

BORO E ZINCO NO SULCO DE PLANTIO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

FERNANDA FORLI MARANGONI

BORO E ZINCO NO SULCO DE PLANTIO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

FERNANDA FORLI MARNAGONI

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia. Área de Concentração: Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Sérgio Tiritan

633.31
M311b

Marangoni, Fernanda Forli.

Boro e zinco no sulco de plantio na cultura da cana-de-açúcar / Fernanda Forli Marangoni – Presidente Prudente, 2016.

(77)f.: il.

Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade do Oeste Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2016.

Bibliografia.

Orientador: Carlos Sérgio Tiritan

1. Cana-de-açúcar. 2. Adubação. 3. Micronutrientes. I. Título.

FERNANDA FORLI MARANGONI

BORO E ZINCO NO SULCO DE PLANTIO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Tese apresentada Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Presidente Prudente, 11 de novembro de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Sérgio Tiritan

Unoeste - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Prof. Dr. Eduardo Zavaschi

ESALQ/USP – Escola Superior de Agricultura “Luíz de Queiroz” – Piracicaba (SP)

Prof. Dr. Godofredo César Vitti

ESALQ/USP – Escola Superior de Agricultura “Luíz de Queiroz” – Piracicaba (SP)

Prof. Dr. José Eduardo Creste

Unoeste - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Prof. Dr. Tiago Aranda Catuchi

Unoeste - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

DEDICO

Aos meus pais, Emílio e Lígia, à Dona Marlene e aos meus irmãos, Luís e Fábio.

Por mais que eu tentasse, as palavras jamais expressariam toda minha gratidão. Muito obrigada pelo carinho, exemplo de vida e dedicação durante toda a vida! Sinto-me privilegiada por tê-los aqui nessa etapa da minha caminhada.

OFEREÇO

Pedro Luís e Maria Helena,

Meus tesouros, vocês foram minha inspiração! A cada brilho nos olhos, a cada sorriso, me davam coragem para acreditar que iria valer a pena! Em muitos momentos precisei me ausentar. Sempre correndo, atrasada, atrapalhada, mas espero que, um dia, tenham a compreensão da importância dessa etapa em minha vida. Meu coração esteve sempre com vocês.

*Grande é a poesia,
A bondade e as danças ...
Mas o melhor do mundo
São as crianças.*

Fernando Pessoa.

Marco Aurélio,

Foram muitas as provações. Mas você sempre me apoiou de maneira incondicional. Nos momentos mais difíceis estive ao meu lado me dando força, me incentivando e me ensinando a acreditar que eu seria capaz. Quando ameaçava fraquejar, com o olhar você me dizia: continue acreditando em você! Você acreditou em mim! Através de você, me encontrei! Você me ensinou a olhar para dentro. Ensinou-me a despertar! As melhores coisas da vida, não podem ser vistas, nem tocadas, mas sentidas pelo coração. Te amo muito!

*Quem olha para fora, sonha.
Quem olha para dentro, desperta.*

C. G. Yung.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho, ontem sonho, hoje realidade, tornou-se possível, graças à cooperação, dedicação de muitas pessoas, em especial aquelas que aqui relaciono:

À Deus, por me proporcionar a vida, me guiando e acompanhando por toda minha existência.

Ao Prof. Dr. Carlos Sérgio Tiritan, pelo sua amizade e orientação.

Ao Prof. Dr. Godofredo César Vitti, por todo seu apoio, dedicação e conhecimento. Sua participação foi fundamental para elaboração do trabalho.

Ao amigo Dr. Valter Casarin. Agradeço pela fundamental contribuição na elaboração da tese e, principalmente pela sua amizade.

À UNOESTE, pela oportunidade e pelo brilhante trabalho realizado através do ensino, pesquisa e extensão.

Aos ex-alunos de graduação da Unoeste que integraram o grupo de estagiários: Edmilson Willian, Paulo, Daniel, Dário, Joicielle e Rafael. Agradeço por toda colaboração e aprendizagem que tivemos nesse período.

À Usina Alto Alegre, pela ajuda técnica, cuidados com área experimental e auxílio no campo, nas pessoas de Ricardo, Edson, e Vagner, André e Acielnio.

À Sandra Gonçalves Gustineli por sua competência, profissionalismo e carinho. Seu apoio foi imprescindível. Muito obrigada.

Às amigas Fernanda Latanze e Lílian Francisco A. de Souza pela amizade, paciência e auxílio nas análises estatísticas.

À Keid Kruger, dona Cida, Viviane, e Luciane por toda ajuda e suporte ao longo desses quatro anos, permitindo assim as atividades burocráticas e laboratoriais referentes ao meu trabalho.

À Natália Barros de Oliveira. Sempre com palavras otimistas e muitas “mãozinhas”. O seu apoio e amizade me ajudaram a alcançar essa realização.

À Michele Mogni pelo auxílio e orientação na estruturação e correções bibliográficas.

A todas as pessoas que não foram mencionadas, mas que auxiliaram de alguma forma a confecção deste trabalho.

RESUMO

Boro e zinco no sulco de plantio na cultura da cana-de-açúcar

A determinação dos teores adequados de adubação com micronutrientes é fundamental para que a cultura possa expressar todo seu potencial produtivo, já que participam de funções vitais no metabolismo das plantas, participando de compostos responsáveis por processos metabólicos e/ou fenológicos. Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a resposta da cana-de-açúcar (*Saccharum officinalis*) à adubação com micronutrientes (boro e zinco) em solos de baixa fertilidade, buscando estabelecer seus teores nutricionais adequados. O delineamento experimental foi blocos ao acaso, em esquema fatorial (3 x 4) considerando a aplicação de três doses de ácido bórico (17% B) visando fornecer 0, 1,0 e 2,0 kg ha⁻¹ de boro e quatro doses de sulfato de zinco (20% Zn) para o fornecimento de 2,0; 4,0 e 6,0 kg.ha⁻¹ de zinco. A área experimental constava, portanto, de três blocos com doze unidades experimentais, totalizando 36 parcelas. Para a verificação dos resultados foi analisado o estado nutricional da planta (diagnose foliar), as análises de solo, os indicadores de qualidade tecnológica e de produção da cana-de-açúcar. Através da avaliação dos resultados dos teores de micronutriente foliares e no solo nota-se que não houve relação direta entre os teores foliares da cultura da cana-de-açúcar e diferentes tratamentos aplicados durante a condução do experimento. Os atributos tecnológicos (Fibra, Brix, Pol e ATR) não foram influenciados significativamente pela adubação com boro e zinco. Em cana-planta as maiores produtividades foram atingidas pela aplicação de 2,0 kg ha⁻¹ de zinco representado pelo tratamento 2, e no tratamento 10, com aumento respectivo de 6% e 10%.

Palavras-chave: Adubação, ácido bórico, sulfato de zinco e produtividade.

ABSTRACT

Boron and zinc in the planting furrow in the culture of sugarcane

The determination of the appropriate levels of fertilization with micronutrients is essential for the culture to express its full productive potential, since they participate in vital functions in the metabolism of plants, participating in compounds responsible for metabolic and / or phenological processes. This research aims to evaluate the response of sugarcane (*Saccharum officinalis*) to fertilization with micronutrients (boron and zinc) in low fertility soils, in order to establish their adequate nutritional content. The experimental design was randomized blocks, in a factorial scheme (3 x 4) considering the application of three doses of boric acid (17% B) to provide 0, 1.0 and 2.0 kg ha⁻¹ of boron and four doses of zinc sulfate (20% Zn) for the supply of 2.0; 4.0 and 6.0 kg.ha⁻¹ of zinc. The experimental area consisted, therefore, of three blocks with twelve experimental units, totaling 36 plots. In order to verify the results, the nutritional status of the plant (foliar diagnosis), soil analysis, indicators of technological quality and sugarcane production were analyzed. Through the evaluation of the results of the micronutrient contents foliar and in the soil it is noticed that there was no direct relation between the leaf contents of the sugarcane culture and different treatments applied during the conduction of the experiment. The technological attributes (Fibra, Brix, Pol and ATR) were not significantly influenced by the fertilization with boron and zinc. In cane-plant the highest yields were reached by application of 2.0 kg ha⁻¹ of zinc represented by treatment 2, and in treatment 10, with a respective increase of 6% and 10%.

Keywords: Fertilizer, boric acid, zinc sulfate and productivity.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Teores adequados de micronutrientes em tecido foliar de cana-de-açúcar.....	21
Tabela 2	Extração de micronutrientes pela cultura da cana-de-açúcar para produção de 100 toneladas de colmos.....	21
Tabela 3	Resultado da análise química de solo realizada na área experimental em duas profundidades (0-25 e 25-50), para atributos químicos de rotina.....	35
Tabela 4	Resultado da análise química de solo dos micronutrientes, realizada na área experimental em duas profundidades (0-25 e 25-50), para atributos químicos de rotina.....	35
Tabela 5	Tratamentos utilizados na área experimental com respectivas doses de nitrogênio, fósforo, potássio, boro e de zinco (kg ha^{-1})	37
Tabela 6	Teores médios de micronutrientes encontrados nas folhas de cana-de-açúcar em razão dos tratamentos.....	46
Tabela 7	Teores médios para boro e zinco na cana-soca em razão dos tratamentos.....	47
Tabela 8	Equações de regressão e R^2 para os teores de boro (mg kg^{-1}) nas folhas de cana, em cana-planta e cana-soca.....	48
Tabela 9	Resultados dos contrastes entre médias dos teores foliares para boro para cana-planta e para cana-soca.....	48
Tabela 10	Equações de regressão e R^2 para os teores de zinco (mg kg^{-1}) nas folhas de cana, em cana-planta e cana-soca.....	50
Tabela 11	Resultados dos contrastes entre médias dos teores foliares de zinco para cana-planta e para cana-soca.....	50
Tabela 12	Médias encontradas no solo em razão das doses de boro e zinco.....	52
Tabela 13	Teores médios de boro e zinco observados através dos resultados na interação entre boro e zinco (2013).....	53
Tabela 14	Resultados dos contrastes entre valores médios de pH do solo.....	54
Tabela 15	Equações de regressão e R^2 para resultados dos teores de boro (mg dm^{-3}) no solo para cana-planta e para cana-soca.....	55
Tabela 16	Resultados dos contrastes entre valores médios de boro do solo.....	55
Tabela 17	Equações de regressão e R^2 para resultados dos teores de zinco (mg dm^{-3}) no solo para cana-planta e para cana-soca.....	57
Tabela 18	Resultados dos contrastes entre valores médios de zinco do solo.....	57
Tabela 19	Valores encontrados para os indicadores da qualidade tecnológica em cana-de-açúcar após os tratamentos com doses de boro e zinco na colheita de 2013.....	58
Tabela 20	Valores encontrados para os indicadores da qualidade tecnológica em cana-de-açúcar após os tratamentos com doses de boro e zinco (2014).....	59
Tabela 21	Médias das produtividades da cana-de-açúcar (t ha^{-1}) para cana-planta e para cana-soca.....	62
Tabela 22	Equações de regressão e R^2 para resultados dos valores de TCH (t ha^{-1}) para cana-planta e cana-soca.....	63

Tabela 23	Resultados dos contrastes entre valores médios de produtividade da cana-de-açúcar (TCH).....	63
-----------	--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Dados pluviométricos mensais entre os anos de 2012 e 2014 (mm).....	34
Figura 2	Croquis da área experimental total e da parcela.....	38
Figura 3	Cana-soca da área experimental.....	38
Figura 4	Aplicação manual dos fertilizantes N – P – K no sulco de plantio da cana-de-açúcar.....	39
Figura 5	Terço médio das folhas de cana-de-açúcar coletadas na área experimental.....	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1	Panorama atual da cultura da cana-de-açúcar.....	17
2.2	Micronutrientes e sua essencialidade.....	17
2.2.1	Importância e função dos micronutrientes Boro e Zinco.....	18
2.2.2	Recomendação de micronutrientes para a cultura da cana.....	19
2.3	Caracterização do elemento Boro.....	22
2.3.1	Boro no solo.....	23
2.3.2	Boro na cana-de-açúcar.....	24
2.4	Caracterização do elemento Zinco.....	27
2.4.1	Zinco no solo.....	28
2.4.2	Zinco na cana-de-açúcar.....	31
2.4.3	Caracterização do sistema vegetal.....	32
3	OBJETIVO.....	33
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
4.1	Caraterização do local.....	34
4.1.1	Dados pluviiais.....	34
4.1.2	Aspectos químicos do solo.....	35
4.2	Delineamento experimental e tratamentos.....	36
4.3	Instalação e condução do experimento.....	38
4.4	Avaliações realizadas.....	40
4.4.1	Determinação dos teores de micronutrientes foliares.....	40
4.4.2	Caracterização química do solo na colheita.....	41
4.4.3	Indicadores da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar.....	41
4.4.3.1	Pol.....	42
4.4.3.2	Pureza do caldo.....	43
4.4.3.3	Fibra.....	43
4.4.3.4	Açúcar teórico recuperável.....	43
4.4.3.5	Produtividade.....	44
4.5	Análise estatística.....	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1	Avaliação do estado nutricional da planta e o efeito das doses de Boro e Zinco na adubação da cana-de-açúcar.....	46
5.1.1	Boro na folha.....	48
5.1.2	Zinco na folha.....	49
5.2	Atributos químicos do solo.....	51
5.2.1	pH do solo.....	53
5.2.2	Boro no solo.....	54
5.2.3	Zinco no solo.....	54

5.3	Indicadores da qualidade tecnológica em cana-de-açúcar.....	56
5.3.1	Fibra.....	57
5.3.2	Brix.....	58
5.3.3	ATR.....	58
5.3.4	Pol.....	59
5.4	Indicadores da produtividade em cana-de-açúcar.....	61
6	CONCLUSÃO.....	65
	REFERÊNCIAS.....	67
	ANEXOS.....	72

1 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar participa de uma das atividades mais rentáveis da economia nacional que culmina com a produção de açúcar, etanol e de seus subprodutos, como a energia co-gerada a partir da queima do bagaço. Os resíduos de produção (vinhaça e a torta de filtro) têm sido cada vez mais utilizados como fertilizantes com bons resultados para a agricultura. A produção de cana-de-açúcar na safra 2016/17 terá acréscimo de 3,8% em relação à safra passada. Em números absolutos estima-se uma produção de 691 mil toneladas de cana-de-açúcar, ante as 665,6 mil toneladas na safra 2015/16 (CONAB, 2016).

O significativo aumento em produtividade é resultado de melhorias contínuas em diversos aspectos da produção, tais como o aperfeiçoamento dos tratamentos fitossanitários, a utilização de variedades melhoradas, o aprimoramento de práticas culturais e o emprego racional de corretivos e fertilizantes. Embora a cana-de-açúcar possa ser produzida em diversos tipos de solo, os rendimentos diminuem à medida que as características de solo vão se afastando daquelas consideradas adequadas. Vários fatores podem influenciar o desenvolvimento da cana-de-açúcar, principalmente atributos químicos do solo.

De acordo com Silva et al. (2014), o cultivo da cana-de-açúcar em áreas de solos com características ácidas e de baixa fertilidade limita o potencial da produtividade e qualidades de seus produtos. Com relação ao aumento da área cultivada, a cultura se disseminou em todos os estados brasileiros, nos mais diferentes solos, muitas vezes com características distintas dos padrões ideais. Embora a cana-de-açúcar seja uma planta muito rústica, a economicidade de sua produção agroindustrial é gradativamente prejudicada à medida que as características ambientais tornam-se mais adversas. Lavouras estão sendo implantadas em solos com menor fertilidade, ou seja, solos que não apresentam condições adequadas quanto às características químicas para a cana-de-açúcar. Portanto, cada vez mais, torna-se necessária a adequada nutrição mineral para a obtenção de produtividades elevadas. Com variedades cada vez mais produtivas, aumenta-se, ainda mais, a necessidade de adubações bem dimensionadas, para que carências nutricionais não se tornem limitantes e a cultura possa expressar seu potencial produtivo.

Com a intensificação dos ciclos produtivos, mesmo em áreas tradicionais, com solos mais férteis, as reservas de micronutrientes nos solos estão se exaurindo, principalmente devido à generalização na prática de uso de fertilizantes minerais concentrados, sem reposição de micronutrientes que são removidos com as colheitas.

A atividade das formas iônicas dos micronutrientes que geralmente são absorvidas pelas plantas em condições de solos bem aerados e a concentração das mesmas, são dependentes do pH do solo. A atividade dos elementos metálicos (Zinco, Cobre e Manganês) e a atividade do boro, em solução, é diminuída com o aumento do pH, o que favorece a adsorção dos mesmos à fase sólida do solo, ou sua precipitação na forma de óxidos de Ferro, Cobre e Manganês, tornando-os indisponíveis para a nutrição das plantas (BATAGLIA, 1988). Camargo, Valadares e Dechen (1982) demonstraram que, de maneira geral, os teores de cobre, ferro, manganês e zinco, solúveis em DTPA, de solos do estado de São Paulo, diminuíram com o aumento do pH aplicação de calcário.

A adubação adequada da cana-de-açúcar requer o fornecimento equilibrado de macro e micronutrientes. Quanto aos micronutrientes denota-se a relevância do boro por participar de vários processos do metabolismo vegetal. Sendo assim, sua deficiência causa rápida inibição na formação de novos tecidos, em razão da função que exerce na composição da parede celular e na integridade da membrana plasmática (CAKMAK; RÖMHELD, 1997), na divisão celular (DECHEN; HAAG; CARMELLO, 1991). Os micronutrientes apresentam funções vitais no metabolismo das plantas, participando de compostos responsáveis por processos metabólicos e/ou fisiológicos, sendo fundamentais para o adequado desenvolvimento da cana-de-açúcar, pois resultam em aumento da resistência às pragas e doenças, maior produtividade, melhor qualidade tecnológica e ampliam a longevidade dos canaviais. A importância dos micronutrientes é evidenciada quando se observa que apesar de apresentarem taxas de extração do solo relativamente baixas, quando comparadas com as de macronutrientes, possuem fundamental importância ao desenvolvimento adequado da cultura. Reduções na produtividade e até morte das plantas são consequências naturais advindas de desarranjos nos processos metabólicos que podem ser ocasionados pelas carências de micronutrientes (ORLANDO FILHO, 1993).

Dentre os micronutrientes, a suplementação nutricional com boro e zinco, cobre e manganês, tem sido prática comum na região nordeste e vem sendo considerada cada vez mais importante nas regiões canavieiras do sudeste, considerando-se os teores baixos, ou muito baixos, evidenciados usualmente durante as análises de solo nestas regiões.

Apesar de bem estabelecida, há necessidade desta suplementação, existindo lacuna na literatura a respeito dos teores e doses mais adequados de micronutrientes para que a cultura possa expressar todo o seu potencial produtivo. Assim, o presente trabalho avaliou resposta da cana-de-açúcar em relação às adubações com os micronutrientes boro e zinco, em solos de baixa fertilidade, através da avaliação dos teores nutricionais encontrados nas folhas, solo e na produtividade, tanto para cana-planta quanto o efeito residual na cana-soca.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Panorama atual da cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar ocupa atualmente cerca de 8,8 milhões de hectares agricultáveis do país, sendo 60% localizado no estado de São Paulo. Na safra 2015/2016, a produção nacional de cana-de-açúcar atingiu a marca de 665,6 milhões de toneladas, o que confere ao Brasil o título de maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, título que deve perdurar por muitos anos, pois essa cultura encontra-se em plena expansão em todo território nacional. Apesar desses números expressivos, a produtividade média da cana-de-açúcar estimada para a safra 2016/17 é de 76,152 t ha⁻¹. A redução de 1% é devido queda de produtividade no Centro-Sul, onde as lavouras da safra anterior tiveram, na sua maioria, produtividades recordes. A expectativa é de produtividades próximas do normal (CONAB, 2016).

Para que o Brasil continue sendo líder nesta cultura é necessário utilizar tecnologia de ponta para produzir em quantidade e com qualidade (BECARI, 2010). Para o incremento na produção e na produtividade, da produção de etanol quanto de açúcar, torna-se necessário aperfeiçoamento no programa nutricional da cultura e das práticas agrícolas, que envolvem a calagem, adubação, rotação de culturas, adubação verde e adubação com micronutrientes (MELLIS; QUAGGIO; CANTARELLA, 2008). Segundo Vitti e Mazza (2002), para otimizar o potencial da cultura de cana-de-açúcar torna-se essencial o planejamento das diversas etapas de sua cadeia produtiva.

2.2 Micronutrientes e essencialidade

A essencialidade dos micronutrientes para as plantas ocorre em razão da sua participação como cofator funcional, estrutural ou regulador de grande número de enzimas (MARSCHNER, 1995). Portanto, a falta de micronutrientes significa queda na produtividade e, conseqüente perda na qualidade dos produtos, podendo limitar as plantas no cumprimento de seu ciclo de vida. Segundo Malavolta (1980), todos os elementos essenciais devem estar presentes nos tecidos das plantas, mas nem todos os elementos presentes são essenciais.

Apesar de haver variabilidade na necessidade de cada um dos elementos e dessa quantidade ser diferente entre as espécies, todas as plantas requerem quantidades mínimas de cada um deles. Segundo Raij (2001) a necessidade de aplicação de micronutrientes em culturas ressalta um aspecto conhecido, que é a diferença entre espécies e variedades quanto às necessidades e aproveitamento. Para a avaliação de micronutrientes é fundamental se considerar a especificidade da cultura para tratar de valores individualizados adequados para sua nutrição. Isso demonstra que cada tipo de solo, de acordo com a quantidade de micronutrientes disponíveis mostra maior aptidão ao cultivo de determinadas culturas, a menos que o fornecimento desses micronutrientes seja suprido.

A essencialidade de um elemento quando a concentração deste está abaixo de um limite crítico leva à diminuição da resistência da planta a qualquer fator estressante, seja biótico ou abiótico. Epstein e Bloom (2006) apresentaram conceitos para definir a essencialidade. De acordo com os autores um elemento é essencial se preenche pelo menos um dos critérios: "(1) O elemento é parte de uma molécula que é um componente intrínseco da estrutura ou do metabolismo da planta; (2) A planta severamente privada do respectivo elemento exhibe anormalidades em seu crescimento, desenvolvimento ou reprodução, isto é, seu desempenho quando comparada com plantas desenvolvidas sem privação dos menos".

Os micronutrientes exercem funções específicas na vida das plantas embora, eventualmente, possa haver certo grau de compensação entre eles (MALAVOLTA, 2006), sendo indispensáveis à vida vegetal, já que sem eles, as plantas não conseguem completar o seu ciclo de vida. Desta maneira pode-se afirmar que os micronutrientes são extremamente importantes, pois se enquadram nos critérios de essencialidade na nutrição mineral das plantas.

2.2.1 Importância e funções dos micronutrientes Boro e Zinco

Os micronutrientes são elementos imprescindíveis para as plantas, pois participam de compostos responsáveis pela ativação enzimática e processos metabólicos. Esses nutrientes são fundamentais para o crescimento das plantas, para a resistência às doenças e, conseqüentemente, para obter maior produtividade.

Os micronutrientes são: Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni) e Zinco (Zn).

A cultura da cana-de-açúcar necessita de todos os macros e micronutrientes para que possa expressar seu potencial produtivo e, quando indisponível, seu fornecimento torna-se necessário via adubações. As baixas concentrações dos micronutrientes, quando comparadas às concentrações dos macronutrientes, refletem sua função como ativadores de reações enzimáticas e constituintes de grupos prostéticos em metaloproteínas. Nos grupos prostéticos, os micronutrientes catalisam processos redox por transferência de elétrons, principalmente os elementos de transição Fe, Mn, Cu e Mo. Os micronutrientes Fe e Zn ligam as enzimas aos substratos através da formação de complexos enzimáticos. Vários micronutrientes, tais como, Mn, Zn e Cu, estão presentes nas isoenzimas superóxido dismutase (SD), as quais agem como sistemas de varredura para erradicar radicais de oxigênio tóxicos de modo a proteger as biomembranas, o DNA, a clorofila e as proteínas. Para os não metais B e Cl, não há nenhuma enzima ou outros compostos orgânicos essenciais bem definidos que utilizem esses micronutrientes, entretanto, o B é constituinte essencial das paredes celulares.

Os resultados do estudo conduzido por Moraes, Moraes e Moreira (2002), mostraram que a deficiência de B resulta em mudanças na estrutura da parede celular, com o inchaço das paredes e formação de células pequenas e com formato irregular, menor deposição de lignina nos elementos do xilema. Estudos de partes de plantas deficientes em B mostraram deslignificação das paredes das células do esclerênquima (MARSCHNER, 1995).

2.2.2 Recomendação de micronutrientes para a cultura da cana

De acordo com Casarin, Villa Nova e Forli (2006) para efetuar adequada recomendação de adubação, deve-se levar em consideração aspectos importantes como: histórico da área, análise de solo, diagnose foliar e diagnose visual. Desta maneira, busca-se estabelecer a necessidade nutricional da cultura, de modo a atender essa necessidade, através da aplicação de fertilizantes (macro e micronutrientes). A finalidade é melhorar o potencial produtivo da cultura, permitindo que essa expresse seu potencial genético, preservando o sistema solo-planta.

Para quantificar o teor de nutrientes nas plantas, é fundamental a análise de tecidos, realizada através da análise das folhas da cultura. É fundamental saber qual folha deverá ser coletada. Amostra-se a folha fisiologicamente madura (folha diagnóstica), pois essa irá caracterizar o estado nutricional da cultura que, analisada juntamente com os resultados da análise de solo, permitirá a verificação do estado nutricional da cana-de-açúcar. Entretanto, os teores foliares podem ter variações devido a fatores como a idade (cana-planta ou soqueira), variedade cultivada, parte da folha coletada, época de amostragem, entre outros. De maneira geral, em termos de exportação de micronutrientes pelos colmos da cana-de-açúcar tem-se a seguinte ordem decrescente: $Fe > Mn > Zn > Cu > B > Mo$. De acordo com Trani, Hiroce e Bataglia (1983), deve-se coletar a folha +1, ou seja, a primeira folha que estiver com o “colarinho” visível (lígula totalmente aberta).

Com a crescente demanda para aumentar a produtividade e longevidade dos canaviais, há maior dependência do fornecimento de nutrientes para as plantas, situação essa agravada quando se considera o avanço da cana-de-açúcar nas regiões com baixa fertilidade dos solos e/ou solos degradados. Portanto, para fazer a recomendação para fornecimento de micronutrientes na cultura da cana-de-açúcar é fundamental a realização da análise de solo assim como a análise foliar para avaliar corretamente o estado nutricional da planta e determinar a disponibilidade de micronutrientes no solo. Para a realização das análises é fundamental seguir as recomendações de amostragens de solo e folha, previamente estabelecidos, a fim de assegurar que através da amostragem, se consiga representar características desejáveis (químicas e/ou físicas para solo) e químicas para tecido vegetal.

O fornecimento dos micronutrientes às plantas pode ser realizado de três formas: via solo, via toletes, via herbicida (boro) e via foliar.

É fundamental conhecer a quantidade de nutrientes que será extraída e exportada pela planta a cada ciclo. Assim, o fornecimento de micronutrientes para a cana-de-açúcar deve seguir às necessidades extraídas pela cultura para seu adequado desenvolvimento. Raij e Cantarella (1996) sugerem as faixas de teores de micronutrientes adequados para cana-de-açúcar, conforme observados na Tabela 1.

Tabela 1. Teores adequados de micronutrientes em tecido foliar de cana-de-açúcar.

MICRONUTRIENTES					
B	Cu	Fe	Mn	Zn	Mo
..... mg kg ⁻¹					
10-30	6-15	40-250	25-250	10-50	0,05-0,20

Fonte: Espironello (1996).

Orlando Filho (1993) e Mavolta (1982) apresentaram teores extraídos de micronutrientes pela cana-de-açúcar para produção de 100 toneladas de colmos, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2. Extração de micronutrientes pela cultura da cana-de-açúcar para produção de 100 toneladas de colmos.

Órgão	Extração para 100 t ha ⁻¹ de Colmos					
	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Mo*
	----- g 100 t ⁻¹ -----					
Colmos	149	234	1.393	1.052	369	1,00
Folhas	86	105	5.525	1.420	223	----
Total	235	339	6.918	2.472	592	1,00

Fonte: Orlando Filho, 1993.(Mo* Malavolta, 1982).

Vitti, Oliveira e Quintino (2005), ressaltam que alguns dos motivos que podem propiciar a falta de resposta à adubação com micronutrientes são: (a) presença suficiente de macronutrientes no solo, (b) o calcário e os adubos utilizados nas práticas corretivas podem conter micronutrientes em sua composição, (c) a utilização de subprodutos orgânicos (composto, torta-de-filtro, vinhaça e outros materiais orgânicos) podem fornecer os micronutrientes à cultura.

Para aplicação de micronutrientes via solo é importante o uso de fontes sólidas, como oxissulfatos e fritas (FTE). Para aplicação de micronutrientes de fontes fluidas, utilizam-se fertilizantes na forma de sais solúveis ou quelatizados. A aplicação de micronutrientes, via foliar, é realizada para o fornecimento de nitrogênio juntamente com o molibdênio. A utilização de micronutrientes via toletes é tecnologia nova de aplicação de nutrientes junto com defensivos na atividade denominada “cobrição” dos toletes. Essa atividade proporciona distribuição homogênea de nutrientes no solo, com melhor fornecimento ao sistema radicular.

Em sistemas com cultivo de cana-de-açúcar, Tokeshi (1991), acrescenta que a disponibilidade dos micronutrientes é influenciada pela correção da acidez do solo, pela variedade, pela água disponível e pelas atividades dos microrganismos.

Mais recentemente, Mellis, Quaggio e Cantarella (2008), em locais correspondentes à 13 usinas no estado de São Paulo, observaram respostas positivas pela aplicação via solo dos micronutrientes: zinco, molibdênio, cobre, boro e manganês.

2.3 Caracterização do elemento Boro

O Boro (B) é um elemento que possui número atômico 5 e massa atômica de 10,811. O intemperismo de rochas contendo B, como boracita ($Mg_3B_7O_{13}Cl$), bórax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), colemanita ($Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$), turmalina $[(Na,Ca)(Al,Fe,Mg)3Al_6(BO_3)3Si_6O_{18}(OH)_4]$ e ulexita ($NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$), origina principalmente o ácido bórico não ionizado em solução (H_3BO_3), que pode migrar através da água de drenagem. Portanto, segundo Raij (1991), o boro é elemento de alta mobilidade geoquímica e, por essa razão, acumula-se nos oceanos, que apresentam teores médios acima de $4,0 \text{ mg L}^{-1}$.

O trabalho de Power e Woods (apud YAMADA, 2000), fornece informações relacionadas ao boro, com grande implicação prática. Segundo os autores a absorção de potássio aumenta com a presença do boro, ou seja, muitos casos de deficiência aparente de potássio podem ser de fato, deficiência de boro. O boro tem papel importante no transporte de fósforo (P) através das membranas e, assim, como ocorre com o K, muitos casos de deficiência de P podem ser, na verdade, o reflexo da deficiência de boro. O boro e o zinco são essenciais para o funcionamento adequado da ATPase e dos sistemas redox da membrana plasmática, ou seja, sem boro pode haver redução da eficiência de zinco e vice-versa.

Em várias culturas observou-se que a deficiência de boro tem efeito significativo sobre a produção até quando não há sinais visuais de deficiência e mesmo quando a concentração de boro está na faixa adequada em virtude da importância desse elemento à nutrição da planta (PERICA et al., 2001; ASAD; BLAMEY; EDWARDS, 2003). Devido à sua imobilidade no floema, em muitas

espécies, o boro tem que ser suprido continuamente, pois, sua baixa disponibilidade no solo comumente afeta o crescimento e produtividade das plantas. O intervalo entre os limites de deficiência e toxicidade de doses de boro é muito estreito, portanto, de acordo com Dechen e Nachtigal (2006), a toxicidade de boro pode ser tão grave quanto a sua deficiência. Segundo Marschner (1995), o limite crítico para toxicidade de B na matéria seca de folhas varia acentuadamente entre espécies: 100 mg kg⁻¹ para soja e milho; 400 mg kg⁻¹ para pepino; 1.000 mg kg⁻¹ para abobrinha. Em bananeira, teores de boro acima de 25 mg kg⁻¹ na matéria seca das folhas, ocasionam sintomas de clorose e necrose nas margens do limbo foliar, onde ocorrem altas concentrações do nutriente (MOREIRA, 1999).

O boro (B) participa de vários processos do metabolismo vegetal de forma que sua deficiência causa rápida inibição na formação de novos tecidos, em razão da função que exerce na composição da parede celular e na integridade da membrana plasmática (CAKMAK; KURZ; MARSCHNER, 1995). Assim como na divisão celular (DECHEN; HAAG; CARMELLO, 1991), na alongação celular, no metabolismo e transporte de carboidratos, na organização e funcionamento das membranas na germinação de grãos de pólen e no crescimento do tubo polínico.

2.3.1 Boro no solo

No solo as formas em que o B pode ser encontrado são: minerais primários como turmalina e micas ricas em B; minerais secundários, principalmente dentro da estrutura das argilas; adsorvido às argilas, na superfície de hidróxidos e na matéria orgânica; em solução como ácido bórico e como borato; bem como na matéria orgânica e biomassa microbiana (SHORROCKS, 1997). Para Alleoni, Camargo e Casagrande (1998) a adsorção do B aos colóides minerais e orgânicos controla a concentração dos íons e complexos na solução do solo exercendo, então, grande influência na absorção deste nutriente pelas plantas. Goldberg, Lesch e Suarez (2000) argumenta que a absorção de B pelas plantas depende da sua concentração na solução do solo e que essa, por sua vez, depende das reações de adsorção entre o B e seus adsorventes no solo, tais como os óxidos de ferro e alumínio, os minerais de argila, a matéria orgânica, o hidróxido de magnésio e o carbonato de cálcio.

O teor de B total nos solos varia amplamente e, na sua maioria, encontra-se na faixa de 4 a 98 mg kg⁻¹, com média em torno de 30 mg kg⁻¹ (JACKSON, 1965). Segundo Malavolta (1980), na maioria dos solos brasileiros, os teores de B total encontram-se na faixa de 30 a 60 mg kg⁻¹. As grandes variações do B total nos solos são determinadas, em parte, pelo material de origem e, nos diversos tipos de solos, refletem principalmente as diferenças entre as diversas regiões geográficas e zonas climáticas.

A disponibilidade de B nos solos para as plantas é afetada, principalmente, pelos fatores: pH, teor de matéria orgânica, tipo de argila, textura, compostos de Fe e Al. A concentração do boro em solução afeta a adsorção, esperando-se que o aumento da mesma provoque uma intensificação fenômeno. A quantidade adsorvida, aumenta com a elevação do pH, embora os mecanismos que comandam o processo ainda permaneçam obscuros. Catani, Alarde e Kroll (1971) confirmaram esses fatos e verificaram que a adsorção de boro aumenta até pH 7,5 - 8,5, a partir do qual decresce.

O boro é tido como o micronutriente mais móvel no solo e por isso é facilmente lixiviado. De acordo com Yamada (2000), as doses de boro atualmente aplicadas podem não fornecer a concentração adequada de B na solução do solo para o ótimo desenvolvimento das plantas, principalmente nos solos mais argilosos e com excesso de calagem.

2.3.2 Boro na cana-de-açúcar

Para a compreensão da utilização do boro pela planta é fundamental o conhecimento do processo de redistribuição de nutrientes, visando o manejo adequado de uma determinada cultura agrícola, pois, a mobilidade de nutrientes no floema influencia os processos de diagnóstico e de amostragem para avaliação do estado nutricional e também a expressão da deficiência e da toxicidade causada pelo elemento na planta. O B é considerado móvel no floema de espécies que sintetizam polióis (açúcares simples, como manitol, sorbitol e dulcitol) como um metabólito fotossintético primário, ou seja, o complexo polioliol-B-polioliol formado nos tecidos fotossintéticos é transportado no floema para drenos ativos, como meristemas vegetativos ou reprodutivos.

A distribuição de B nas plantas ocorre pelo xilema que é, predominantemente, transportado via fluxo de transpiração, sendo afetado, principalmente, pela temperatura e intensidade luminosa, pelo conteúdo de água no solo e pela umidade relativa (ASAD; BLAMEY; EDWARDS, 2003).

De acordo com Epstein e Bloom (2006), o boro é o menos compreendido de todos os nutrientes minerais, mas dentre todos os micronutrientes, em termos molares, é requerido em maiores quantidades nas dicotiledôneas. As funções que se sugere para o boro nas plantas incluem o transporte de açúcar, a lignificação da parede celular, a estruturação da parede celular, o metabolismo de carboidratos, o metabolismo do RNA, a respiração, o metabolismo dos fenóis, a função da membrana, a fixação de N_2 , o metabolismo do ascorbato e a diminuição da toxicidade. Há evidências crescentes de que o boro desempenha papel na função da membrana plasmática.

Em tecidos deficientes em boro, a atividade da ATPase ligada à membrana plasmática e as taxas de absorção de íons são diminuídas. As membranas tornam-se permeáveis, mas podem ser rapidamente restauradas pelo suprimento deste nutriente. Este efeito da deficiência de boro sobre a diminuição da função da membrana plasmática pode estar ligado a mudanças no metabolismo dos fenóis na parede celular associadas com a deficiência.

Marschner (1995) descreveu como uma cascata os efeitos secundários originados de falta de boro na parede celular e na interface membrana plasmática/parede celular, culminando com os sintomas da deficiência.

De acordo com Dechen, Haag e Carmello (1991), esse micronutriente é responsável pelo desenvolvimento de raízes e transporte de açúcares. Sua função fisiológica difere dos outros micronutrientes, pois este ânion não foi identificado em nenhum composto ou enzima específica. Entre as principais funções atribuídas a este micronutriente está o metabolismo de carboidratos e transporte de açúcares através das membranas, a síntese de ácidos nucleicos (DNA e RNA) e de fito-hormônios, a formação de paredes celulares e divisão celular, estando diretamente relacionado ao metabolismo do cálcio, de forma que, para formação adequada da parede celular, é necessária à presença desse nutriente.

Epstein e Bloom (2006), assim como Furlani (2004), relatam que o boro é integrante de compostos que constituem a hemicelulose da parede celular. Han et al. (2008) observaram que a deficiência de boro resultou na diminuição do

crescimento e aumento no peso específico da folha de citros, explicado pelo papel do boro na formação da parede celular primária.

O B encontra-se principalmente ligado à parede celular (95 a 98 %), restando uma pequena porção que pode estar envolvida em outras funções na planta, quando há restrição de sua disponibilidade (BROWN, 1994). São apontadas como principais funções do B nas plantas o seu papel na estrutura da parede celular, na reprodução das plantas (formação do tubo polínico), no metabolismo das plantas (ciclo da ascorbato glutationa, metabolismo de fenóis, metabolismo do nitrogênio, fotossíntese) e na estrutura da membrana celular (BROWN et al., 2002). A extração de micronutrientes pela planta cana é relativamente pequena, apesar do grande volume de material vegetal produzido e a parte aérea da cultura acumula cerca de 500 g de boro, para produzir 100 t de colmos (ORLANDO FILHO, 1993; FRANCO et al., 2008; MOURA FILHO et al., 2008).

Cakmak e Römheld (1997) correlacionaram a má formação de membranas e perda de sua integridade funcional com a deficiência de B, isto é, a formação de complexos entre B e compostos polióis semelhantes à pectina em parede celular, glicoproteínas ou glicolipídios em membranas e o-difenóis (ácido caféico e hidroxiferúlico), como responsáveis pela estabilidade da mesma. Marschner (1995) atribuiu à deficiência de B a má formação de parede celular, envolvido na formação de compostos pécticos.

Há diversos relatos na literatura referindo-se a decréscimos na taxa de assimilação de CO₂, com redução na translocação de fotoassimilados, em condições de deficiência de B, sendo tal fato explicado pela redução na frequência e no número de estômatos presentes na folha (MARSCHNER, 1995). De acordo com os autores há a hipótese de que em condições de deficiência de B ocorre redução no transporte da sacarose das folhas para outras partes da planta, pela maior produção de calose, a qual provoca a obstrução do floema, principal via de transporte da sacarose, ou pela redução da síntese de sacarose por inibição da ação de fosforilases ou redução na síntese de uracila, precursora da uridina difosfato glicose, coenzima essencial na formação da sacarose (MARSCHNER, 1995).

Costa e Oliveira (2010), verificaram que, sob condição de estresse hídrico, os sintomas de deficiência de boro são mais severos. Porém a diminuição da mineralização da matéria orgânica, importante fonte de boro no solo, e o menor

desenvolvimento do sistema radicular também são fatores significativos para o agravamento da deficiência de boro.

Boaretto, Tiritan e Muraoka (1997) alertam que muitas vezes a não correlação entre os teores de boro nas folhas e a produtividade pode ser explicada pela dificuldade em se remover o boro retido na cutícula foliar ou o ligado na camada péctica da parede celular, sem concretizar sua função metabólica, superestimando, assim, o nível de boro foliar. Partindo da essencialidade dos micronutrientes para as plantas, vê-se que eles têm funções importantes dentro do metabolismo da cana-de-açúcar. De acordo com Santos et al. (2010), o boro é um nutriente encontrado em baixas concentrações na planta, contudo é essencial para o desenvolvimento da planta, e sua ausência tem causado problemas nutricionais na cultura do girassol. Os sintomas de deficiência de boro em cana-de-açúcar aparecem em folhas novas em forma de estrias cloróticas e aquosas no espaço internerval. Em condições mais severas, ocorre o encurtamento do limbo foliar e necrose do tecido meristemático intercalar, causando sintomas de necrose interna em forma de espiral no caule, próximo ao meristema apical (TOKESHI, 1991). Ainda segundo mesmo autor, os sintomas leves de deficiência deste micronutriente mostram pequenas estrias cloróticas e aquosas no espaço internerval das folhas jovens. As áreas cloróticas podem evoluir para a necrose e o crescimento irregular do limbo foliar tende a causar enrugamento em algumas bandas. Nos casos mais severos, os sintomas evoluem para a necrose das folhas, encurtamento do limbo foliar e necrose do tecido meristemático intercalar, causando os sintomas de necrose interna em forma de espiral no caule, próximo ao meristema apical.

2.4 Caracterização do elemento Zinco

É denominado zinco o elemento químico de número atômico 30, de massa atômica 65 e símbolo Zn. Um dos elementos mais comuns na crosta terrestre, o zinco é encontrado na atmosfera, solo, água e está presente em todos os alimentos. É absorvido como Zn^{2+} pelas plantas, e quando absorvido em grandes quantidades, tende a se acumular nas raízes. Assim, a translocação para a parte aérea é pequena.

Para os autores Taiz, Zeiger e Santarém (2004), esse nutriente é fundamental para a nutrição mineral de plantas por ser essencial para síntese do

triptofano que, por sua vez, é o precursor do ácido indolacético. De acordo com pesquisas realizadas por Malavolta (1980), o zinco é responsável direto pela síntese do triptofano, um precursor da auxina-AIA, e indiretamente pela síntese de proteínas com evidências de que este nutriente atua no metabolismo do nitrogênio (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Epstein e Bloom (2006) acrescentam que o zinco é exigido para manutenção desta auxina em um estado ativo e não para sua síntese, tendo seu principal efeito no crescimento vegetal. Assim, o zinco se concentra nas zonas de crescimento devido à maior concentração auxínica (TAIZ; ZEIGER; SANTARÉM, 2004), portanto, seu principal efeito é no desenvolvimento e alongamento das partes jovens destas plantas.

2.4.1 Zinco no solo

Para adequada nutrição da planta é fundamental conhecer como o nutriente (Zn) se comporta, ou seja, sua dinâmica no solo. De acordo com Camargo (1991) e Marschner (1995), o conhecimento da dinâmica e dos fatores que influenciam em sua movimentação, sua disponibilidade para as plantas e os mecanismos de reação do zinco no solo são fundamentais para fazer as recomendações de adubações mais adequadas para as culturas.

O zinco é absorvido pelas plantas como Zn^{2+} através de um processo ativo. Quando absorvido em grande quantidade o zinco tende a se acumular nas raízes, diminuindo sua translocação para parte aérea. De acordo com resultados de pesquisas, Marubayashi (1989), pôde observar que os teores de zinco nos solos são baixos devido a vários fatores, dentre os quais podem ser destacados: baixa fertilidade natural, o alto grau de intemperização, a elevada acidez, baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e alta saturação por alumínio.

A solubilidade do zinco solo é altamente dependente do pH, decrescendo cem vezes para cada aumento de uma unidade no pH. O pH tem forte influência na adsorção do Zn, já que, junto com o potencial redox, determina o equilíbrio entre as formas iônicas hidrolisadas dos metais (LINDSAY, 1991). As interações do zinco no solo dependem de parâmetros como: concentração do Zn^{+2} na solução do solo, espécie e quantidade de sítios de adsorção associados com a fase sólida do solo, concentração de todos os ligantes capazes de formarem complexos orgânicos de zinco, pH e potencial redox do solo. A concentração de

zinco na solução do solo é muito baixa quando comparada ao conteúdo médio total de zinco nos solos ($\sim 50 \text{ mg dm}^{-3}$).

Outro aspecto importante que deve ser abordado é que o zinco pode formar complexos com cloretos, fosfatos, nitratos e sulfatos. De acordo com Kiekens (1990), os complexos com os ânions $(\text{SO}_4)^{-2}$ e $(\text{HPO}_4)^{-2}$ são os mais abundantes e podem contribuir significativamente para o zinco total na solução. A adsorção de zinco pelos solos e seus constituintes tem sido extensivamente estudada como importante fator relacionado ao comportamento do elemento no solo. Argilas e matéria orgânica podem adsorver zinco fortemente e, aparentemente, dois mecanismos de adsorção de zinco ocorrem: um, em condições ácidas, relacionado a sítios de troca catiônica e outro, em condições alcalinas, que é considerado quimiossorção, sendo esta altamente afetada pelos ligantes orgânicos. As substâncias húmicas contêm número relativamente grande de grupos funcionais - OH, - COOH, SH e C=O , havendo grande afinidade para íons metálicos, como o Zn^{2+} .

Muitos autores, estudando as interações entre substâncias húmicas e zinco, revelaram que os ácidos fúlvicos apresentam seletividade junto ao íon metálico, o que pode ser comprovado pelas constantes de estabilidade dos complexos e quelatos de ácido fúlvico e metal. Segundo Oliveira e Mattiazzo (2001), compostos orgânicos simples, como aminoácidos, são efetivos complexantes ou agentes quelantes para zinco, o que aumenta a solubilidade e mobilidade desse metal nos solos. Este autor afirma que a matéria orgânica do solo é fator que pode afetar o comportamento do zinco nos solos. A fração ácido fúlvico e ácidos orgânicos de baixo peso molecular formam, principalmente, complexos solúveis e quelatos com zinco, aumentando sua mobilidade.

Devido à sua natureza coloidal, os humatos de zinco podem ser considerados como um “reservatório” orgânico de armazenamento para o zinco (OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001), por isso, é importante conhecer os acúmulos deste nutriente na palhada e torta de filtro. Por outro lado, Nascimento e Fontes (2002), verificaram que as baixas correlações obtidas entre os parâmetros de adsorção de zinco com a CTC evidenciam a limitada importância da troca iônica na retenção de zinco nos solos estudados.

Em geral, as correlações obtidas entre os parâmetros de adsorção de zinco indicam que os teores de argila dos solos estudados são fatores determinantes

mais importantes para o zinco. Malavolta (1980) constatou que de 30 a 60% do zinco do solo pode ficar adsorvido, preso ao Fe_2O_3 . A absorção de zinco pelas raízes da planta pode ser prejudicada por diversos fatores, entre eles a ação adsortiva exercida pelas argilas, principalmente em solos argilosos e intemperizados (REDDY; PERKINS, 1974). Malavolta (1980) relatou que na presença de H_2PO_4^- , pode ocorrer inibição não competitiva (antagonismo) com o Zn^{2+} , onde o aumento na concentração de H_2PO_4^- , diminua a absorção de Zn^{2+} . Segundo Olsen (1972), nesta situação, a deficiência do zinco decorre em razão de uma ou mais das seguintes situações: a) combinação do zinco com os íons fosfato (H_2PO_4^-), diminuindo a sua disponibilidade; b) redução da disponibilidade do zinco por combinação com o fosfato; c) precipitação de fosfato de zinco na superfície das raízes; d) redução na translocação do zinco das raízes para a parte aérea por causa do alto nível de fosfato nos tecidos condutores e) diminuição no teor de zinco da parte aérea por efeito diluição, devido ao maior crescimento em resposta à adubação fosfatada com a grande utilização de fertilizantes fosfatados e sua frequência de aplicação, sem, na maioria das vezes, considerar seu efeito residual no solo. Há evidências que aplicações excessivas de P no solo podem induzir a deficiência de zinco nos tecidos das plantas (OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001).

Em relação aos teores de zinco encontrados nos solos, Kabata-Pendias e Pendias (2000), verificaram que a faixa comum de zinco é entre 10–300 mg kg^{-1} , sendo o valor médio 50 mg kg^{-1} , podendo ocorrer variações em seus teores de acordo com seu material de origem, sendo encontrado nas rochas sedimentares as maiores concentrações do nutriente. Espironello (1996), relatam que no estado de São Paulo, ocorre a suplementação de zinco na cultura de cana-de-açúcar quando há teor baixo de zinco no solo ($< 0,5 \text{ mg dm}^{-3}$). Korndörfer et al. (1999), também indicam a aplicação de zinco em cana-de-açúcar em áreas deficientes do nutriente, especialmente em solos arenosos e com baixo teor de matéria orgânica. De acordo com Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), a exigência em zinco da cana-de-açúcar é em média de 0,72 kg ha^{-1} , com exportação relativa aos colmos de 0,50 kg ha^{-1} de zinco e acúmulo de 0,22 kg ha^{-1} de Zn nas folhas, sendo prática importante manter adequado o estado nutricional da cana-de-açúcar, que ocorre com teor de zinco na folha de 10–50 mg kg^{-1} (RAIJ; CANTARELLA, 1996). Portanto em canaviais cultivados em solos com baixo teor deste nutriente a adubação com zinco faz-se importante para manter níveis adequados do nutriente à cultura, podendo

proporcionar maior crescimento dos internódios, aumentar o crescimento do topo da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, aumentar o comprimento e produtividade de colmos.

2.4.2 Zinco na cana-de-açúcar

O zinco na nutrição mineral das plantas é absorvido como Zn^{2+} , sendo essa absorção realizada por processo ativo. O zinco é fundamental para o desenvolvimento das plantas devido à sua essencialidade, sendo ativador de várias enzimas, além de estruturas celulares. A falta deste micronutriente acarreta graves perdas ao metabolismo vegetal, refletindo diretamente na redução da produtividade de culturas temporárias e perenes. Nas plantas C4 o zinco participa da fotossíntese, através da enzima carboxilase pirúvica, fundamental para a produção de triptofano, aminoácido precursor do AIA (ácido indolacético), importante hormônio vegetal, promotor de crescimento participando também do metabolismo do nitrogênio (MARSCHNER, 1995). De acordo com Epstein e Bloom (2006), a ação fisiológica desse micronutriente é observada na síntese do triptofano, promoção da síntese do citocromo c, metabolismo de auxinas, estabilização dos ribossomos, metabolismo de fenóis, síntese de proteínas e permeabilidade da membrana.

A deficiência de zinco em plantas de cana-de-açúcar se caracteriza pelo pequeno alongamento do palmito, com tendência das folhas serem emitidas na mesma altura do vértice foliar, dando aspecto de “leque”. Em condições mais severas, as plantas tem menor desenvolvimento, apresentando aspecto de raquitismo e as folhas mais velhas apresentam manchas vermelhas na parte inferior, podendo apresentar início de clorose internerval em associação com as manchas vermelhas (TOKESHI, 1991). O mesmo autor relata que em plantas com idade superior a seis meses, pode-se observar encurtamento nos entre-nós, clorose internerval e amarelecimento mais acentuado da margem para a nervura central. A carência de Zn no solo pode ser evidenciada pela grande frequência com que aparecem as deficiências em diferentes culturas como: citros, cafeeiro, eucaliptos, cana-de-açúcar, arroz, mandioca e principalmente o milho (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

A deficiência deste nutriente na cana-de-açúcar pode ocasionar redução do perfilhamento, internódios mais curtos e colmos mais finos (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

2.4.3 Caracterização do sistema vegetal

Estudando o comportamento de cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, para a região centro norte do estado de São Paulo, Tasso Júnior (2007), obteve para a cultivar RB 867515, as maiores produtividades de cana e ATR por hectare. Para longevidade e boas produtividades do canavial Segato, Mattiuz, Mozambani (2006), alguns fatores devem ser considerados por influenciarem diretamente nesses aspectos. Essas características são reguladas por fatores: fertilidade do solo e adubação, variedade escolhida, condições climáticas, práticas culturais, controle de plantas daninhas, pragas e doenças e método de colheita. Dentre os fatores que influenciam a composição química e tecnológica da cana-de-açúcar, destacam-se variedades, ambientes de produção e manejo adotado. De acordo com Marques et al. (2007), a cana-de-açúcar apresenta em sua composição de 8-18% de fibra (celulose, lignina e pentosanas) e 86-92% de caldo. O caldo contém de 75-82% de água e de 18-25% de sólidos solúveis. Os sólidos solúveis apresentam de 15,5-27% de açúcares e de 1-2,5% de não-açúcares (impurezas), sendo este último dividido em inorgânicos (0,2-7%) e orgânicos (0,8-1,8%) que são compostos por aminoácidos, ácidos, ceras, corantes e gorduras. Os açúcares contém 12-18% de sacarose, de 0,2-1,0% de glicose e de 0-0,5% de frutose. Para o setor sucroenergético, quanto mais elevados os teores de sacarose, melhor para os processos de produção de açúcar e álcool.

Recomenda-se o plantio desta variedade de cana-de-açúcar em solos de média/baixa fertilidade. Além disso, ressalta-se que a RB 867515 tem se adaptado muito bem aos solos arenosos do estado de São Paulo e Paraná, onde favorece sua maturação e reduz os problemas oriundos do florescimento e chochamento que ocorrem em menor intensidade (UDOP, 2009).

3 OBJETIVO

O trabalho teve como objetivo avaliar a resposta da cana-de-açúcar à adubação com os micronutrientes boro e zinco em solos de baixa fertilidade, buscando estabelecer doses e teores nutricionais adequados com o intuito de proporcionar aumento no potencial produtivo em cana-planta e o efeito residual na cana-soca.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização do local

O experimento foi realizado em área de produção comercial de cana-de-açúcar, da Usina Alto Alegre - Unidade Floresta, no município de Alta Floresta, sendo a área experimental localizada no município de Martinópolis – SP.

4.1.1 Dados pluviométricos

Durante os anos de condução do experimento, entre novembro de 2012 e dezembro de 2014, os dados referentes à pluviosidade (milímetros mm) foram coletados e fornecidos pela usina estão apresentados na Figura 1.

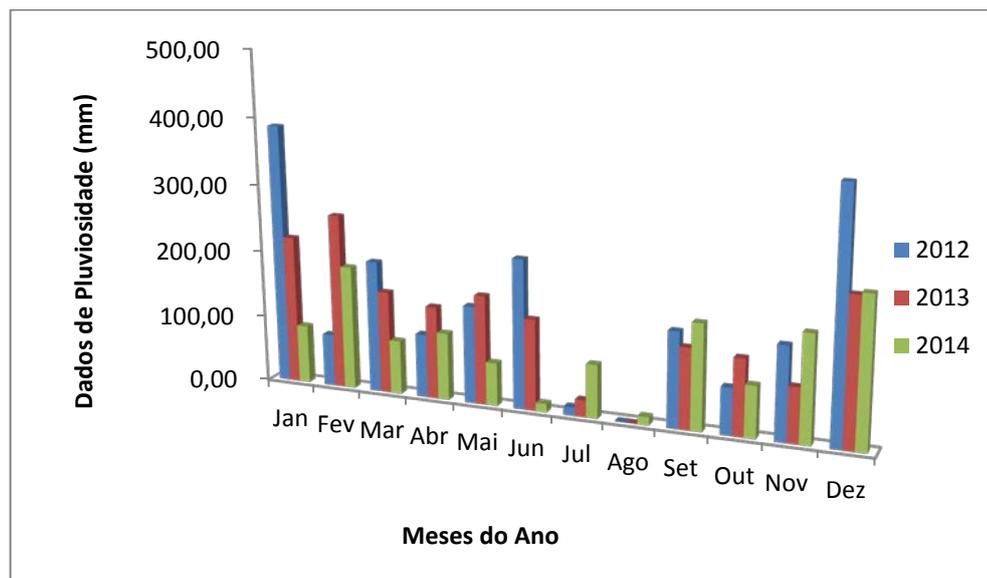


Figura 1. Dados pluviométricos mensais entre os anos de 2012 e 2014 (mm).

4.1.2 Aspectos químicos do solo

O solo da área experimental é classificado como Argissolo vermelho eutrófico (Pve), (EMBRAPA, 2006). A primeira amostragem para caracterização do solo foi realizada no dia 16 de outubro de 2012. Para esse procedimento o solo foi amostrado em duas profundidades, ou seja, de 0 a 25 e de 25 a 50 cm para

caracterização química do mesmo. A determinação dos atributos químicos do solo foi realizada antes da instalação do experimento, segundo metodologia proposta por Raij et al. (2001) e encontram-se nas Tabelas 3 e 4, com resultados de análises de rotina e micronutrientes respectivamente.

Tabela 3. Resultado da análise química de solo realizada na área experimental em duas profundidades (0-25 e 25-50 cm), para atributos químicos de rotina (Raij et al., 2001).

Profundidades (cm)	pH (CaCl ₂)	M.O. g dm ⁻³	P _{resina} mg dm ⁻³	S mg dm ⁻³	Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
					----- mmol cdm ⁻³ -----						%
0-25	5,1	10,0	38	13,2	0	1,9	17,5	5,3	24,6	40,5	60,8
25-50	4,6	8,2	8	12	4,1	2,5	13,4	3,3	19,2	37,8	50,8

Tabela 4. Resultado da análise química de solo de micronutrientes, realizada na área experimental em duas profundidades, 0-25 e 25-50 cm. (Raij et al., 2001).

Profundidades (cm)	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		----- mg dm ⁻³ -----			
0-25	0,12	0,9	54,6	9,9	1,3
25-50	0,15	0,9	41,3	7,4	0,6

A amostragem do solo para realização da análise química o solo foi realizada 7 (sete) meses antes da instalação do experimento nas profundidades de 0-25 e 25-50 cm, com as análises realizadas no laboratório da Universidade do Oeste Paulista em Presidente Prudente – SP. Analisando os teores de micronutrientes, especificamente boro e zinco, observa-se teores baixos de boro e médio para zinco (RAIJ et al., 2001).

A área experimental era composta exclusivamente pela cultura da cana-de-açúcar, variedade RB 867515, sendo a instalação do experimento iniciada no período de implantação da lavoura, realizada no dia 30 de novembro de 2012. Para a instalação do experimento foi seguido o padrão de plantio comercial da Usina, ou seja, plantio em linhas duplas de 1,5 por 0,70 metros, com mudas produzidas pela Usina Alto Alegre. A variedade RB 867515 apresenta características

botânicas muito favoráveis como rápido crescimento, porte alto, hábito de crescimento ereto, ampla adaptabilidade, boa estabilidade, alta densidade de colmo e boa despalha. Suas características agroindustriais são: baixas exigências em solos, perfilhamento médio, boa brotação de soqueira, bom fechamento de entrelinhas, baixo índice de tombamento, eventual florescimento, pouco chochamento, alto teor de sacarose, maturação média a tardia, teor de fibra médio apresentando tolerância a herbicidas. Apresenta também resistência ao carvão e à ferrugem, mosaico, escaldadura das folhas, podridão vermelha e a broca. Apresenta ainda resistência intermediária à estria vermelha e falsa estria vermelha. Os destaques para esta variedade são tolerância à seca, ótima brotação de soqueira mesmo colhida crua, alto teor de sacarose e crescimento rápido com altas produtividades (SCHULTZ, 2009).

4.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial (3 x 4) considerando a aplicação de 3 (três) doses de boro (0, 1,0 e 2,0 kg ha⁻¹) e 4 (quatro) de zinco (0; 2,0; 4,0 e 6,0 kg ha⁻¹), totalizando 36 parcelas. Os micronutrientes boro e zinco foram aplicados no sulco de plantio nas formas de ácido bórico (17% boro) e sulfato de zinco (20% zinco) respectivamente. É importante ressaltar que todas as parcelas do experimento receberam a mesma quantidade de nitrogênio, fósforo e potássio. Os fertilizantes utilizados para esse fornecimento foram: ureia (45% N), superfosfato triplo (44% P₂O₅) e cloreto de potássio (60% de K₂O). Na Tabela 5 estão apresentados os tratamentos com suas respectivas doses (kg ha⁻¹) de boro e zinco.

Tabela 5. Tratamentos utilizados na área experimental com respectivas doses de nitrogênio, fósforo, potássio, boro e de zinco (kg ha^{-1}).

Tratamentos	Ureia	SPS	Clor. de Potássio	Boro	Zinco
	(N)	(P_2O_5)	(K_2O)		
----- (kg ha ⁻¹) -----					
T1	30	150	120	0	0
T2	30	150	120	0	2
T3	30	150	120	0	4
T4	30	150	120	0	6
T5	30	150	120	1	0
T6	30	150	120	1	2
T7	30	150	120	1	4
T8	30	150	120	1	6
T9	30	150	120	2	0
T10	30	150	120	2	2
T11	30	150	120	2	4
T12	30	150	120	2	6

Cada parcela experimental foi composta de quatro linhas duplas, ou seja, oito linhas com 6,0 m de comprimento. O espaçamento entre as linhas duplas foi 0,70 m sendo cada dupla distante 1,50 m entre si, totalizando área de 52,8 m² por parcela. Foi estabelecido como área útil para as avaliações, as duas linhas duplas centrais, ficando as demais como bordadura.

Na Figura 2 pode ser observado o croqui da área experimental, onde estão os três blocos e as doze parcelas. As parcelas foram dispostas ao acaso dentro dos respectivos blocos, numeradas de 1 a 12 e se referem aos tratamentos de adubação aplicados no sulco de plantio. Nesta Figura observa-se também a parcela em destaque, detalhando as quatro linhas duplas de plantio, e apresentando a área útil de amostragem e avaliações de cada parcela, protegidas pela bordadura das mesmas.

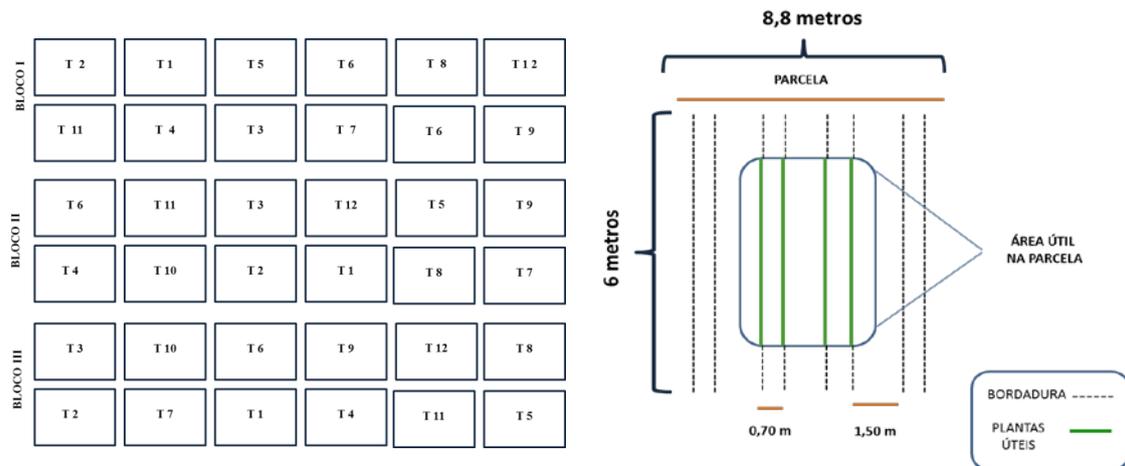


Figura 2. Croquis da área experimental total e da parcela.

Na Figura 3 pode ser observada imagem da cana-soca rebrotada em Janeiro de 2014.



Figura 3. Cana-soca em janeiro de 2014.

4.3 Instalação e condução do experimento

Na renovação do canavial, antes do plantio da cana-de-açúcar foi realizado o preparo da área, com aração e gradagem do solo, seguido da abertura dos sulcos de plantio. Em relação às práticas corretivas foram aplicados: 2,0 toneladas por hectare de calcário dolomítico com PRNT de 80%, realizada 30 dias antes da implantação da lavoura. A adubação foi realizada no sulco, utilizando 500 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado 8 - 28 - 16.

Os tratamentos aplicados no sulco de plantio da cultura (N – P₂O₅ – K₂O – B e Zn) foram devidamente pesados e armazenados em sacos plásticos já identificados, facilitando assim a aplicação dos mesmos à campo. Os fertilizantes referentes a cada tratamento, foram aplicados nos sulcos de plantio antes da colocação dos toletes. O plantio foi realizado no dia 30 de novembro de 2012, sendo a densidade do mesmo, equivalente a 18 gemas por metro, utilizando toletes de duas ou três gemas. Na Figura 4 observa-se a aplicação manual dos fertilizantes N – P₂O₅ – K₂O no sulco de plantio.



Figura 4. Aplicação manual dos fertilizantes N – P₂O₅ – K₂O no sulco de plantio da cana-de-açúcar.

As avaliações foram realizadas em novembro de 2013 com a colheita da cana-planta foi colhida e as avaliações necessárias para as determinações propostas para o presente estudo foram realizadas. No cultivo da cana-soca, quando as plantas estavam em fase de desenvolvimento vegetativo (40 dias após a colheita da cana-planta) foi feita apenas adubação com N - P₂O₅ – K₂O sem a aplicação de B e Zn. A cana-soca foi colhida e as avaliações realizadas em novembro de 2014. Assim, como no ano anterior, as amostragens foram feitas para as determinações propostas. Todas as avaliações realizadas para obtenção dos resultados práticos deste trabalho estão descritos nos itens a seguir.

Ao longo dos dois anos de condução do experimento (novembro de 2012 a novembro de 2014), seguiu-se os tratos culturais para garantia da fitossanidade das plantas, de acordo com modelo já usado pela Usina em suas áreas comerciais. Assim, os tratos culturais utilizados foram: inseticida Engeo Pleno, na dose de 2,5 L ha⁻¹ e o nematicida Furadan 350SC, na dose de 7,0 L ha⁻¹.

A aplicação dos herbicidas foi realizada em pós-emergência da cultura, quando essa se encontrava em estágio médio de quatro folhas totalmente expandidas.

4.4 Avaliações

Os parâmetros avaliados na área experimental foram: estado nutricional da planta, avaliação da fertilidade do solo, indicadores da qualidade tecnológica e produtividade.

4.4.1 Determinação dos teores de micronutrientes foliares

Para determinação dos teores de micronutrientes foliares foram realizadas amostragens foliares, em duas épocas para cada ano agrícola, sendo essas em novembro de 2013 (cana-planta) e amostragens realizadas em novembro de 2014 para cana-soca. Foram coletadas 30 folhas diagnósticas, ou seja, a folha+1 (folha mais alta com colarinho visível – “TVP”) em cada parcela da unidade experimental. Para análise de tecido foi coletado o terço médio de cada folha retirando a nervura central, segundo a metodologia citada por Raji e Cantarella (1996). Estas amostras foram lavadas e submetidas à secagem em estufa a 65°C com circulação forçada de ar por 72 horas e moídas em moinho tipo Wiley (com peneiras de 20 mesh). Foram analisados os teores de N, pelo método de Nessler (JACKSON, 1965), após a digestão do material seco (0,1 g) com H₂SO₄ concentrado (1,5 mL) e H₂O₂ 30 % (1 mL); o teor de fósforo, colorimetricamente pelo método do molibdato; o teor de potássio, por espectrofotometria atômica de emissão de chama; os teores de Ca, Mg, Mn, Zn e Cu, por espectrofotometria de absorção atômica, e o teor de enxofre, por turbidimetria após digestão do material seco (0,5 g) com ácido nítrico 65 % (4 mL) e ácido perclórico 70 % (2 mL). Na Figura 5 pode ser visualizada a parte central das folhas da cana-de-açúcar que foram utilizadas para realização da análise foliar dos tecidos.



Figura 5: Terço médio das folhas de cana-de-açúcar utilizados para análises.

4.4.2 Caracterização química do solo na colheita

A caracterização química do solo na colheita foi realizada seis meses antes da implantação do experimento. As amostras foram coletadas nas profundidades de 0-25 e 25-50 cm (Tabelas 1 e 2), para caracterização da área. Os resultados referentes à análise de rotina e micronutrientes estão apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. A segunda amostragem de solo foi feita um ano após o plantio, quando foi realizada a colheita da cana-de-açúcar em novembro de 2013. A terceira amostragem foi realizada em novembro de 2014 por ocasião da segunda colheita. Tanto a segunda quanto a terceira amostragem foram realizadas a 0,15 metros da linha da soqueira de cana, à profundidade de 0 a 25 cm, utilizando trado holandês. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e encaminhadas para o laboratório da Universidade do Oeste Paulista – Unoeste. Essas foram secas em estufa de circulação forçada de ar, com temperatura de 45 °C. Determinou-se após a secagem: pH, M.O., P, S, K, Ca, Mg, Al, H+Al, SB e V% segundo Raij et al. (2001), além de enxofre segundo Vitti (1989).

4.4.3 Indicadores da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar

No momento da colheita, nos dois anos agrícolas, foram amostrados dez colmos coletados na área útil de cada parcela para determinação da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Em seguida, estas amostras foram devidamente identificadas e levadas ao laboratório de análises industriais da Usina Alto Alegre –

Unidade Floresta, para a realização das análises de qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Para tal, foram seguidos métodos padrões da agroindústria sucroenergética (FERNANDES, 2003). As análises realizadas tanto para cana-planta quanto para a primeira cana-soca foram: Pol na cana (porcentagem aparente de sacarose contida na cana, expresso em %), Fibra (%), Brix (porcentagem de sólidos solúveis, incluindo a sacarose no caldo expresso em %), e Açúcar Total Recuperável – ATR (representado pela quantidade de açúcares redutores totais, recuperáveis da cana até o xarope, expresso em kg de açúcar t⁻¹ de cana). Com base nestes resultados foi calculado a ATR por hectare (t ha⁻¹ açúcar) e a produtividade agroindustrial da cana-de-açúcar (t ha⁻¹ de Pol), sendo esta última avaliação, obtida através da multiplicação da produtividade de colmos com a porcentagem de Pol da cana. A produtividade de cana-de-açúcar expressa em tonelada de cana por hectare (TCH) foi determinada no momento da colheita do experimento, obtendo-se a biomassa da parte aérea das quatro linhas centrais de cada parcela com o uso de balança. Após os cálculos, obteve-se a determinação da produção por hectare.

4.4.3.1 Pol

Representa a porcentagem aparente de sacarose contida na solução de açúcares. No caldo de cana no período da colheita, o teor de glicose e frutose é geralmente baixo, menor do que 0,5%, comparado ao teor de sacarose, que pode estar acima de 16 %, na média da safra. Essa característica aproxima do teor real de sacarose, sendo normalmente aceito como tal. A sacarose (dissacarídeo) é o principal parâmetro de qualidade tecnológica da cana-de-açúcar e refere-se ao açúcar diretamente cristalizável no processo de fabricação, obtida através da fórmula $PCC (Pol\% \text{ cana}) = Pol\% \text{ caldo} * (1 - 0,01 * Fibra) * C$, onde C = coeficiente de transformação da pol do caldo extraído em Pol do caldo absoluto, calculado pela equação $C = 1,0313 - 0,00575 * F$ (fibra) (FERNANDES, 2003).

4.4.3.2 Pureza do caldo

A pureza do caldo se refere à porcentagem de sacarose contida nos sólidos solúveis, sendo denominada “pureza real”. É fundamental observar que

quando esta determinação é realizada numa solução açucarada impura, diz-se “pureza aparente”. Expressa a porcentagem dos sólidos solúveis (°Brix) que são representados pela sacarose (Pol) (FERNANDES, 2003). Assim, é determinada através da seguinte relação: $P \text{ (Pureza)} = (\text{Pol\% caldo} / \text{Brix\% caldo}) \times 100$.

4.4.3.3 Fibra

A fibra é a matéria insolúvel em água contida no caldo. No colmo de cana, as fibras do parênquima são de estrutura mais frágil e fina. Nessa estrutura se formam as células isodiamétricas de estocagem do caldo de alto teor de sacarose (FERNANDES, 2003). No sistema de pagamento de cana pelo teor de sacarose (PCTS) a fibra é estimada em função do peso de bagaço úmido da prensa. Determinada pelo método da prensa hidráulica, conforme determinado no Ato 13/83, de 21/04/1983 – IAA, citado por Mutton (1984) e atualizações semestrais do CONSECANA. $F = 0,08 * \text{PBU} + 0,876$, onde F é a Fibra cana e PBU refere-se ao peso do bagaço úmido da prensa, em gramas.

4.4.3.4 Açúcar teórico recuperável

O açúcar teórico recuperável (ATR) é variável do sistema de pagamento de cana implantado em São Paulo a partir da safra de 1998/99. É o resultado da diferença entre o ART (açúcares redutores totais) da cana e as perdas na lavagem de cana, no bagaço final, na torta do filtro ou prensa e as “indeterminadas”, representa a quantidade de açúcares (na forma de açúcares invertidos ou ART) que são recuperados na usina assumindo perdas de 12% na lavagem de cana, extração (perda de Pol no bagaço final), torta dos filtros ou prensas e as “indeterminadas” (FERNANDES, 2003). O açúcar teórico recuperável (ATR), dado em kg t^{-1} açúcar, foi calculado através da fórmula regulamentada pelo CONSECANA em 1999: $\text{ATR} = 10 \times 0,88 \times 1,0526 \times \text{PCC} + 10 \times 0,88 \times \text{ARC}$, onde: - o fator 10, refere-se à transformação de $\text{kg Pol}/100 \text{ kg cana}$ (%) em kg Pol t^{-1} cana; o fator 0,88, refere-se à eficiência industrial de lavagem, extração e tratamento caldo juntas, ou seja, coeficiente de recuperação, para uma perda industrial de 12%; - o fator 1,0526, refere-se ao fator que transforma a Pol em AR, ou seja, coeficiente estequiométrico para a conversão de Pol em açúcares redutores. $\text{AR} = (9,9408 -$

$0,1049 \times \text{Pureza}) \times (1 - 0,01 \times \text{Fibra}) \times (1,0313 - 0,00575 \times \text{Fibra})$, sendo: - primeiro parênteses: Regressão que correlaciona pureza da cana com teor de AR; - segundo parênteses: Regressão que transforma a AR do caldo para AR da cana; - terceiro parênteses: Regressão que corrige a extração da prensa para extração real.

4.4.3.5 Produtividade

A produtividade de açúcar em tonelada de açúcar é determinada com base nos dados de produtividade de colmos, e de Pol cana determinado-se a (Pol) por hectare (TCH).

4.5 Análise estatística

Os resultados dos parâmetros estudados foram submetidos à análise de variância (teste F), utilizando o pacote estatístico SAS[®], SISVAR[®] versão 4.0 (FERREIRA, 2000) e SigmaPlot[®] versão 10 (SYSTAT SOFTWARE, 2006). Os dois primeiros foram utilizados para a análise de variância, correlações e desdobramento das interações significativas, enquanto que o SigmaPlot[®] foi utilizado conjuntamente para as análises de regressão para as doses de boro e zinco.

O modelo que apresentou o maior coeficiente de determinação e o menor desvio padrão da média foi o ajustado. Para cada modelo de regressão, foi avaliada a significância dos estimadores dos parâmetros da equação considerando-se as probabilidades de 1 e 5% e, não significativo, sendo representados respectivamente pelos símbolos **, * e ^{ns} respectivamente, pelo teste de Tukey.

Os resultados dos teores encontrados para boro e zinco nas folhas, nos solos, nos parâmetros de qualidades tecnológicas e de produtividade, em função das doses aplicadas de boro e zinco, foram comparados através de contrastes entre os anos de 2013 (cana-planta) e 2014 (cana-soca). Assim, os contrastes são:

T1 T2 T3 T4 = Tratamentos onde não há doses de boro (B=0) e são aplicadas doses crescentes de zinco (0, 2, 4 e 6 kg ha⁻¹).

T5 T6 T7 T8 = Tratamentos onde as doses de boro são B=1 kg ha⁻¹ e são aplicadas doses crescentes de zinco (0, 2, 4 e 6 kg ha⁻¹).

T9 T10 T11 T12 = Tratamentos onde as doses de boro são $B=2 \text{ kg ha}^{-1}$ e são aplicadas doses crescentes de zinco (0, 2, 4 e 6 kg ha^{-1}).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação do estado nutricional da planta e o efeito das doses de Boro e Zinco na adubação da cana-de-açúcar

A avaliação do estado nutricional da planta foi através da análise de tecido foliar. Os teores médios dos micronutrientes encontrados dos tecidos foliares das plantas após o primeiro ano de condução do experimento estão apresentados na Tabela 6 para boro e zinco (mg kg^{-1}). As médias obtidas para macronutrientes e os demais micronutrientes estão nos Anexos 1 e 2, respectivamente, para cana-planta.

Tabela 6. Teores médios de boro e zinco encontrados nas folhas de cana-de-açúcar (novembro de 2013), em razão dos tratamentos.

Tratamentos	Doses Zn kg ha^{-1}	Doses B	B (mg kg^{-1})	Zn
T1	0	0	2,83	7,30
T2	2	0	3,17	6,97
T3	4	0	1,00	11,30
T4	6	0	3,67	6,70
T5	0	1	2,17	8,47
T6	2	1	1,67	6,40
T7	4	1	0,67	5,60
T8	6	1	1,67	6,10
T9	0	2	3,83	7,60
T10	2	2	1,17	7,20
T11	4	2	2,50	6,73
T12	6	2	3,50	4,53
Média			2,32	7,08
CV (%)			45,20	22,51
DP			1,05	1,59

CV = Coeficiente de Variação DP = Desvio Padrão

Através dos teores apresentados verificou-se que não houve diferença significativa, tanto a 1 e quanto a 5% nas interações entre das doses de boro e zinco no primeiro ano de experimentação.

Na Tabela 7 estão apresentados os valores médios de boro e zinco encontrados nas folhas de cana-de-açúcar (novembro de 2014), em razão das doses de boro e zinco. As médias obtidas para macronutrientes e os demais estão nos Anexos 3 e 4, respectivamente para cana-soca.

Tabela 7. Teores médios foliares para boro e zinco na cana-soca em razão dos tratamentos (novembro de 2014).

Tratamentos	Doses Zn	Doses B	B	Zn
	..... kg ha ⁻¹ .....	.....	..... (mg kg ⁻¹) .....	.....
T1	0	0	5,00	4,05
T2	2	0	5,00	21,90
T3	4	0	5,00	38,50
T4	6	0	5,00	10,85
T5	0	1	5,00	5,60
T6	2	1	3,17	6,73
T7	4	1	5,00	24,13
T8	6	1	5,00	13,70
T9	0	2	5,00	4,03
T10	2	2	5,00	6,07
T11	4	2	5,00	10,20
T12	6	2	4,17	11,80
Média			4,78	13,13
CV (%)			11,24	75,21
DP			0,54	9,88

CV = Coeficiente de Variação DP = Desvio Padrão

5.1.1 Boro na folha

As equações de regressão para os teores de boro estão na Tabela 8 para cana-planta e para cana-soca.

Tabela 8: Equações de regressão e R^2 para os teores de boro (mg kg^{-1}) nas folhas de cana, em cana-planta e cana-soca.

Boro (kg ha^{-1})	Boro (mg kg^{-1}) Cana-planta	R^2
0	$Y = 0,1458x^2 - 0,8583x + 3,2$	0,34
1	$Y = 0,0938x^2 - 0,6875x + 2,2917$	0,74
2	$Y = 0,2292x^2 - 1,3583x + 3,6167$	0,78

Boro (kg ha^{-1})	Boro (mg kg^{-1}) Cana-soca	R^2
0	$Y = 5$	
1	$Y = 0,1146x^2 - 0,5958x + 4,725$	0,4
2	$Y = -0,0521x^2 + 0,1875x + 4,9583$	0,93

Na Tabela 9 estão apresentados dos resultados dos teores foliares de boro em razão das doses de boro e zinco. Os teores encontrados são resultados do contraste realizado comparando teor de boro para cana-planta e para cana-soca.

Tabela 9. Resultados dos contrastes entre médias dos teores foliares de boro para cana-planta e para cana-soca.

Contrastes		Boro (mg kg^{-1})	
Cana-Planta	x Cana-Soca	F	Cana-Planta x Cana-Soca
T1T2T3T4	x T1T2T3T4	15,74**	2,67 x 5,00
T5T6T7T8	x T5T6T7T8	26,03**	1,54 x 4,54
T9T10T11T12	x T9T10T11T12	12,05**	2,75 x 4,79

** Significativo a 1%.

Analisando os dados da Tabela 9, observa-se aumento significativo nos teores de boro para cana-soca, em relação à cana-planta. No primeiro contraste, sem aplicação de boro, variando as doses de zinco (0, 2, 4 e 6 mg ha^{-1}), observa-se diferença significativa a 1%. Para o segundo contraste, observa-se que, fixando as doses de boro (1 kg ha^{-1}), variando as doses de zinco (0, 2, 4 e 6 mg ha^{-1}), observa-se diferença significativa a 1% de probabilidade. Com relação ao terceiro contraste, pode-se notar tratamentos com doses fixas de boro na dose 2 kg ha^{-1} , variando as

doses de zinco (0, 2, 4 e 6 kg ha⁻¹), também se observa diferença significativa a 1% de probabilidade. Portanto, para os três contrastes verifica-se resposta significativa a 1% de probabilidade, ou seja, houve aumento nos teores médios de boro em cana-soca. O teor foliar médio de boro da cana-planta está abaixo da faixa considerada adequada (10 a 30 mg de boro kg⁻¹ na matéria seca) para a cultura da cana-de-açúcar, em relação ao descrito por Raij e Cantarella (1996). Já para 1ª cana-soca, verificou-se que o teor foliar médio de boro estava abaixo desta faixa considerada adequada. Vale, Araujo e Vitti (2008) avaliaram os teores foliares de B, Cu, Fe, Mn e Zn da cana-de-açúcar, em áreas canavieiras nas regiões de Catanduva e Ribeirão Preto, e constataram que a maioria das amostras analisadas estavam com teores foliares de B, Cu e Zn abaixo do nível crítico. Vitti e Mazza (2002) também encontraram teores de micronutrientes nas folhas abaixo dos adequados, principalmente de boro e zinco, nas regiões de Araçatuba e Piracicaba. De acordo com Malavolta (1980), esse teor mais baixo para boro pode ter sido influenciado por características do solo arenoso e, portanto, com baixos teores de matéria orgânica, que é a principal fonte de boro no solo. Dando suporte a esses resultados, Becaria (2010) avaliou os teores foliares de B em unidades produtoras de cana-de-açúcar do estado de São Paulo e constatou que em cinco locais os teores deste micronutriente estavam abaixo do nível de suficiência quando comparados aos valores apresentados por Raij e Cantarella (1996). Porém, Anderson e Bowen (1992), afirma que os teores adequados de boro para as folhas da cana-de-açúcar devem ser entre 2,0 a 7,0 mg kg⁻¹. Adorna (2011) também observou que a aplicação de B, onde não foi aplicada torta de filtro, não propiciou aumento nos teores foliares. Diferentes dos resultados foram obtidos por Espironello (1996).

Já Píperas, Creste e Echer (2009), estabelecendo normas DRIS para a cultura da cana-de-açúcar em diferentes níveis de produtividade em Paraguaçu Paulista -SP verificaram que nutrientes que apresentaram em ordem decrescente maior potencial de resposta à adubação foram B > Mn > Cu. Reis Junior e Monnerat (2003), avaliando a relação entre os índices DRIS e os teores foliares de nutrientes na cana-de-açúcar, constataram que os teores foliares adequados de micronutrientes foram: 4,48 mg ha⁻¹ de Cu; 67,8 mg ha⁻¹ de Mn e 11,7 mg ha⁻¹ de zinco. Quanto ao teor foliar dos micronutrientes (B, Cu e Mn) não houve diferença significativa, entre as fontes de zinco aplicadas no sulco de plantio da cultura, tanto da cana-planta como da cana-soca.

5.1.2 Zinco na folha

Na Tabela 10 estão apresentados os contrastes de médias para os teores foliares de zinco nos dois anos agrícolas.

Tabela 10: Equações de regressão e R^2 para os teores de zinco (mg kg^{-1}) nas folhas de cana, em cana-planta e cana-soca.

Boro (kg ha^{-1})	Boro (mg kg^{-1}) Cana-planta	R^2
0	$Y = -0,2667x^2 + 1,726x + 6,62$	0,35
1	$Y = 0,1604x^2 - 1,3575x + 8,468$	1,00
2	$Y = -0,1125x^2 + 0,1917x + 7,5167$	0,98
	Boro (mg kg^{-1}) Cana-soca	R^2
0	$Y = -2,8438x^2 + 18,913x + 1,9$	0,86
1	$Y = -0,7229x^2 + 6,4225x + 3,395$	0,55
2	$Y = -0,0271x^2 + 1,5344x + 3,8017$	0,97

Quando se observa os teores de zinco foliar mg kg^{-1} apresentados na Tabela 6 nota-se que não houve diferença significativa nos teores de zinco foliar independentemente das doses de boro e zinco aplicadas no sulco de plantio.

Os teores médios para zinco na folha da cana são observados na Tabela 11 e obtidos através de contrastes entre cana-planta e cana-soca, ou seja, contraste foi realizado entre os dois anos agrícolas.

Tabela 11. Resultados dos contrastes entre médias dos teores foliares de zinco para cana-planta e para cana-soca.

Contrastes		Zinco (mg kg^{-1})	
Cana-Planta x Cana-Soca	F	Cana-Planta x Cana-Soca	
T1T2T3T4 x T1T2T3T4	18,60 **	7,42 x 19,17	
T5T6T7T8 x T5T6T7T8	2,34 ^{ns}	6,64 x 13,17	
T9T10T11T12 x T9T10T11T12	0,06 ^{ns}	6,52 x 8,03	

^{ns} Não significativo. * e ** Significativo 1%.

Comparando as médias apresentadas pelos contrastes na Tabela 11, nota-se que o zinco aplicado via solo proporcionou diferença significativa a 1%, ou

seja, houve aumento no teor de zinco foliar entre os anos agrícolas. O teor médio observado em 2014 na cana-soca foi significativamente maior que os valores observados para cana-planta (2013). Contudo, ressalta-se que os teores foliares de zinco da cana-planta e da 1ª cana-soca, independente da dose aplicada, encontram-se dentro da faixa considerada adequada (10 a 50 mg de zinco kg⁻¹ de matéria seca) para a cultura da cana-de-açúcar, conforme descrito em Raij e Cantarella (1996).

Entretanto, Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) indicam que a faixa adequada para o teor de Zn foliar (folha +1) em cana-de-açúcar é maior em cana-planta (25 - 50 mg kg⁻¹ de M.S.) quando comparado a cana-soca (25 - 30 mg kg⁻¹ de M.S.). Sendo assim, todos os teores foliares de zinco estariam abaixo da faixa considerada adequada. De acordo com Costa Filho e Prado (2008), o fato das soqueiras apresentarem menor teor de zinco nos tecidos foliares, comparado à cana-planta, é indicativo de maior tolerância à menor disponibilidade de zinco no solo, sem que ocorra prejuízo na produtividade. Quintero Durán (2010) encontrou em áreas de altas produtividades na Colômbia com as seguintes faixas de teores foliares, expressos em mg kg⁻¹: 18 a 19 de Zn. McCray et al. (2006) sugerem as seguintes faixas de teores adequados para zinco em cana-de-açúcar para o estado da Flórida: 16 a 32 mg kg⁻¹ de zinco. Ainda segundo os autores os níveis críticos para a cultura seriam: 15 mg kg⁻¹ de zinco.

Costa Filho e Prado (2008), os quais avaliaram a aplicação de doses de zinco na 3ª cana-soca, verificaram incrementos lineares significativos nos teores foliares de zinco. Contudo, Andrade et al. (1995), trabalhando com a aplicação de oxissulfatos e de fontes solúveis de boro, cobre e zinco (sulfato de zinco) no sulco de plantio, verificaram que tanto a aplicação conjunta (“fritas”) como a aplicação isolada de micronutrientes, não resultou em aumento dos teores foliares de zinco em cana-planta e efeito residual desta adubação na 1ª cana-soca, em um Latossolo Vermelho distrófico de textura média com baixo teor de zinco (0,3 mg dm⁻³). Adorna (2011), também não observou interação para os teores foliares de zinco pela aplicação de zinco no plantio de cana-de-açúcar.

5.2 Atributos químicos do solo

Os efeitos da aplicação de boro e zinco no sulco de plantio da cana-de-açúcar em relação aos atributos químicos do solo foram avaliados em dois anos

agrícolas consecutivos, 2013 e 2014. Na Tabela 12 estão apresentados os valores médios para boro e zinco presentes no solo na primeira colheita, novembro de 2013. Os teores médios obtidos para os macronutrientes e demais micronutrientes estão nos Anexos 5 e 6, respectivamente, para cana-planta.

Tabela 12. Teores médios de micronutrientes encontrados no solo em razão das doses de boro e zinco (novembro de 2013).

Tratamentos	Doses Zn	Doses B	B	Zn
	..... kg ha ⁻¹ .....	.....	..... (mg dm ⁻³) .....	.....
T1	0	0	0,5	0,8
T2	2	0	0,7	0,7
T3	4	0	0,4	1,0
T4	6	0	0,6	0,7
T5	0	1	0,8	0,9
T6	2	1	0,8	0,8
T7	4	1	0,7	0,9
T8	6	1	0,6	0,7
T9	0	2	0,8	0,7
T10	2	2	0,7	1,0
T11	4	2	0,8	0,9
T12	6	2	0,5	0,9
Média			0,7	0,8
CV (%)			19,6	11,4
DP			0,1	0,1

CV = Coeficiente de Variação DP = Desvio Padrão

Analisando os resultados da Tabela 12 pode-se verificar que não houve diferença significativa entre os tratamentos aplicados na cultura tanto para os teores para boro quanto para zinco no solo. Nota-se que cana-planta, os teores de boro encontrados no solo estão mais elevados quando comparados aos teores observados para cana-soca. Nota-se que houve aumento no teor de boro no solo quando se aplicou a dose de 2 kg ha⁻¹ de zinco associada à aplicação de 1 kg ha⁻¹ de boro. Os resultados observados devem-se principalmente pelo fato do boro ter sido aplicado no sulco de plantio para cana-planta, portanto tinha concentrações do fertilizante contendo boro nesse primeiro ano agrícola.

Na Tabela 13 estão apresentados os valores médios de micronutrientes presentes no solo na primeira colheita, novembro de 2014, em razão das doses de boro e zinco aplicadas na colheita. As médias obtidas para os

macronutrientes e demais micronutrientes estão nos Anexos 7 e 8, respectivamente para cana-soca.

Tabela 13. Teores médios de boro e zinco encontrados no solo, em razão dos tratamentos (novembro de 2014).

Tratamentos	Doses Zn	Doses B	B	Zn
	..... kg ha ⁻¹ .....	.....	..... (mg dm ⁻³) .....	.....
T1	0	0	0,2	0,8
T2	2	0	0,1	0,8
T3	4	0	0,1	0,6
T4	6	0	0,1	0,6
T5	0	1	0,0	0,5
T6	2	1	0,1	0,7
T7	4	1	0,1	0,6
T8	6	1	0,1	0,6
T9	0	2	0,0	0,6
T10	2	2	0,1	0,6
T11	4	2	0,1	0,6
T12	6	2	0,1	0,6
Média			0,1	0,6
CV (%)			74,2	12,4
DP			0,1	0,1

CV = Coeficiente de Variação DP = Desvio Padrão

Analisando os resultados da Tabela 13 nota-se que não houve diferença significativa entre os tratamentos aplicados no plantio da cana em relação ao aumento dos teores de boro e zinco para cana-soca.

Os teores de boro reduziram provavelmente por não ter havido nova aplicação de micronutrientes no solo após a primeira colheita, pelo uso do nutriente na nutrição mineral das plantas (lixiviação devido a sua alta mobilidade no solo). Vitti et al. (2006) alertam que, devido a alta solubilidade, o uso de fontes mais solúveis como ácido bórico tornam o boro mais suscetível à lixiviação, podendo prejudicar a eficiência da adubação como o micronutriente.

Quanto aos teores observados para zinco se constatou que de 30 a 60% do zinco do solo pode ficar adsorvido, preso ao Fe₂O₃. O baixo teor de zinco no solo pode ser em razão do micronutriente interagir com íons (H₂PO₄⁻) (OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001).

5.2.1 pH do solo

Na Tabela 14 estão apresentados os resultados dos contrastes para os valores de pH comparando as médias com relação à cana-planta e à cana-soca.

Tabela 14. Resultados dos contrastes entre valores médios de pH do solo.

Contrastes entre Tratamentos	F	pH	
Cana-Planta x Cana-Soca		Cana-Planta x Cana-Soca	
T1T2T3T4 x T1T2T3T4	14,40**	5,73	x 5,42
T5T6T7T8 x T5T6T7T8	7,67*	5,87	x 5,64
T9T10T11T12 x T9T10T11T12	2,37 ^{ns}	5,73	x 5,83

^{ns} Não significativo. * e ** Significativo a 5 e 1%, respectivamente.

Observando o primeiro contraste, dose zero de boro, variando as doses de zinco, observa-se diferença significativa para os valores de pH no solo, entre cana-planta e cana-soca, a 1% de significância. No segundo contraste, dose 1 kg ha⁻¹ de boro, independente da dose de zinco, houve diferença significativa a 5% de probabilidade. No terceiro contraste não houve diferença significativa entre as médias de pH independentemente das doses de boro e zinco. Nota-se diminuição significativa, para o segundo ano, como esperado pela acidificação do solo pela planta e pela precipitação pluvial.

5.2.2 Boro no solo

Na Tabela 15 estão apresentadas as equações de regressão e R^2 para os teores de boro (mg dm^{-3}) para cana-planta e para cana-soca.

Tabela 15: Equações de regressão e R^2 para resultados dos teores de boro (mg dm^{-3}) no solo para cana-planta e para cana-soca.

Boro (kg ha^{-1})	Boro (mg dm^{-3}) Cana-planta	R^2
0	$Y = -0,0052x^2 + 0,0377x + 0,525$	0,05
1	$Y = -0,0131x^2 + 0,0392x + 0,7285$	0,73
2	$Y = -0,0084x^2 + 0,0175x + 0,810$	0,99

Boro (kg ha^{-1})	Boro (mg mg^{-3}) Cana-soca	R^2
0	$Y = -0,013x^2 + 0,1523$	0,98
1	$Y = -0,0044x^2 + 0,0308x + 0,0348$	0,55
2	$Y = -0,0171x^2 + 0,1278x - 0,0027$	0,55

Na Tabela 16 estão apresentados os resultados dos contrastes dos tratamentos para os dois anos agrícolas, cana-planta e cana-soca.

Tabela 16. Resultados dos contrastes entre valores médios de boro do solo.

Contrastes entre Tratamentos				Boro (mg dm^{-3})	
Cana-Planta	x	Cana-Soca	F	Cana-Planta x Cana-Soca	
T1T2T3T4	x	T1T2T3T4	61,61**	0,57	x 0,11
T5T6T7T8	x	T5T6T7T8	130,10**	0,74	x 0,07
T9T10T11T12	x	T9T10T11T12	93,74**	0,66	x 0,08

** Significativo a 1%.

No primeiro contraste pode-se notar que para os tratamentos sem aplicação de boro, variando as doses para zinco, houve diferença significativa a 1%, comparando os resultados entre os teores médios de boro no solo para cana-planta. Para os outros dois contrastes com dose 1 e 2 kg ha^{-1} de boro, variando as doses de zinco, verifica-se que para cana-planta as médias dos teores de boro no solo foram também superiores em relação à cana-soca, sendo significativo a 1%. Nos três contrastes realizados observa-se diminuição significativa nos teores médios de boro,

do primeiro para o segundo ano de cultivo, não apresentando efeito residual. Os teores de boro encontrados para cana-soca encontram-se abaixo do nível crítico $0,6 \text{ mg dm}^{-3}$ (RAIJ; CANTARELLA, 1996), devido à alta mobilidade do boro no solo e pelo uso de fonte (H_3BO_3) altamente solúvel.

5.2.3 Zinco no solo

De modo geral, não se observa aumento nos teores de zinco no solo, pela aplicação de zinco e boro no solo. Provavelmente esse resultado foi verificado devido ao local de aplicação do micronutriente zinco no sulco de plantio, ou seja, na linha, não estar próximo ao local de amostragem do solo para análise e provavelmente devido à característica de baixa mobilidade do nutriente no solo e fixação.

Sartori et al. (2008), verificaram que o zinco aplicado no sulco de plantio foi absorvido e proporcionou aumento no teor total das folhas e de outros órgãos nascidos após a aplicação no solo. Nota-se ainda que houve um efeito residual, pois foi constatada a presença do ^{65}Zn proveniente da aplicação no sulco de plantio nos órgãos novos da 2ª coleta. A contribuição da adubação foliar ao teor de Zn dos órgãos novos da laranja, nascidos após a aplicação, foi comparativamente menor que a contribuição da adubação aplicada no solo, que teve também um efeito residual constatado até o segundo fluxo de crescimento.

Korndörfer et al. (1999) indicam a aplicação de zinco em cana-de-açúcar nas áreas deficientes do nutriente, especialmente em solos arenosos e com baixo teor de matéria orgânica, caso comum nas áreas de expansão da cultura no Noroeste do Estado de São Paulo.

Na Tabela 17 estão apresentadas as equações de regressão e R^2 para os teores de zinco no solo.

Tabela 17: Equações de regressão e R^2 para resultados dos teores de zinco (mg dm^{-3}) no solo para cana-planta e para cana-soca.

Boro (kg ha^{-1})	Zinco (mg dm^{-3}) Cana-planta	R^2
0	$Y = -0,0104x^2 + 0,0608x + 0,7883$	0,15
1	$Y = -0,0104x^2 + 0,0375x + 0,875$	0,61
2	$Y = -0,0125x^2 + 0,095x + 0,7567$	0,62

Boro (kg ha^{-1})	Zinco (mg dm^{-3}) Cana-soca	R^2
0	$Y = 0,0021x^2 - 0,0442x + 0,795$	0,56
1	$Y = -0,0083x^2 + 0,05x + 0,55$	0,44
2	$Y = -0,0021x^2 + 0,0142x + 0,595$	0,40

Na Tabela 18 estão apresentados os resultados de contrastes para os teores de zinco no solo, em função dos tratamentos, para cana-planta e para cana-soca.

Tabela 18. Resultados dos contrastes entre valores médios de zinco do solo.

Contrastes entre Tratamentos	F	Zinco (mg dm^{-3}) Cana-Planta x Cana-Soca
T1T2T3T4 x T1T2T3T4	2,85 ^{ns}	0,83 x 0,69
T5T6T7T8 x T5T6T7T8	10,70 ^{**}	0,84 x 0,58
T9T10T11T12 x T9T10T11T12	10,70 ^{**}	0,87 x 0,61

^{ns} Não significativo. ^{**} Significativo 1%.

Analisando-se esses dados observa-se que houve diminuição nos teores de zinco, da cana-planta para a cana-soca, quando houve a aplicação de boro na dosagem de 1 e 2 kg ha^{-1} . Essa diminuição pode ser explicada pela fixação do zinco, uma vez que a fonte utilizada foi altamente solúvel (sulfato), sujeita à maior fixação desse nutriente.

Becaria (2010), a aplicação de Zn e Mo, no sulco de plantio foi capaz de aumentar o conteúdo foliar destes micronutrientes, assim como o Zn foi o micronutriente que proporcionou maiores ganhos de produtividade (20 t ha^{-1} em análise conjunta) em cana-planta.

5.3 Indicadores da qualidade tecnológica em cana-de-açúcar

Na Tabela 19 podem ser observados valores dos indicadores da qualidade tecnológica em cana, obtidos em novembro de 2013, um ano após a aplicação dos diferentes doses de boro e zinco aplicados via solo.

Tabela 19. Valores encontrados para os indicadores da qualidade tecnológica em cana-de-açúcar após os tratamentos com doses de boro e zinco na colheita de 2013.

Tratamento	Doses Zn	Doses B	Fibra	Brix	Pol	ATR
	..... kg ha ⁻¹ .....		..... % .....			kg t ⁻¹ açúcar
1	0	0	13,2	20,6	15,1	150,2
2	2	0	13,5	21,9	15,6	153,4
3	4	0	13,6	19,9	13,9	140,5
4	6	0	13,7	20,7	14,7	145,7
5	0	1	13,8	21,0	14,2	143,6
6	2	1	13,3	20,2	14,5	151,5
7	4	1	14,1	20,7	14,7	147,8
8	6	1	13,6	20,6	14,7	149,2
9	0	2	14,0	20,3	14,9	144,8
10	2	2	12,3	20,0	15,4	148,4
11	4	2	13,4	19,6	14,3	142,8
12	6	2	12,6	20,2	15,4	151,3
Média			13,4	20,5	14,8	147,5
CV (%)			3,8	2,8	3,4	5,6
DP			0,5	0,6	0,5	3,8

CV = Coeficiente de Variação DP = Desvio Padrão

Analisando os resultados da Tabela 19 observa-se que não houve diferença significativa dos tratamentos em relação aos indicadores de qualidade tecnológica para cana-planta.

Na Tabela 20 podem ser observados valores dos indicadores da qualidade tecnológica em cana, obtidos em novembro de 2014, dois anos após a aplicação dos diferentes doses de boro e zinco aplicados via solo.

Tabela 20. Valores encontrados para os indicadores da qualidade tecnológica em cana-de-açúcar após os tratamentos com doses de boro e zinco (2014).

Tratamento	Doses Zn	Doses B	Fibra	Brix	Pol	ATR
	..... kg ha ⁻¹ .....		..... % .....	kg t ⁻¹ açúcar		
1	0	0	12,1	20,4	15,1	150,5
2	2	0	12,0	19,6	14,4	143,7
3	4	0	12,0	20,0	15,0	149,3
4	6	0	12,1	19,3	14,1	141,0
5	0	1	12,0	20,0	14,6	145,8
6	2	1	12,1	19,3	14,0	140,6
7	4	1	11,8	19,9	14,8	147,9
8	6	1	11,9	20,4	15,2	151,0
9	0	2	12,1	20,7	15,4	153,4
10	2	2	12,1	20,6	15,1	150,9
11	4	2	11,7	18,4	13,6	136,5
12	6	2	12,5	20,1	14,6	146,2
Média			12,0	19,9	14,7	146,4
CV (%)			0,2	3,1	3,5	4,8
DP			0,5	0,6	0,5	3,3

CV = Coeficiente de Variação DP = Desvio Padrão

Pelos valores apresentados observa-se que não houve diferença significativa para os indicadores da qualidade tecnológica para cana-planta.

5.3.1 Fibra

Para os valores de fibra não houve aumento significativo em relação às doses de boro e zinco aplicados no sulco de plantio. Mas, verificou-se que, para cana-planta, os valores encontrados para fibra foram mais elevados quando comparados aos resultados obtidos para cana-soca. Quanto à porcentagem de fibra da cana, Teixeira Filho et al. (2013) verificaram diferença significativa entre as fontes de Zn apenas para cana-planta, sendo que o sulfato de Zn proporcionou a maior porcentagem de fibra.

Contudo, ressalta-se que os valores obtidos, estão dentro da faixa considerada adequada para fibra da cana (de 11 a 13%), de acordo com Ripoli e Ripoli (2004).

5.3.2 Brix

Outro aspecto analisado quanto à qualidade tecnológica da cana foi o Brix. Analisando os resultados das Tabelas 19 e 20 verifica-se que não houve efeito da adubação com os micronutrientes boro e zinco. Para cana-planta, o valor mais elevado foi observado quando não foi aplicado boro na dose $2,0 \text{ kg ha}^{-1}$. Quanto aos valores de Brix encontrados para cana-soca nota-se que o maior resultado foi verificado quando a dose de boro foi $2,0 \text{ mg ha}^{-1}$ sem aplicação de zinco.

Teixeira Filho et al. (2013) constataram que as doses de zinco influenciaram significativamente o Brix da 1ª cana-soca, ajustando-se a função quadrática com o ponto de máximo brix da cana sendo alcançado, com a dose de $4,25 \text{ kg ha}^{-1}$ do micronutriente. Isto mostra que a adubação com zinco pode elevar a porcentagem de sólidos solúveis totais (açúcares e não açúcares). Franco et al. (2008), também constataram aumento significativo na porcentagem de Brix da cana-soca pela aplicação de zinco na cana-planta. Por outro lado, Andrade et al. (1995), Korndörfer et al. (1995) e Farias et al. (2009) não verificaram efeito da adubação com zinco no Brix da cana.

5.3.3 ATR

Nas Tabelas 19 e 20 foram apresentados os resultados obtidos para ATR para cana-planta e para cana-soca, respectivamente. Verifica-se que não houve efeito das doses de boro e zinco. Analisando esses dados observa-se que não houve diferença significativa para ATR pela adubação com boro e zinco. Não houve diferença entre os anos, mas no mesmo ano, houve diferença importante no aumento de ATR na dose de $6,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de zinco. O ATR aumentou de 144 para 152 na cana-planta (Tabela 19), representando acréscimo de 5,5% de ATR, sendo significativo para qualidade tecnológica da cana-de-açúcar e, conseqüentemente para o produtor. O ATR constitui é base de referência de pagamento de cana, refletindo o resultado da diferença entre ART (açúcares redutores totais) da cana e as perdas que eram de 12%, que segundo Termo de Revisão do Sistema Consecana (2006) reduziu a 9,5% na lavagem de cana, extração (perda de Pol no bagaço final), torta dos filtros e as indeterminadas.

Andrade et al. (1995) não encontraram alterações nos valores de ATR pelas aplicações isoladas de B, Cu e Zn, na forma de sais solúveis ou utilizando óxidos silicatados, em um Latossolo Vermelho escuro com teores médios de B e Cu e baixo de Zn no solo. Andrade et al. (1995) também não encontraram respostas de ATR às aplicações isoladas de B, Cu e Zn na forma de sais solúveis ou utilizando óxidos silicatados, em um Latossolo Vermelho escuro com teores médios de B e Cu e baixo de Zn no solo.

Marinho e Albuquerque (1981), em três locais diferentes, trabalhando com doses de Cu e Zn em solos franco-arenosos nos tabuleiros alagoanos, não encontraram respostas à aplicação de Zn na qualidade industrial da cana-planta. Teixeira Filho et al. (2013) quantificaram ATR da cana e encontraram diferença significativa entre as fontes de Zn apenas para a 1ª cana-soca, sendo que o sulfato e quelato de Zn proporcionaram maior quantidade de açúcar total recuperável (ATR) da cana, em relação ao FTE de Zn. Franco et al. (2008), encontraram respostas significativas à aplicação de 3 kg ha⁻¹ de Zn, num Latossolo Vermelho Amarelo com baixo teor de Zn no solo, para ATR em cana-planta.

5.3.4 Pol

Os valores da quantidade aparente de sacarose, expressos em Pol%, não diferiram significativamente em relação aos tratamentos (Tabelas 19 e 20). De acordo com estudos conduzidos por Otto et al. (2010), o efeito benéfico do Zn deve ser realçado porque a sua aplicação aumentou significativamente os valores de Brix e Pol.

Os valores observados no experimento podem ser considerados adequados, quando comparando com valores obtidos por Ripoli e Ripoli (2004), onde afirma que a Pol do caldo da cana-de-açúcar encontrados foram satisfatórios, uma vez que ficaram acima de 14%. Farias et al. (2009), avaliando a qualidade industrial de cana-de-açúcar (variedade SP791011) sob irrigação e a aplicação de doses de Zn (0, 1, 2, 3 e 4 kg ha⁻¹), em solo do Tabuleiro Costeiro paraibano, também não observaram influência da adubação com zinco sobre a Pol da cana. Por sua vez, Andrade et al. (1995), trabalhando com a aplicação de fritas e de fontes solúveis de boro, cobre e zinco (sulfato de Zn), via solo, no sulco de plantio da variedade SP701143, cultivado em Latossolo Vermelho distrófico de textura média

com baixo teor de Zn ($0,3 \text{ mg dm}^{-3}$), verificaram que tanto a aplicação conjunta (fritas) como a aplicação isolada destes micronutrientes, não resultou em aumento dos teores foliares de Zn, nos parâmetros tecnológicos e na produtividade de colmos.

Franco et al. (2008), trabalhando com doses de Zn ($0, 3$ e 6 kg ha^{-1}) aplicadas ao solo como sulfato de zinco, verificaram aumento nos teores de Brix, Pol da cana e ATR da cana-planta.

Becaria (2010) observou que a qualidade industrial não foi alterada pela aplicação de micronutrientes em cana-planta.

5.4 Indicadores de produtividade da cana-de-açúcar

Na Tabela 21 podem ser observados valores médios obtidos da produtividade da cana-de-açúcar (t ha^{-1}) para cana-planta e para cana-soca.

Tabela 21. Médias das produtividades da cana-planta e da cana-soca (t ha^{-1}).

Tratamento	Boro	Zinco	Produtividade	
	..... \text{kg ha^{-1} .....	.....	..... \text{t ha^{-1} .....	.....
T1	0	0	119,3	101,3
T2	0	2	126,2	107,3
T3	0	4	119,8	110,9
T4	0	6	118,0	115,6
T5	1	0	121,8	93,3
T6	1	2	117,0	109,9
T7	1	4	104,6	90,3
T8	1	6	112,8	93,8
T9	2	0	111,6	86,3
T10	2	2	123,7	104,7
T11	2	4	121,9	101,9
T12	2	6	125,2	101,2
Média			118,5	101,4
CV (%)			3,1	3,6
DP			3,7	3,7

CV = Coeficiente de Variação DP = Desvio Padrão

Observando os valores médios obtidos na Tabela 21, verifica-se que não houve diferença significativa em relação à produtividade da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$), tanto para cana-planta quanto para cana-soca.

Observando os resultados das doses de zinco apenas para cana-soca, nota-se que os valores de produtividade atingiram 120 e 109 $t\ ha^{-1}$. Franco et al. (2011), observaram aumentos quando da aplicação de 4,0 e 6,0 $kg\ ha^{-1}$ de zinco (respectivamente cana-planta e cana-soca), na dose zero de boro.

Na Tabela 22, são apresentadas as equações de regressão para as produtividades de cana (TCH).

Tabela 22. Equações de regressão e R^2 para resultados dos valores de TCH ($t\ ha^{-1}$) para cana-planta e cana-soca.

Boro ($kg\ ha^{-1}$)	TCH ($t\ ha^{-1}$) Cana-planta	R^2
0	$Y = - 0,5381x^2 + 2,7222x + 120,19$	0,59
1	$Y = 0,8117x^2 - 6,837x + 123,16$	0,75
2	$Y = - 0,5546x^2 + 5,2722x + 112,54$	0,84

Boro ($kg\ ha^{-1}$)	TCH ($t\ ha^{-1}$) Cana-soca	R^2
0	$Y = - 0,0819x^2 + 2,8134x + 101,48$	0,59
1	$Y = - 0,8196x^2 + 4,0095x + 96,257$	0,25
2	$Y = - 1,1935x^2 + 9,2518x + 87,498$	0,87

Na Tabela 23 estão apresentados os contrastes para os valores médios de produtividade da cana-de-açúcar (TCH), para cana-planta e cana-soca, em função da aplicação de doses de boro e zinco no sulco de plantio.

Tabela 23. Resultados dos contrastes entre valores médios de produtividade da cana-de-açúcar (TCH).

Contrastes	F	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		
		Cana-Planta	x	Cana-Soca
T1T2T3T4 x T1T2T3T4	9,68*	120,82	x	108,77
T5T6T7T8 x T5T6T7T8	19,74**	114,02	x	96,81
T9T10T11T12 x T9T10T11T12	30,12**	120,59	x	98,54

* e ** Significativo a 5 e 1%, respectivamente.

Observa-se na Tabela 21 tanto em cana-planta, como em cana-soca, altas produtividades; sendo que o zinco apresentou produtividades superiores em cana-soca, com aumento próximo a 15% na dose de $6,0 \text{ kg ha}^{-1}$, independentemente da aplicação de boro. Nota-se que as maiores produtividades em cana-planta, ano 2013 ($126,2 \text{ t ha}^{-1}$) foram encontradas pela utilização de 2 kg ha^{-1} de zinco na ausência de boro com aumento de cerca de 6% em relação ao tratamento sem aplicação de zinco e boro.

Em cana-soca a maior produtividade foi $115,60 \text{ t ha}^{-1}$, alcançada pelo tratamento de 6 kg ha^{-1} de zinco na ausência de boro. Esse aumento foi de 12% em relação ao tratamento controle. Nos tratamentos em que foram utilizados $2,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de boro e zinco, respectivamente, observa-se incremento de produtividade de 10% para cana-planta e de 18% para cana-soca em relação ao tratamento sem aplicação de zinco.

6 CONCLUSÃO

Nas condições do experimento, num solo Argissolo, no município de Martinópolis - SP, utilizando a variedade de cana-de-açúcar RB 867515, nos anos agrícolas de 2013 e 2014, a aplicação de boro (H_3BO_3) e zinco ($ZnSO_4 \cdot H_2O$) no sulco de plantio, revelou as seguintes conclusões:

a) Os teores foliares de fósforo e zinco, pela técnica da diagnose foliar, revelaram apenas aumento para os teores de zinco, na dose de $4,0 \text{ kg ha}^{-1}$ do nutriente, independentemente das doses de boro.

b) Os teores foliares de boro variaram na faixa de $1,5$ a $2,8 \text{ mg kg}^{-1}$ em cana-planta e de $4,5$ a $5,0 \text{ mg kg}^{-1}$ em cana-soca.

c) Os teores foliares de boro encontrados estão abaixo da faixa de teores adequados citados por Raij e Cantarella (1996) sendo entre 10 a 30 mg kg^{-1} , porém dentro da faixa citada por Anderson e Bowen (1992) de $2,0$ a $7,0 \text{ mg kg}^{-1}$, sugerindo novos estudos para calibração desse nutriente.

d) Os teores foliares de zinco variaram na faixa de $6,5$ a $7,4 \text{ mg kg}^{-1}$ em cana-planta, e de $8,0$ a $19,7 \text{ mg kg}^{-1}$ em cana-soca.

e) Os valores encontrados estão abaixo dos citados por Raij e Cantarella (1996) de 10 a 50 mg kg^{-1} , e próximos da faixa de 13 a 20 mg kg^{-1} como citado por Anderson (1992), também sugerindo novos estudos de calibração para esse nutriente.

f) Os teores de boro no solo não aumentaram pela aplicação desse nutriente variando na faixa de $0,57$ a $0,74 \text{ mg dm}^{-3}$ para cana-planta, e de $0,07$ a $0,11 \text{ mg dm}^{-3}$ para cana-soca.

g) Os teores de zinco no solo não foram influenciados pela aplicação do mesmo, variando de $0,83$ a $0,87 \text{ mg dm}^{-3}$ em cana-planta, e de $0,58$ a $0,69 \text{ mg dm}^{-3}$ em cana-soca.

h) Os atributos tecnológicos (Fibra, Brix, Pol e ATR) não foram influenciados significativamente pela adubação com boro e zinco.

i) A produtividade média da cana-planta foi de 118,5 t ha⁻¹ e da cana-soca de 101,4 t ha⁻¹. Em cana-planta as maiores produtividades foram atingidas pela aplicação de 2,0 kg ha⁻¹ de zinco representado pelo tratamento 2 (T2: B=0 e Zn=2,0 kg ha⁻¹), e no tratamento 10 (T10: B=2,0 e Zn=2,0 kg ha⁻¹), com aumento respectivo de 6% e 10%. Em cana-soca houve resposta da produtividade pela aplicação de zinco no sulco de plantio, sendo que para a dose de 6,0 kg ha⁻¹ de zinco, o maior aumento da produtividade foi de 52% na ausência de boro, ou seja, no tratamento 4 (T4: B=0 e Zn=6 kg ha⁻¹) em relação ao tratamento 1 (T1: B=0 e Zn=0). Na dose de 2,0 kg ha⁻¹ de zinco, onde os aumentos de produtividade foram de 15 e 17,5%, respectivamente para as doses de 1,0 kg ha⁻¹ de boro no tratamento 6 (T6: B=1 e Zn=2 kg ha⁻¹) e no tratamento 10 (T10: B=2,0 e Zn=2,0 kg ha⁻¹), em relação ao tratamento sem zinco .

REFERÊNCIAS

- ADORNA, J. C. **Adubação com micronutrientes no plantio da cana-de-açúcar**. 2011. 56 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP – Campus de Botucatu, Botucatu – SP.
- ALLEONI, L.R.F.; CAMARGO, O.A.; CASAGRANDE, J.C. Isotermas de Langmuir e de Freundlich na descrição da adsorção de boro em solos altamente intemperizados. **Sci. Agric.**, v.55, p.379-387, 1998.
- ANDERSON, D.L.; BOWEN, J.E. **Nutrição de cana-de-açúcar**. Piracicaba: POTAFOS, 1992. 40p.
- ANDRADE, L. A. B. et al. Efeitos das aplicações de fritas e de fontes solúveis de boro, cobre e zinco, via solo, na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), variedade SP70- 1143. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.13, n.5, p.21-27, 1995.
- ASAD, A.; BLAMEY, F.P.C.; EDWARDS, D.G. Effects of boron foliar applications on vegetative and reproductive growth of sunflower. **Annals of Botany**, v.92, p.565-570, 2003.
- BATAGLIA, O.C. Micronutrientes: disponibilidade e interações. In: BORKERT, C. M. (org.) **Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira**. Londrina: EMBRAPA-CNPS/IAPAR/ Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p. 121-132.
- BECARIA, G.R.G. **Resposta da cana-planta à aplicação de micronutrientes**. 2010. 70f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Sub-tropical) - Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas–SP.
- BOARETTO, A.E.; TIRITAN, C.S.; MURAOKA, T. Effects of foliar applications of boron on citrus fruit and on foliage and soil boron concentration. In: BELL, R.W.; RERKASEM, B. (eds.). **Boron in Soils and Plants**. New York: Kluwer, 1997.p.121-123.
- BROWN, P.H. et al. Uptake and transport of boron. In: GOLDBACH, H.E. et al. (Eds.). **Boron in plant and animal nutrition**. New York: Kluwer, Pledum, 2002. p.87-103.
- CAKMAK, I.; Kurz, H.; MARSCHNER, H. Short-term effects of boron, germanium and high light intensity on membrane permeability in boron deficient leaves of sunflower. **Physiol. Plantarum**, v.95, p.11-18, 1995.
- CAKMAK, I.; RÖMHELD, V. Boron deficiency induced impairments of cellular functions in plants. **Plant and Soil**, v.193, p.71-83, 1997.
- CAMARGO, O.A. **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Potafós,1991. 244p.

CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S.; DECHEN, A.R. Efeitos do pH e da incubação na extração do manganês, zinco, cobre e ferro do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.6, p.83-88, 1982.

CASARIN, V.; VILLA NOVA, V. S.; FORLI, F. Micronutrientes em cana-de-açúcar. In: MARQUES, M. O.; MUTTON, M. A. (Coord.). **Tópicos em tecnologia sucroalcooleira**. Jaboticabal: FUNEP, 2006. v.1, p.65-76.

CATANI, R.A.; ALCARDE, J.C.; KROLL, F.M. A adsorção de boro pelo solo. **An. Esc. Super. Agric. Luiz de Queiroz**, Piracicaba, v.28, p.189-198, 1971.
Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0071-12761971000100012&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 31 ago. 2016.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0071-12761971000100012>.

CONAB. **Levantamento da safra 2016/17**. 2016. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_04_18_14_27_15_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_16.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2016.

CONSECANA. **Manual de instruções**. 5. ed. Piracicaba: Consecana, 2006.112 p.

COSTA FILHO, R.T.; PRADO, R.M. Zinco na nutrição e na produção de colmos da terceira soqueira de cana-de-açúcar cultivada em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **STAB Açúcar Álcool e Subprodutos**, v. 26, p. 6-9, 2008.

COSTA, J.M.; OLIVEIRA, E.F. Fertilidade do solo e nutrição de plantas. In: NOMURA, E.S. **Boro em bananeira**. Campinas, 2010. 56f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produção Agrícola) - Instituto Agrônomo, Campinas – SP.

DECHEN, A.R.; HAAG, H.P; CARMELLO, Q.A.C. Função dos micronutrientes nas plantas. In: FERREIRA, M.E; CRUZ, M.C.P. (Org.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato e CNPq, 1991. p.66-78.

DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. Micronutrientes. In: FERNANDES, M.F. (ed). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.327-354.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 2006. 306 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Andrei, 2006. 403p.

ESPIRONELLO, A. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B.V. et al. (Orgs.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Fundação IAC, 1996. p.237-239. (Boletim, 100).

FARIAS, C.H.A. et al. Qualidade industrial de cana-de-açúcar sob irrigação e adubação com zinco, em tabuleiro costeiro paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.419-428, 2009.

- FERNANDES, A.M. et al. Composição químico-bromatológica de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp L.*) com diferentes ciclos de produção (precoce e intermediário) em três idades de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.32, n.4, p. 977-985, 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbz/v32n4/17877.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 16.
- FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA (RBRAS), 45, 2000, São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.
- FRANCO, H.C.J. et al. Acúmulo de nutrientes pela canaplanta. **Stab Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.26, n.5, p.41-45, 2008.
- FURLANI, A.M.C. Nutrição mineral. In: KERBAUY, G.B. (ed). **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. p.40-75.
- GOLDBERG, S.; LESCH, S. M.; SUAREZ, D. L. Predicting boron adsorption by soils using soil chemical parameters in the constant capacitance model. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.64, p.1356-1363, 2000.
- HAN, S. et al. Boron deficiency decreases growth and photosynthesis, and increases starch and hexoses in leaves of citrus seedlings. **Journal of Plant Physiology**, v.165, p.1331-1341, 2008.
- JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis**. New Jersey: Prentice Hall, 1965. 498p.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. Boca Raton: CRC, 2000. p. 331.
- KIEKENS, L. Zinc. In: Alloway, B.J. (ed.). **Heavy metals in soils**. Glasgow: Blackie and Son, 1990. p. 261-277.
- KORNDÖRFER, G.H. et al. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5. ed. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 285-288.
- LINDSAY, W.L. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soils. In: MORTVEDT, J.J. (Eds). **Micronutrients in agriculture**. Wisconsin, Soil Science Society of America, 1991. p.94-112.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. 1. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. p.170-202.
- MALVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar**. São Paulo: 1982. Boletim Técnico Ultrafertil.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFÓS, 1997.319p.

MARINHO, M.L.; ALBUQUERQUE, G.A.C. Efeito do cobre e do zinco na produção de cana-de-açúcar em solos de tabuleiros de Alagoas. **Brasil Açucareiro**, v.98, p.41-50, 1981.

MARQUES, M.O. Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça. In: SEGATO, S.V. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Editorial, 2001. p.369-375.

MARQUES, M.O. et al. Qualidade e produtividade de cana-de-açúcar cultivada em solo com doses crescentes de lodo de esgoto. **Biosci. J.**, v.23, p.111-122, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832010000200029&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso: 31 ago. 2016.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. Orlando: Academic Press, 1995. 889p.

MARUBAYASHI, O. M. **Efeitos de fontes e formas de aplicação de boro e zinco na cultura cafeeira**. 1989. 74p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Campus de Jaboticabal, Jaboticabal, 1989.

McCRAY, J.M. et al. Sugarcane Plant Nutrient Diagnosis. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/sc075>>. Acesso em: 18 fev. 2010.

MELLIS, E.V.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H. Micronutrientes. In: DINARDO-MIRANDA, L.L; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDEL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 331-336.

MORAES, L.A.C.; MORAES, V.H.F.; MOREIRA, A. **Relação entre a flexibilidade do caule de seringueira e a carência de boro**. 2002. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/108784/1/1431.pdf>>. Acesso em 31 ago. 2016.

MOREIRA, R.S. **Banana: teoria e prática de cultivo**. 2. ed. São Paulo: Fundação Cargill, 1999.

MOURA FILHO, G. et al. Extração e exportação de nutrientes pelas cultivas RB92579 e RB93509 no ciclo de cana-planta. In: IX CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 9. **Anais...** Maceió, 2008. p.307-311.

NASCIMENTO, C.W.A.; FONTES, R.L.F. Correlação entre características de Latossolos e parâmetros de equações de adsorção de cobre e zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/%0D/rbcs/v28n6/22917.pdfv>>. Acesso em: 31 ago. 2016.

OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E. Mobilidade de metais pesados em um Latossolo Amarelo Distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.4, p.807-812, 2001.

OLSEN, S.R. Micronutrient interactions. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L. (Ed.) **Micronutrients in agriculture**. Madison: SSSA, 1972. p.243-264.

ORLANDO FILHO, J. Calagem e adubação da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S.; OLIVEIRA, E.A.M. (eds.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ/USP, 1993. p.133-146.

OTTO, R.; LUZ, P.H.C. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1137-1145, 2010.

PÍPERAS, G.V.; CRESTE, J.E.; ECHER, F.R. Uso do DRIS na avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v.56, p.818-825, 2009.

QUINTERO DURÁN, R. **Efectos de la aplicación de elementos menores en caña de azúcar en suelos del valle del río Cauca**. Documento de Trabajo, Cali, n.530, 2010. 14 p. Disponível em: <http://www.cenicana.org/pdf/no_clasificacion/5921.pdf> Acesso em: 23 fev. 2010.

RAIJ, B.V. et al. Análise química para avaliação de fertilidade do solo. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285 p.

RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B.V. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. p.233-239.

REDDY, M.R.; PERKINS, H.F. Fixation of zinc by clay minerals. **Soil Science of America Proceedings**, v.38, p.229-237, 1974.

REIS JUNIOR, R.A.; MONNERAT, P.H. Validação de normas DRIS para a cultura da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.3, p.379-385, 2003.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Barros & Marques, 2004. 302 p.

SANTOS, L.G. et al. Fósforo e boro na produção de grãos e óleo no girassol. **Enciclopédia biosfera, Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v.6, n.11, 2010.

SARTORI, R.H. et al. Absorção radicular e foliar de 65Zn e sua redistribuição em laranjeiras. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.30, n. 2, p.523-527, Junho 2008. Disponível em: <http://www.producao.usp.br/bitstream/handle/BDPI/2575/art_SARTORI_Absorcao_radicular_e_foliar_de_65Zn_e_2008.pdf?sequence=1>. Acesso: 22 maio 2015.

SCHULTZ, N. **Efeito residual da adubação em cana planta e adubação nitrogenada em cana de primeira soca com aplicação de vinhaça**. 2009.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M.; MOZAMBANI, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V. (Eds.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 2006. Disponível em: <<http://www.iz.sp.gov.br/pdfsbia/1396555977.pdf>> Acesso em: 31 ago. 2016.

SYSTAT SOFTWARE. 2006. Disponível em: <<http://www.iz.sp.gov.br/pdfsbia/1396555977.pdf>> Acesso em: 31 ago. 2016.

SILVA, S.V. et al. Effect of lime levels and cultivars on yield and agroindustrial quality of sugarcane under Amazonic Oxisol. **Journal Agro@ambiente On-line**, v.8, n.3, p.298-305, 2014. Disponível em: <<file:///C:/Users/Fernanda%20Marangoni/Downloads/1785-9369-1-PB.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2016.

SHORROCKS, V.M. The occurrence and correction of boron deficiency. **Plant Soil**, v.193, p.121-148, 1997.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; SANTARÉM, E.R. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TASSO JÚNIOR, L.C. **Caracterização Agrotecnológica de cultivares de Cana-de-açúcar (Sccharum spp) na região centro-norte do estado de São Paulo**. Jaboticabal: FCAV/Unesp. 2007. 167p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2007.

TEIXEIRA FILHO, M.C.M. et al. Qualidade tecnológica e produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar submetida a adubação com zinco. **Semana: Ciências Agrárias**, v.34, n.4, p.1603-1614, 2013.

TOKESHI, H. Cana-de-açúcar. Ferreira, M.E; CRUZ, M.C.P. (Orgs.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fosfato e CNPq, 1991. p. 485-499.

TRANI, P.E.; HIROCE, R.; BATAGLIA, O. **Análise foliar: amostragem e interpretação**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 18p.

UDOP. **Variedades**. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/geral.php>>. Acesso em: 09 ago. 2009.

VALE, F.; ARAUJO, M.A.G.; VITTI, G.C. Avaliação do estado nutricional dos micronutrientes em áreas com cana-de-açúcar. In: FERTBIO, 2008. **Anais...** Londrina, 2008, 1 CD-ROM.

VITTI, G.C. **Avaliação e interpretação do enxofre no solo e na planta**. Jaboticabal: FUNEP, 1989. 37p.

VITTI, G.C.; MAZZA, J.A. **Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Potafós 2002. 16p. (Encarte técnico/Informações Agronômicas).

VITTI, G.C.; OLIVEIRA, D.B.; QUINTINO, T.A. Micronutrientes na cultura da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V. et al. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba, Ceres, 2005. p.121-138.

YAMADA, T. Boro: será que estamos aplicando a dose suficiente para o adequado desenvolvimento das plantas. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.90, jun. 2000.

ANEXOS

Anexo 1. Valores médios de macronutrientes encontrados nas folhas de cana-de-açúcar (novembro de 2013), em razão das doses de boro e zinco.

Tratamentos	Doses Zn	Doses B	N	P	K	Ca	Mg	S
 kg ha ⁻¹ .....								..... g kg^{-1} .....
T1	0	0	12,27	1,69	13,77	2,63	1,73	1,07
T2	2	0	13,33	1,71	13,00	3,03	1,90	1,23
T3	4	0	12,83	1,82	12,83	3,33	1,83	0,93
T4	6	0	13,30	1,66	13,87	2,37	1,83	1,13
T5	0	1	13,17	1,80	12,17	3,40	1,87	1,00
T6	2	1	14,13	1,71	13,10	3,27	2,67	1,13
T7	4	1	12,90	1,77	13,70	3,10	1,93	1,00
T8	6	1	14,17	1,64	12,63	2,57	2,07	0,90
T9	0	2	13,37	1,73	12,30	3,80	2,30	0,90
T10	2	2	13,67	1,68	12,57	2,83	1,97	0,90
T11	4	2	14,53	1,70	11,80	3,40	2,53	1,03
T12	6	2	14,07	1,53	11,97	3,23	1,87	0,83

Anexo 2. Valores médios de micronutrientes encontrados nas folhas de cana-de-açúcar (novembro de 2013), em razão das doses de boro e zinco.

Tratamentos	Doses Zn	Doses B	B	Cu	Fe	Mn	Zn
 kg ha ⁻¹						
T1	0	0	2,83	9,87	54,67	54,03	7,30
T2	2	0	3,17	8,27	53,23	52,10	6,97
T3	4	0	1,00	9,60	74,03	113,83	11,30
T4	6	0	3,67	8,70	78,90	66,70	6,70
T5	0	1	2,17	10,50	71,70	49,33	8,47
T6	2	1	1,67	9,70	70,00	56,03	6,40
T7	4	1	0,67	9,03	77,83	68,43	5,60
T8	6	1	1,67	12,17	59,83	68,13	6,10
T9	0	2	3,83	19,63	68,53	67,20	7,60
T10	2	2	1,17	13,80	64,43	43,37	7,20
T11	4	2	2,50	8,00	76,33	58,73	6,73
T12	6	2	3,50	12,00	91,27	72,40	4,53

Anexo 3. Valores médios de macronutrientes encontrados nas folhas de cana-de-açúcar (novembro de 2014), em razão das doses de boro e zinco.

Tratamentos	Doses Zn	Doses B	N	P	K	Ca	Mg	S
	..... kg ha ⁻¹ .....		..... g kg ⁻¹					
T1	0	0	15,13	1,74	12,17	4,07	2,00	1,90
T2	2	0	14,33	1,58	13,37	3,50	2,00	2,40
T3	4	0	14,50	2,01	13,80	2,87	1,93	2,00
T4	6	0	15,23	3,16	12,63	3,67	1,90	1,47
T5	0	1	14,83	1,50	11,53	4,30	2,03	1,10
T6	2	1	14,63	1,53	12,13	3,53	2,03	1,37
T7	4	1	14,30	1,54	12,70	2,57	1,63	1,17
T8	6	1	14,67	1,49	8,87	3,80	1,80	1,10
T9	0	2	14,73	1,69	10,67	2,80	1,73	0,97
T10	2	2	14,73	1,65	12,20	2,97	1,90	1,00
T11	4	2	14,83	1,45	8,37	2,90	1,77	1,03
T12	6	2	15,03	1,62	9,07	3,27	1,90	1,03

Anexo 4. Valores médios de micronutrientes encontrados nas folhas de cana-de-açúcar (novembro de 2014), em razão das doses de boro e zinco.

Tratamentos	Doses Zn	Doses B	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	..... kg ha ⁻¹ .....		..... mg kg ⁻¹				
T1	0	0	5,00	4,93	195,87	40,17	4,05
T2	2	0	5,00	9,17	148,43	46,13	21,90
T3	4	0	5,00	6,60	256,67	46,10	38,50
T4	6	0	5,00	7,57	270,30	32,93	10,85
T5	0	1	5,00	3,60	185,30	46,70	5,60
T6	2	1	3,17	8,40	187,40	44,43	6,73
T7	4	1	5,00	9,27	130,07	36,87	24,13
T8	6	1	5,00	5,17	163,30	36,47	13,70
T9	0	2	5,00	9,03	215,80	42,23	4,03
T10	2	2	5,00	8,60	171,87	39,77	6,07
T11	4	2	5,00	11,23	152,87	26,70	10,20
T12	6	2	4,17	9,53	201,43	40,80	11,80

Anexo 5. Valores médios de macronutrientes encontrados no solo (novembro de 2013), em razão das doses de boro e zinco.

Tratamentos	Boro ... kg ha ⁻¹ ...	Zinco	pH	MO gdm ⁻³	P .. mg dm ⁻³ ..	S	H+Al	K mmolc dm ⁻³	Ca	Mg
1	0	0	5,8	10,4	17,7	2,4	12,0	1,3	20,4	11,3
2	0	2	5,8	9,9	16,8	6,6	12,3	1,4	17,7	9,7
3	0	4	5,6	10,6	16,9	4,8	13,9	1,4	16,0	8,2
4	0	6	5,6	10,7	17,7	3,2	13,0	1,6	16,0	8,2
5	1	0	5,8	10,7	14,3	2,5	12,4	1,2	17,1	8,7
6	1	2	5,8	10,1	19,1	3,7	12,0	1,3	17,7	9,2
7	1	4	6,0	11,2	16,1	2,3	11,4	1,5	19,2	10,2
8	1	6	5,9	10,5	16,5	3,1	12,5	1,4	17,2	9,2
9	2	0	5,7	10,9	17,2	6,8	12,7	1,2	18,6	8,6
10	2	2	5,8	11,2	16,6	3,0	12,2	1,3	19,0	8,9
11	2	4	5,7	10,1	13,0	5,7	13,1	1,5	23,8	15,4
12	2	6	5,7	10,8	16,8	3,4	13,0	1,1	18,0	9,2

Anexo 6. Valores médios de micronutrientes encontrados no solo (novembro de 2013), em razão das doses de boro e zinco.

Tratamentos	Boro kg ha ⁻¹	Zinco	Boro	Cobre	Ferro	Manganês	Zinco
			..... mg dm ⁻³				
1	0	0	0,5	0,8	12,8	3,3	0,8
2	0	2	0,7	0,7	13,9	2,4	0,7
3	0	4	0,4	1,1	20,6	3,8	1,0
4	0	6	0,6	0,8	18,9	3,2	0,7
5	1	0	0,8	0,8	15,0	3,1	0,9
6	1	2	0,8	1,5	13,2	2,7	0,8
7	1	4	0,7	1,3	10,1	3,6	0,9
8	1	6	0,6	1,1	13,5	2,3	0,7
9	2	0	0,8	1,0	13,1	3,2	0,7
10	2	2	0,7	1,0	13,4	3,1	1,0
11	2	4	0,8	1,2	15,9	3,2	0,9
12	2	6	0,5	1,1	15,0	3,0	0,9

Anexo 7. Valores médios de macronutrientes encontrados no solo (novembro de 2014), em razão das doses de boro e zinco.

Tratamentos	Boro kg ha ⁻¹	Zinco	pH	MO g dm ⁻³	P .. mg dm ⁻³ ..	S	H+Al	K mmolc dm ⁻³	Ca	Mg
1	0	0	5,1	9,1	9,1	2,80	19,3	2,0	9,4	6,1
2	0	2	5,4	9,2	16,6	1,97	16,4	2,0	11,0	5,7
3	0	4	5,7	9,0	10,6	1,90	13,9	1,7	14,2	8,4
4	0	6	5,4	9,5	13,9	1,97	17,0	1,8	9,8	5,1
5	1	0	5,4	8,8	11,6	2,87	18,0	2,0	9,2	5,3
6	1	2	5,7	9,1	28,5	1,93	14,6	1,9	14,4	6,4
7	1	4	5,8	9,0	16,4	1,93	13,8	2,1	17,2	9,9
8	1	6	5,7	7,8	10,7	2,03	15,4	2,3	9,6	6,3
9	2	0	5,9	9,1	12,6	1,33	12,4	1,7	13,9	7,0
10	2	2	5,9	8,5	14,5	2,27	13,9	1,7	17,6	8,9
11	2	4	5,7	8,7	11,4	2,53	15,4	2,5	12,5	6,1
12	2	6	5,9	8,3	16,5	3,53	12,5	1,9	15,9	8,5

Anexo 8. Valores médios de micronutrientes encontrados no solo (novembro de 2014), em razão das doses de boro e zinco.

Tratamento	Boro kg ha ⁻¹	Zinco	Boro	Cobre	Ferro mg dm ⁻³	Manganês	Zinco
1	0	0	0,2	0,1	39,1	7,2	0,8
2	0	2	0,1	0,2	28,6	6,6	0,8
3	0	4	0,1	0,2	21,4	5,5	0,6
4	0	6	0,1	0,4	40,0	5,3	0,6
5	1	0	0,0	0,5	25,5	5,8	0,5
6	1	2	0,1	0,7	23,8	4,9	0,7
7	1	4	0,1	0,5	18,9	5,5	0,6
8	1	6	0,1	0,7	25,8	7,0	0,6
9	2	0	0,0	0,7	16,4	5,9	0,6
10	2	2	0,1	0,7	23,5	4,8	0,6
11	2	4	0,1	0,9	27,3	7,0	0,6
12	2	6	0,1	0,8	15,3	5,3	0,6