopersucar*, 46, 12-17.
- Cantarella, H. e Raij, B. van e Quaggio, J.A. (1998). Soil and plant analyses for lime and fertilizer recommendations in Brazil. *Communications soil science and plant analysis*. 29, 1691-1706. <https://doi.org/10.1080/00103629809370060>.
- Carvalho, V. L., Cunha, R. L. e Silva, N. R. N. (2012). Alternativas de controle de doenças do café. *Coffee Science*, 7, 1, 42-49. <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/7886>.
- Cavalli, E. Interação entre calagem e adubação com zinco em cana-de-açúcar. 107 p. (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônômico de Campinas- IAC - Campinas.
- Clements, H. F. 1980. Sugarcane crop logging and crop control: principles and practices. Hawaii, University Press of Hawaii.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento e Conab. (2020). Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar V.7 - SAFRA 2020/21 - N.3 - Terceiro levantamento, Dezembro 2020. Acessado em 28/12/2020, Brasília, <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>.

Costa Filho, R.T. e Prado, R.M. (2008). Zinco na nutrição e na produção de colmos da terceira soqueira de cana-de-açúcar cultivada em um Latossolo Vermelho Amarelo. STAB - Açúcar, Alcool e Subprodutos, 26, 36–41.

Crusciol, C. A. C. McCray, J. M. Campos, M. Nascimento, C. A. C. Rossato, O. B. Adorna, J. C e Mellis, E. V. (2021). Filter Cake as a Long-Standing Source of Micronutrients for Sugarcane. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 21, 813–823. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00403-x>.

Dechen, A. R., Nachtigall, G. R., Carmello, Q. A. C., Santos, L. A. e Sperandio, M. V. L. (2018). Micronutrientes. In: Fernandes, M. S., Souza, S. R. e Santos, L. A. (Ed.). Nutrição Mineral de Plantas. Viçosa: SBCS.

EMBRAPA. (2006). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos.

Fageria, N. K., Baligar, V. C. e Clark. R. B. (2002). Micronutrients in crop production. Adv. Agron, 77, 185–268. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)77015-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)77015-6).

Farias, C. H. A., Fernandes, P.D., Gheyi, H. R. e Dantas Neto., J. (2009). Qualidade industrial de cana de açúcar sob irrigação e adubação com zinco, em Tabuleiro Costeiro paraibano. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 13, 419–428.

Franco, H. C. J., Trivelin, P. C. O., Vitti, A. C., Otto, R., Faroni, C. E.; Tovajar, J. G. (2009). Utilization of (¹⁰B) derived from fertilizer by sugar cane. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 33, 1667-1674.

Franco, H. C. J., Mariano, E., Vitti, A. C., Faroni, C. E., Otto, R. e Trivelin, P.C.O. (2011). Sugar cane response to boron and zinc in Southeastern Brazil. Sugar Technol, 13, 86–95. <https://doi.org/10.1007/s12355-010-0057-x>.

Fontes, P.C.R. Diagnóstico do estado nutricional das plantas. Viçosa: UFV, 2001. 122 p.

Gallo, J. R., Hiroce, R. e Alvarez, R. 1968. Levantamento do estado nutricional de canaviais do Estado de São Paulo pela análise foliar. Bragantia, 27, 3, 365-382.

Gonçalves, J. R. P., Ramos, N. P., Filizola, H. F., Andrade, C. A. de, Packer, A. P. e Vieira, H. B. (2013). Micronutrientes em solos cultivados com cana de açúcar em sistema plantio direto por diferentes períodos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. Ciência do solo: para quê e para quem: anais. p. 1-4. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Jabran, K., Cheema, Z. A., Farooq, M. e Khan, M. B. (2011). Fertigation and foliar application of fertilizers alone and in combination with *Brassica campestris* L. extracts enhances yield in wheat crop. Crop Environ, 2, 42-45.

Jamro, G. H., Kazi, B. R., Oad, F. C., Jamali, N. M. e Oad, N. L. (2002). Effect of Foliar Application of Micronutrients on the Growth Traits of Sugarcane Variety Cp-65/357 (Ratoon Crop). Asian Journal of Plant Sciences, 1, 462-463.

- Jarrel, W. M.; Beverly, R. B. (1981). The dilution effect in plant nutrition studies. *Advances in Agronomy*, 34, 197-224.
- Kaiser, B. N., Gridley, K. L., Brady, J. N., Phillips, T. e Tyerman, S. D. (2005). The role of molybdenum in agricultural plant production. *Annals of Botany Company*, 96, 745–754. <https://doi.org/10.1093/aob/mci226>.
- Kannan, S. e Ramani, S. (1978). Studies on molybdenum absorption and transport in bean and rice. *Plant Physiol*, 62, 179–181. <https://doi.org/10.1104/pp.62.2.179>.
- Korndörfer, G. H., Benedini, M., Rocha, A. C. e Ferreira Neto, D. A. (1995). Avaliação de três variedades de cana (*Sacharum Officinarum*) submetidas à adubação com micronutrientes. *STAB*, 14, 1, 23–26.
- Leite, G. H. P., Crusciol, C. A. C., Silva, M. A., Venturini Filho, W. G. e Suriano, A. (2009). Qualidade tecnológica, produtividade e margem de contribuição agrícola da cana-de-açúcar em função da aplicação de reguladores vegetais no início da safra. *Ciência Rural*, Santa Maria, 39, 3, 726-732.
- Lira, M. V. S. (2018). Adubação de plantio e foliar com micronutrientes na produção da cana-de-açúcar. 87 p. (Mestrado em Ciência e Tecnologia Animal) - Faculdade De Ciências Agrárias E Tecnológicas, Unesp – Campus Dracena, Dracena.
- Malavolta, E. (1981). Manual de Química Agrícola. Adubos e adubação. 3. ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres.
- Malavolta, E. (1990). Micronutrientes na adubação da cana de açúcar In: Seminário sobre micronutrientes. CIAT, Cali.
- Malavolta, E., Vitti, G. C. e Oliveira, S.A. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações, 2. Ed., Piracicaba: POTAFÓS.
- Marinho, M. F. e Albuquerque, G. A. C. (1981). Efeito do cobre e do zinco na produção de cana de açúcar em solos de tabuleiros de Alagoas. *Brasil Açucareiro*, 98, 6, 41–50.
- Marschner, H. (1995). Mineral Nutrition of Higher Plants, 2. Ed., Londres, Academic Press.
- Marschner P. (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants, 3rd edn. Waltham, Massachusetts, USA: Academic Press.
- Melarato, M., Panobianco, M., Vitti, G. C. e Vieira, R. D. (2002). Manganês e potencial fisiológico de sementes de soja. *Ciência Rural*, 32, 1069-1071. <http://dx.doi.org/10.1590/S010384782002000600025>.
- Mellis, E. V. M, Quaggio, J. A.; Cantarella, H. (2008). Micronutrientes. In: Dinardo-Miranda, L. L., Vasconcellos, A. C. M. e Landell, M. G. A. (eds) Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônômico.

- Mellis, E. V., Quaggio, J. A., Becari, G. R. G., Teixeira, L. A. J., Cantarella, H. e Dias, F. L. F. (2016). Effect of micronutrients soil supplementation on sugarcane in different production environments. *Cane Plant Cycle. Agronomy Journal*, 108, 2060–2070.
- Mellis, E. V., Quaggio, J. A., Cantarella, H., Teixeira, L. A. J. e Cavalli, E. (2018). Nutrição e adubação da cultura da cana de açúcar: Micronutrientes. In: Prado, R. M. e Campos, C. N. S. (Ed.). *Nutrição e adubação de grandes culturas*. Jaboticabal: UNESP.
- Mishra, A. K., Shukla, S. K., Yadav, D. V., Awasthi, S. K. (2014). Iron, Manganese and Sulphur uptake and nutrients availability in sugarcane based system in subtropical India. *Sugar Tech*, 16, 300-310.
- Nicchio, B; Santos, G. A.; Lino, A. C. M.; Ramos, L. A.; Pereira, H. S.; Korndörfer, G. H. (2020). Efeito da adubação foliar em soqueira de cana-de-açúcar. *Acta Iguazu*, 9, 2, 10-24. <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v9i2.23042>.
- Orlando Filho, J. e Zambello Junior, E. (1977). Diagnose foliar de cobre, ferro, manganês e zinco, em 16 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) cultivadas em diferentes grandes grupos de solos. *Brasil açucareiro*, 93, 4, 28- 37.
- Orlando Filho, J. (1982). Importância dos micronutrientes na cultura da cana-de-açúcar. *Álcool e açúcar*, 3, 2, 18-21.
- Orlando Filho, J. e Zambello Junior, E. (1983). Diagnose foliar. In: Orlando Filho, J. (Ed.). *Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil*. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR.
- Orlando Filho, J., Macedo, N. e Tokeshi, H. (1994). Seja doutor do seu canavial. *Informações Agrônomicas*. Piracicaba: POTAFÓS. 67, 1-16.
- Orlando Filho, J., Rosseto, R. e Casagrande, A. A. (2001). Cana-de-açúcar. In: Ferreira, M.E., Cruz, M. C. P., Raij, B. e Abreu, C. A. (Eds). *Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura*. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS.
- Otto, R., Souza-Netto, G. J. M., Ferraz-Almeida, R., Altarugio, L. M. e Favarin, J. L. (2021). Multisite response of sugarcane to nitrogen rates and splitapplication under Brazilian field conditions. *Agronomy Journal*, 113, 419–435.
- Panhwar, R. N., Keerio, H. K., Memon, Y.M., Junejo, S., Arain, M. Y., Chohan, M., Keerio, A. R. e Abro, B. A. (2003). Response of Thatta-10 sugarcane variety to soil and foliar application of zinc sulphate ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) under half and full doses of NPK fertilizer. *Journal of Applied Sciences*, 3, 4, 266-269. <https://doi.org/10.3923/jas.2003.266.269>.
- Polidoro, J. C. Medeiros, A. F. A. Xavier, R. P. Medeiros, J. A. Boddey, R. M. Alves, J. R. e Urquiaga, S. (2006). Evaluation of techniques for determination of molybdenum in sugarcane leaves. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37, 1-2,77-91.
- Queiroz, F. E. C., Otto, R., Alves Filho, R. N. R., Packer, L. A., Quintino, T. A., e Vitti, G. C. (2004). Avaliação da adubação foliar com micronutrientes (cobre, manganês e zinco) na cultura da cana-de-açúcar. In *Agropecuária; resumos*. São Paulo: USP.

- Raij, B. van. e H. Cantarella. (1996). Outras Culturas Industriais. In: Raij, B. van., Cantarella, H., Quaggio, J.A. e Furlani, A. M. C. editores, Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Boletim 100. 2. Instituto Agrônômico, Campinas.
- Raij, B. van, Cantarella, H., Quaggio, J. A. e Furlani, A. M. C. (1996). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônômico. (Boletim Técnico no 100).
- Raij, B. van, Andrade, J. C., Cantarella, H. e Quaggio, J. A. (2001). Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas Instituto Agrônômico.
- Reghenzani, J. R. (1990). The effect of zinc deficiency as a factor limiting sugarcane growth. Final Report to Sugar Research Council, Project BS14S. BSES, Brisbane.
- Reis Junior, R. A. e Monnerat, P. H. Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes, RJ (2002). Revista Brasileira de Ciencia do Solo, 26, 367-372.
- Reisenauer, H. M. (1963). The effect of sulfur on the absorption and utilization of molybdenum by peas. Soil Science Society of America Journal, 27, 5, 553-555. <https://doi.org/10.2136/sssaj1963.03615995002700050025x>.
- Santos, R. L., Freire, F. J., Oliveira, E. C. A., Trivelin, P. C. O., Freire, M. B. G. S., Bezerra, P. C., Oliveira, R. I. e Santos, M. B. C. (2019). Changes in biological nitrogen fixation and natural-abundance N isotopes of sugarcane under molybdenum fertilization. Sugar Tech, 21,6, 925-935.
- Silva, C. G. M., Moreira, S.G., Lupp, R. M., Castro, G. F., Rehagro, B.H. A. e Silva. A. A. P. (2018). Doses de molibdênio na produtividade do milho. Rev. Agroambiental, 10, 1, 47-55. <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v10n120181067>.
- Siqueira, J. O., Silveira, J. F. e Guedes, G. A. A. (1979). Efeito de micronutrientes na presença e ausência de calcário no rendimento agrícola e qualidade do caldo de cana de açúcar (cana-planta). Brasil Açucareiro, 94, 5, 77-80.
- Sobral, A. F. e Weber. H. (1983). Nutrição mineral de cana de açúcar (micronutrientes). In: J. Orlando Filho, editor, Nutrição e adubação da cana de açúcar no Brasil. IAA/PLANALSUCAR, Piracicaba.
- Spironello, A., Raij, B. van, Penatti, C. P., Cantarella, H., Morelli, J.L., Orlando Filho, J., Landell, M. G. de A. e Rossetto, R. (1996). Cana-de-açúcar. In: Raij, B. van, Cantarella, H., Quaggio, J. e Furlani, Â. M. C. (eds.) BOLETIM TÉCNICO 100 - Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo -2. ed.
- Sultanum, E. (1972). Considerações sobre a sintomatologia de micronutrientes em cana-de-açúcar. Brasil Açucareiro, 83, 2, 1-15.
- Taiz, L. e Zeiger, E. (2004). Fisiologia Vegetal. Trad. Santarém, R. E. et al. 3. ed. Porto Alegre: Artmed.

Tanimoto, T. (1964). The press method of cane analysis. Hawaiian Planter's Record, 51, 2, 133-150.

Teixeira Filho, M. C. M., Buzettil, S., Garcia, C.M. de P., Benett, C. G. S., Rodrigues, M. A. de C., Maestrello, P. R., Celestrino, T. de S. e Gazola, R. de N. (2013). Qualidade tecnológica e produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar submetida a adubação com zinco. Semina: Ciências Agrárias, 34, 603-1614.

Trivelin, P. C. O., Carvalho, J. G., Silva, A. Q., Primavesi, A. C. P. A., Camacho, E., Eimori, I. E. e Guilherme, M. R. (1988). Adubação foliar de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): absorção e translocação de ureia. Energia Nuclear e Agricultura, 92, 52-65.

UDOP – União Nacional da Bioenergia. Etanol - O mais rico e renovável do mundo. Acessado em 28/02/2021, Araçatuba, <https://www.udop.com.br/noticia/2020/01/07/o-mais-rico-e-renovavel-do-mundo.html>.

Vieira, R. C. (2015). Doses E Formas De Aplicação De Molibdênio Em Cana-De-Açúcar. 91p. (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) Instituto Agrônomo de Campinas-IAC, Campinas.

Vitti, G. C. e Mazza, J. A. (2002). Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura da cana-de-açúcar. In: Informações Agronômicas, n.97, Piracicaba.

Wahid, A. (2004). Analysis of toxic and osmotic effects of sodium chloride on leaf growth and economic yield of sugarcane. Botanical Bulletin of Academia Sinica, 45, 133-141.

Wang, J. J., Kennedy, C. W., Viajator, H. P., Arceneaux, A. E. e Guidry, A. J. (2005). Zinc fertilization of sugarcane in acid and calcareous soils. Journal American Society Sugar Cane Technologists, 25, 49-61.

ANEXOS



Figura 7. Detalhes do preparo das garrafas com as soluções contendo os tratamentos para as aplicações.



Figura 8. Aplicação dos tratamentos nas parcelas e o detalhe nas folhas aplicadas.



Figura 9. Comparativo de altura das plantas no dia da instalação em diferentes áreas.



Figura 10. Amostragem de solo na área experimental.



Figura 11. Amostragem foliar na área experimental.



Figura 12. Lavagem, escorrimento e secagem das folhas em laboratório.



Figura 13. Amostragem de colmos de colmos para análise de qualidade industrial.



Figura 14. Detalhes da colheita mecanizada das parcelas.

