

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**BORO EM CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM SOLUÇÃO  
NUTRITIVA**

**JORGE MARTINELLI MARTELLO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU-SP  
Janeiro – 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**BORO EM CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM SOLUÇÃO  
NUTRITIVA**

**JORGE MARTINELLI MARTELLO**

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu,  
para obtenção do título de Mestre em Agronomia  
(Energia na Agricultura).

BOTUCATU-SP  
Janeiro – 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

M376b Martello, Jorge Martinelli, 1989-  
Boro em cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva  
/ Jorge Martinelli Martello. - Botucatu : [s.n.], 2016  
ix, 54 f. : fots. color.; tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2016  
Orientador: Carlos Alexandre Costa Crusciol  
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar - Produtividade. 2. Deficiência de boro. 3. Nutrientes - Concentração. 4. Nutrição mineral. I. Crusciol, Carlos Alexandre Costa. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
CAMPUS DE BOTUCATU  
FACULDADE DE CIENCIAS AGRONOMICAS DE BOTUCATU

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** BORO EM CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM SOLUÇÃO NUTRITIVA

**AUTOR:** JORGE MARTINELLI MARTELLO

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

Dep de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Prof. Dr. ADALTON MAZETTI FERNANDES

Cerat / Unesp - Universidade Estadual Paulista "Julio Mesquita Filho"

Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

Dep de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Data da realização: 29 de janeiro de 2016.

**DEDICO**

*Ao meu pai, Vicente Paulo Martello, por ter plantado em mim, a semente que deu origem ao sonho de um dia chegar à pós-graduação; à minha mãe, Sandra Braga Martinelli Martello, uma pessoa admirável, que sempre lutou para que meus sonhos se tornassem realidade, devo a você tudo que hoje sou; ao meu irmão, Pedro Martinelli Martello, que me fez entender o verdadeiro significado da vida e a minha namorada, Mariana Mott, uma pessoa extraordinária, ao lado da qual me sinto muito feliz e realizado.*

**OFEREÇO**

*A toda minha família, que sempre foi a base e a grande fonte de inspiração para que eu enfrentasse as batalhas da vida.*

*Aos meus avós Vitorino Martinelli (in memoriam) e Antônio Martello Sobrinho, que despertaram em mim o verdadeiro interesse pela agricultura durante a minha infância. Nunca me esquecerei de suas sábias palavras; Às minhas avós Yolanda Braga e Thereza Martello por todo amor, carinho e cuidado dedicados a mim durante todos esses anos.*

***Amo todos vocês.***

## AGRADECIMENTOS

*Primeiramente a DEUS, pela oportunidade de realizar este curso, nos momentos difíceis, me dando força e coragem para seguir em frente;*

*Ao Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol pela grande amizade, paciência, apoio, disponibilidade e ética, além dos ensinamentos que levarei por toda a vida;*

*Aos Profs. Dr. Ciro Antônio Rosolem, Dr. Gaspar H. Korndörfer e Dr. Adalton Mazetti Fernandes pela colaboração e sugestões;*

*Meus sinceros agradecimentos aos demais professores dos cursos de pós-graduação em Agronomia – Agricultura e Energia na Agricultura, pelo incentivo, orientação e ensinamentos compartilhados;*

*À Dra. Gabriela Ferraz de Siqueira, mais conhecida como “Gabs”, por toda ajuda e compreensão durante a condução dos experimentos, pessoa fundamental para que este trabalho fosse concretizado;*

*Ao funcionário do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal Dr. Dorival Arruda pela amizade construída durante esses anos e, também, por todo apoio e dedicação disponibilizados durante às diversas fases do trabalho;*

*À Priscila Oliveira Martins pelas informações compartilhadas.*

*Aos demais funcionários do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal: Vera Lúcia, Eliane Gonçalves, Célio Mariano, Casimiro Alves, Milton Matheus Vieira e Cirinho, pela convivência diária; e a técnica de laboratório Carolina Felício pelas orientações e auxílio nas análises;*

*Agradeço ao grupo Raízen – Unidade da Barra Bonita/SP, bem como aos funcionários Sebastião Santos Ribeiro, Aduino Aparecido Biega, Jaqueline Cristiane Adorna e aos demais, por todo suporte disponibilizado e, também, pelo fornecimento das mudas de cana utilizadas no experimento;*

*Agradeço aos irmãos de República Cristiano Magalhães Pariz, Saulo Simões, Cleiton José Alves e Luiz Tadeu Jordão, por todo respeito, fraternidade e apoio na luta diária durante esses anos. Vocês foram fundamentais, jamais esquecerei cada um de vocês;*

*Aos grandes amigos da salinha de pós-graduação: Jayme Ferrari, Bruno Aires, Danilo Almeida, Mauricio Mancuso, Claudio Costa, Sueko Tanaka, Letusa Momesso, Daniela Almeida, Ariane Garcia, Antônio Carlos Carmeis Filho, José Gerardo Espinoza, Fernando Guidorizzi, Murilo de Souza, Kassiano Rocha, Tiara Guimarães, Dr. Otávio Bagiotto Rossato, Dra. Indiamara Marasca e Rafael Muller, por toda ajuda e também pelo*

*companheirismo.*

*Aos demais amigos da pós-graduação pelos laços de amizade construídos.*

*A estagiária Larissa Bonassi, pelo empenho e dedicação durante a execução dos experimentos.*

*Agradeço à minha namorada Mariana Mott pela paciência, apoio e compreensão e também à toda minha família por serem meu porto seguro nos momentos difíceis da vida, me dando suporte para que eu chegasse até aqui.*

*Aos programas de pós-graduação em Agronomia – Agricultura e Energia na Agricultura, pela oportunidade de realizar este curso e por toda infraestrutura fornecida.*

*A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudo.*

*Agradeço, ainda, a todos que de alguma forma contribuíram para realização desse trabalho.*



*Mestres não nascem mestres;  
mestres se tornam mestres.*

**SUMÁRIO**

1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	4
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
4.1 Boro no solo.....	6
4.2 Boro na planta.....	7
4.3 Absorção do boro em plantas.....	9
4.3.1 Absorção do boro via sistema radicular.....	9
4.3.2 Absorção de boro pelas folhas.....	10
4.4 Remobilização do boro em plantas.....	11
4.5 Boro na cultura da cana-de-açúcar.....	13
4.6 Sintomas de deficiência e toxicidez de B.....	14
4.7 Parâmetros morfológicos radiculares.....	15
4.8 Relações do B com outros nutrientes.....	16
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
5.1 Localização e características do ambiente experimental.....	18
5.2 Delineamento experimental.....	18
5.3 Caracterização das variedades de cana-de-açúcar.....	18
5.4 Instalação e condução do experimento.....	20
5.4.1 Solução nutritiva.....	20
5.4.2 Obtenção das plântulas.....	21
5.4.3 Transferência das plântulas.....	22
5.5 Obtenção dos dados.....	23
5.5.1 Parâmetros biométricos.....	23
5.5.2 Parâmetros morfológicos radiculares.....	23
5.5.3 Produção de matéria seca.....	24
5.5.4 Concentração de N, P, K, Ca e B.....	24
5.5.5 Quantidade acumulada de N, P, K, Ca e B.....	25
5.5.6 Absorção de nutrientes por unidade de comprimento de raiz.....	25
5.6 Análises estatísticas.....	25
6 RESULTADOS.....	26

7 DISCUSSÃO .....	37
7.1 Parâmetros morfológicos radiculares .....	37
7.2 Crescimento e produção de biomassa.....	39
7.3 Aspectos nutricionais.....	40
7.4 Diferenças varietais .....	42
8 CONCLUSÃO.....	43
<b>9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>44</b>

## 1 RESUMO

Recentemente no Brasil, a deficiência de boro têm sido constatada tanto em regiões tradicionais mas, principalmente, em regiões de expansão da cultura da cana-de-açúcar para solos arenosos e de baixa fertilidade. Relacionado a isso, doenças como estria vermelha (Bactéria - *Acidovorax avenae*), além de redução qualitativa e quantitativa da produtividade dos canaviais, têm sido observados. Portanto, estudos mais detalhados que revelem com maior clareza as particularidades deste micronutriente para a cultura se fazem necessários. Assim, objetivou-se com o presente trabalho avaliar o efeito da disponibilidade de boro em solução nutritiva sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea e, também, sobre a eficiência na absorção e concentração de nutrientes em duas variedades de cana-de-açúcar de ciclos semelhantes e recomendadas para o mesmo ambiente de produção. O experimento foi realizado em casa de vegetação, na Faculdade de Ciências Agrônomicas /UNESP, em Botucatu-SP, Brasil. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com esquema fatorial composto por duas variedades (1- RB867515 e 2- RB92579) e, duas concentrações de B na solução nutritiva (1-Deficiente:  $4,5 \mu\text{mol L}^{-1}$  e 2-Adequado:  $45 \mu\text{mol L}^{-1}$  de B), totalizando quatro tratamentos com quatro repetições. Foram avaliados os parâmetros biométricos das plantas e morfológicos das raízes, a produção de matéria seca, a concentração e o acúmulo de nutrientes na parte aérea, e a quantidade de nutrientes absorvidos por metro de raiz. Os dados foram submetidos à análise de variância e aplicação do teste LSD a 5% de significância para as médias obtidas. O desenvolvimento e o comprimento radicular e dos entrenós das plantas de cana-de-açúcar foram restringidos pela deficiência de boro e, a concentração de nutrientes na parte aérea também foi reduzida. A variedade RB92579 apresentou maior produção de MSRA, MSC, MSF, menor diâmetro

radicular e maior AP em relação a variedade RB867515, sob baixa concentração de B. As variedades de cana-de-açúcar estudadas comportam-se de maneira diferente frente a baixa disponibilidade de boro na solução nutritiva, sendo a variedade RB92579 mais tolerante e a variedade RB867515 mais suscetível a deficiência de boro.

Palavras-chave: *Saccharum* spp, deficiência de boro, *Acidovorax avenae*, desenvolvimento radicular, matéria seca, concentração de nutrientes.

BORON ON SUGARCANE GROWN IN NUTRIENT SOLUTION. Botucatu, 2016. 54 f  
Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências  
Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: JORGE MARTINELLI MARTELLO

Adviser: CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

## 2 SUMMARY

Recently in Brazil, boron deficiency has been verified both in traditional, but mainly in expanding regions of the sugarcane crop to areas with sandy and low fertility soils. Associated with that, diseases like red stripe (Bacteria - *Acidovorax avenae*), as well as, qualitative and quantitative reduction in the productivity of sugarcane plants, have been observed. Therefore, more detailed studies, in order to further clarify special features of this micronutrient for the crop, become necessary. Thus, the aim of the present study was to evaluate the effect of boron availability in nutrient solution, on the root and shoot growth, and also on the nutrient uptake efficiency and concentration in two sugarcane varieties with similar growth cycles, that are recommended for the same growth environment. The experiment was conducted in a greenhouse at the College of Agricultural Sciences – Department of Crop Science/UNESP, in Botucatu-SP, Brazil. The experimental design was completely randomized in a factorial composed of two varieties (1- RB867515 and 2- RB92579) and two boron concentrations in the nutrient solution (1-Deficient:  $4,5 \mu\text{mol L}^{-1}$  and 2-Adequate:  $45 \mu\text{mol L}^{-1}$  B), four treatments with four repetitions in total. Were evaluated, the biometric parameters of plants, root morphology, dry matter yield, nutrient concentration and uptake in shoots and the uptake of nutrients by root length unit. Data were subjected to the variance analysis and means compared by the LSD test at 5 % significance. The root length and internodes development of sugarcane plants were restricted by boron deficiency and the concentration of nutrients in shoots was also reduced. The variety RB92579 showed higher production of MSRA, MSC, MSF, smaller root diameter and larger AP regarding RB867515 variety, under low boron concentration. The varieties of sugarcane studied, behave in a different way across the low availability of boron in the nutrient solution, being variety RB92579 more tolerant, and variety RB867515 more susceptible to boron deficiency.

Keywords: *Saccharum* spp, boron deficiency, *Acidovorax avenae*, root development, dry matter, nutrient concentration.

### 3 INTRODUÇÃO

O boro é um elemento considerado essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas (WARINGTON, 1923) e sua disponibilidade no solo é um importante determinante da produção agrícola (TANAKA; FUJIWARA, 2008). Na solução do solo, o boro existe principalmente como ácido bórico não dissociado, podendo ser facilmente lixiviado em condições de alta pluviosidade, levando as plantas a manifestarem sintomas de deficiência deste micronutriente (SHORROCKS, 1997; YAN et al., 2006).

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) é uma das gramíneas mais cultivadas nas regiões tropicais, onde o Brasil é o maior produtor mundial, com destaque para região Centro-Sul e, principalmente, o estado de São Paulo. Além disso, é também o país com maior potencial de expansão em área plantada (GONÇALVES; VEIGA FILHO, 1998; CUNHA; MACHADO; COELHO; 2001). Na safra 2015/2016, aproximadamente 9 milhões de hectares agricultáveis do país foram ocupados com a cultura, e a produção atingiu a marca de 654,6 milhões de toneladas de matéria prima (CONAB, 2015).

A cultura da cana-de-açúcar no Brasil, possui relevada importância por produzir em grande escala açúcar e álcool, entre outros produtos, atuando com forte participação tanto no mercado interno como nas exportações (MORAES, 2000). Além disso, a energia elétrica gerada a partir da queima do bagaço e da palha tem contribuído para o abastecimento energético de algumas cidades, e ainda possui grande potencial de expansão neste seguimento (OLIVEIRA, 2007). Embora o país seja referência mundial no setor, a produtividade média da cana-de-açúcar está em torno de  $72 \text{ t ha}^{-1}$ , e pode ser considerada baixa, diante de todo o potencial genético apresentado principalmente pelas novas variedades disponíveis no mercado (ORLANDO FILHO et al., 2001).

Dentre os diversos fatores que podem levar a baixa produtividade dos canaviais, está a expansão da cultura em áreas com solos arenosos e de baixa fertilidade, nas quais além de práticas usuais de calagem, adubação NPK e rotação de culturas, a adubação com micronutrientes pode ser necessária. Há de se preocupar também com o fato de que a intensificação da produção, mesmo em áreas tradicionais, poderá levar ao esgotamento das reservas dos micronutrientes do solo, devido especialmente à generalização da prática de uso de fertilizantes químicos concentrados, sem reposição dos micronutrientes que são removidos pela cultura (ORLANDO FILHO et al., 2001).

Mundialmente e também no Brasil, entre os micronutrientes, a deficiência de B é a que ocorre com maior frequência nas culturas de forma geral, conseqüentemente prejuízos como a redução qualitativa e quantitativa da produtividade são constatados (GUPTA, 1979; BLEVINS; LUKASZEWSKI, 1998; ABREU et al., 2005). O B está relacionado a uma série de processos fisiológicos das plantas tais como: o desenvolvimento de raízes, metabolismo de carboidratos e transporte de açúcares através das membranas, síntese de ácidos nucléicos (DNA e RNA) e de fitohormônios, estrutura e funcionamento das membranas, formação de paredes celulares e divisão celular, balanço hormonal (AIA) entre outros processos (DECHEN et al., 1991; MARSHNER, 1995; MALAVOLTA et al., 1997; EPSTAIN; BLOOM, 2006).

O papel do B na nutrição de plantas é ainda o mais desconhecido dos nutrientes minerais (MARSCHNER, 1997). Portanto, estudos mais detalhados que revelem com maior clareza as particularidades deste micronutriente se fazem necessários. Assim, o entendimento da nutrição de boro é fundamental para o manejo desse elemento pois, poderá refletir em economia e sustentabilidade dos sistemas produtivos da cultura da cana-de-açúcar.

Em função do exposto o presente trabalho parte das seguintes hipóteses: a) Existem diferenças entre variedades com relação a tolerância /suscetibilidade a deficiência de B. b) Existem diferenças nos parâmetros morfológicos radiculares (comprimento, superfície e diâmetro) e biométricos das plantas de cana-de-açúcar (altura, comprimento e diâmetro de entrenós, número de folhas e de perfilhos e produção de matéria seca), bem como na concentração e acúmulo de nutrientes na parte aérea, quando submetidas a deficiência de B.

Portanto, objetivou-se avaliar o efeito da disponibilidade de B em solução nutritiva sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea e, também, sobre a concentração e a eficiência na absorção de nutrientes, por duas variedades de cana-de-açúcar, de ciclos semelhantes e recomendadas para o mesmo ambiente de produção.



## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Boro no solo

O elemento boro é representado pelo símbolo B, tem número atômico 5 e massa atômica de 10,811. Possui dois isótopos estáveis de massas 10 e 11, com abundância natural média de  $^{10}\text{B} = 80,1\%$  e  $^{11}\text{B} = 19,9\%$  (BIEVRE; BARNES, 1985). Na tabela periódica, o B é o único não metal pertencente à família do grupo IIIA e possui número de valência +3 (MARSCHNER, 1995).

Apesar de ser baixa a abundância na crosta terrestre, o B não ocorre de forma uniforme e está amplamente distribuído tanto na litosfera quanto na hidrosfera (SHORROCKS, 1997). A quantidade de B aumenta com a acidificação das rochas magmáticas, enquanto nas rochas sedimentares, o elemento está associado à fração de argila (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 1984). Segundo os mesmos autores, as maiores quantidades de B estão concentradas em regiões que já foram oceanos e em sedimentos marinhos argiláceos, portanto a quantidade de B pode servir como indicador de paleossalinidade.

A reatividade do B é muito alta para que ele ocorra no seu estado livre naturalmente. Contudo, pode-se encontrar combinado em diversos minerais, de que são exemplos, o ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ), a colemanita ( $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), a ulexita ( $\text{CaNaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ), o bórax ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) e a boracita ( $\text{Mg}_3\text{B}_7\text{O}_{13}\text{Cl}$ ) (BOARETTO, 2006).

A concentração de B no solo varia entre 20 a 200  $\text{mg dm}^{-3}$  de peso seco, entretanto, grande parte está indisponível para a planta. A fração de B no solo, solúvel

em água quente, que está disponível para planta varia de 0,2 a 2,0 mg dm<sup>-3</sup> e o contato íon raiz acontece predominantemente por fluxo de massa, além de interceptação radicular em menor proporção. O nutriente solúvel na solução do solo, é encontrado principalmente na forma de ácido bórico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>), na faixa de pH entre 4 a 8. Isto em parte, ajuda a explicar a relativa facilidade do B em ser lixiviado (MALAVOLTA et al., 1997; MENGEL; KIRKBY, 2001).

As classes de teores de B no solo, e relativa disponibilidade para as plantas são definidas como: alta (acima de 0,6 mg dm<sup>-3</sup>), média (entre 0,2 e 0,6 mg dm<sup>-3</sup>) e baixa (abaixo de 0,2 mg dm<sup>-3</sup>) (RAIJ et al., 1996).

Nesse sentido, em um trabalho realizado por Abreu et al. (2005), onde foi analisado o teor de micronutrientes existente na camada do solo de 0-20 cm, em um total de 13.416 amostras correspondentes a 21 estados brasileiros, constatou-se que 43% das amostras estão na classe de baixa disponibilidade de B para a maioria das culturas, 42% estão na classe média e apenas 15% apresentaram alto teor de B.

Da mesma forma, no trabalho realizado por Vale, Araujo e Vitti (2008), foram analisadas 890 amostras de solo, e respectivas análises foliares, em áreas tradicionais de cultivo de cana-de-açúcar na região de Ribeirão Preto e Catanduba, no estado de São Paulo. Esses autores constataram que em 96 % das áreas amostradas, os teores de B no solo encontram-se abaixo do nível crítico para a cultura, além disso, sintomas de deficiência generalizada de B no tecido foliar, também foram observados em 91% das lavouras amostradas.

Portanto, conclui-se que as quantidades aplicadas de B na agricultura são baixas e que algumas regiões agrícolas do país apresentam grandes áreas com deficiência de B no solo. Ficando assim evidente a necessidade de pesquisas mais detalhadas que promovam melhor entendimento da nutrição mineral de boro e seus impactos na cultura da cana-de-açúcar.

## **4.2 Boro na planta**

O B está relacionado a uma série de processos fisiológicos das plantas tais como: transporte de açúcar; síntese, estrutura e lignificação da parede celular, respiração, metabolismos como: de carboidratos, RNA, ácido indolacético (AIA), compostos fenólicos, ascorbato, fixação de nitrogênio e diminuição da toxidez de alumínio (MARSCHNER, 1997; MENGEL; KIRKBY, 2001). Entretanto, pode ser que alguns dos efeitos nos processos fisiológicos em que a ausência de B esteja relacionada não ocorram de forma direta e sim

sejam efeitos secundários ou “efeito cascata” (MARSCHNER, 1997).

A determinação das funções do B nas plantas requer considerações sobre as características físicas e químicas do nutriente e o processo que governa a sua absorção. A capacidade que o B tem de atravessar livremente a membrana plasmática resulta em uma larga flutuação na concentração do elemento no citoplasma (BROWN et al., 2002).

Uma função claramente definida do B nas plantas está ligada com a estabilização da parede celular. Entretanto, existe um crescente aumento nas evidências de que o B exerça papel na manutenção e integridade das membranas, e evidências na homeostase citoplasmática, sugerem que o B possa ter funções no citoplasma (GASSERT et al., 2002).

Existem inúmeros compostos biológicos no citoplasma ou na parede celular, que podem formar complexos de B (ácido bórico) com alguns açúcares, fenóis, ácidos orgânicos e polímeros (DEMBITSKY et al., 2002). Matoh (1997) constatou que o B pode ocorrer nas plantas superiores tanto em formas solúveis em água (localizado na região apoplástica na forma de ácido bórico) quanto em formas insolúveis. O B insolúvel em água está associado com rhamnogalacturona II (RG-II), que é composto de ácido bórico com duas cadeias do monômero RG-II (BOARETTO, 2006).

Kobayashi e Matoh (1997) propuseram que a localização do B na célula parece ser um pré-requisito para a identificação das suas funções, entretanto, os locais onde o ácido bórico é encontrado podem ser consequência das ligações de di-éster do ácido bórico com grupos de cis-diol de açúcar e fenóis.

Hu e Brown (1994) verificaram que o B está principalmente localizado na parede celular e a partição do nutriente é fortemente dependente da disponibilidade do B celular. Em condições limitantes de B, a quantidade do nutriente presente na parede celular representa no mínimo 95 a 96% do total de B presente na célula. Além disso, Matoh e Kobayashi (2002) verificaram que não ocorre aumento do B presente na parede celular quando as plantas são cultivadas em condições de alto suprimento do nutriente.

Sabe-se que, as plantas monocotiledôneas apresentam menor exigência de B e são mais sensíveis à toxidez do micronutriente do que as plantas dicotiledôneas. Esta sensibilidade diferenciada pode ocorrer devido às diferenças na parede celular entre elas (BROWN et al., 1992). Segundo Hu, Brown e Labavitch (1996), a exigência de B no tecido de cada espécie é determinada pelo nível de pectina na parede celular, o qual é menor nas plantas monocotiledôneas, em relação às dicotiledôneas.

Brown e Hu (1997) sugeriram que o papel do B na estrutura da parede

celular primária pode explicar quase todos os efeitos relatados sobre a deficiência do micronutriente e que a primária, e talvez única função do B, seria como componente estrutural da parede celular dos tecidos de crescimento, sendo que todos os outros efeitos metabólicos da deficiência de B ocorrem como consequência da inibição do crescimento da planta, ou seja, são causados pelo chamado “efeito cascata”.

### **4.3 Absorção do boro em plantas**

A absorção de B pode se dar tanto pelo sistema radicular quanto pelas folhas, sendo a raiz, o principal órgão para a absorção de nutrientes pelas plantas (BOARETTO, 2006).

#### **4.3.1 Absorção do boro via sistema radicular**

O B é absorvido da solução do solo pelas raízes, principalmente na forma de ácido bórico, e sua absorção é influenciada por fatores bióticos e abióticos, tais como: espécie vegetal, tipo de solo, matéria orgânica, teor de B no solo, pH e espécies iônicas presentes na solução do solo. Entre os fatores relacionados ao solo o pH é o que tem maior influência na absorção (HU; BROWN, 1997).

A absorção de B pelas plantas ainda é um assunto bastante controverso. Evidências significantes suportam que a absorção do nutriente pode ocorrer tanto de forma passiva (sem gasto de energia, a favor de um gradiente de concentração) quanto de forma ativa (com gasto de energia, contra um gradiente de concentração). Como a permeabilidade do plasmalema ao B é teoricamente alta, sugere-se que a absorção do elemento ocorre por processos não metabólicos, determinados pela concentração de B na solução do solo, pelas diferenças na permeabilidade das membranas, pela taxa de transpiração, pela formação de complexos dentro e fora das raízes e pela mobilidade do nutriente na planta (BROWN et al., 2002).

Dordas, Chrispeels e Brown (2000) sugeriram que a absorção de B ocorre pela combinação de dois tipos de transporte passivo através da membrana: pela simples difusão do nutriente através da dupla camada lipídica (cujo coeficiente de permeabilidade varia de acordo com a espécie), e possivelmente, pelo transporte através de canais intermediários, que são canais facilitadores da absorção de B e que podem ser saturados a baixas concentrações do nutriente.

Gassert et al. (2002) observaram que na absorção de B pelas raízes de girassol (*Helianthus annuus*), *Arabidopsis thaliana* e *Desmodium ovalifolium*, ocorre um induzido e ativo mecanismo de transporte na membrana plasmática quando estas plantas estão em condições de suprimento limitado do nutriente. Pfeffer et al. (1999) demonstraram em raízes de girassol (*Helianthus annuus*), que o mecanismo de absorção de B é dependente de processos metabólicos e este mecanismo pode ser facilmente ativado ou desativado em função do aumento ou diminuição da concentração de B na solução.

Brown et al. (2002) concluíram que o processo de absorção passiva de B parece prevalecer, entretanto, pesquisas recentes sugerem que existam mais de um mecanismo de absorção de B na planta, e a importância de cada mecanismo depende da concentração do B presente na solução do solo (TANAKA; FUJIWARA, 2008).

#### **4.3.2 Absorção de boro pelas folhas**

As células das folhas, da mesma forma que as células das raízes, absorvem os elementos minerais do apoplasto e da membrana plasmática, estando sujeitas aos mesmos fatores externos como concentração do nutriente, valência do íon, temperatura, e fatores internos, como atividade metabólica (MATTOS JUNIOR; BATAGLIA; QUAGGIO, 2005).

Em plantas terrestres, a absorção de solutos pela superfície das folhas é restrita, devido à presença da cutícula e de camadas de cera na face externa da parede das células da epiderme. A absorção foliar é mais lenta que a radicular, isso porque o percurso que o nutriente tem que percorrer para ser absorvido pelas folhas é maior do que para ser absorvido pelas raízes, visto que não existe na epiderme das raízes camada de cutícula e de ceras, que possam restringir a absorção do nutriente pela planta (FURLANI, 2004).

A absorção dos nutrientes pelas folhas é influenciada por inúmeros fatores: referente à planta (superfície foliar, presença de pêlos, hidratação da cutícula, idade da folha, espécie e variedade); referente à composição da solução (pH da solução, concentração do nutriente, íons acompanhantes e molhantes); e referente a outros fatores como, umidade do solo, umidade atmosférica, temperatura e luminosidade (MALAVOLTA et al., 1997).

O nutriente colocado na superfície da folha atravessa a cutícula, a parede celular e os espaços intermicelares e chega a superfície da plasmalema. A passagem do íon através da plasmalema pode ser desdobrada em fase ativa e fase passiva. A fase passiva é

a favor de um gradiente de concentração, ou seja, de uma região menos concentrada para uma região mais concentrada. Na fase ativa, existe gasto de energia proveniente da fosforilação oxidativa que ocorre nas mitocôndrias e da fosforilação fotossintética que ocorre no cloroplasto. Por esses dois mecanismos o nutriente vence a barreira do plasmalema e chega ao citoplasma (BOARETTO et al., 2003).

O nutriente, chegando ao citoplasma celular, pode atravessar o tonoplasto para chegar ao vacúolo, ou pode transportar-se para outras células por via de plasmodesmas, até chegar ao floema e daí ser transportado para os locais de atividades metabólicas intensa, formando os compostos que fazem parte da planta (BOARETTO et al., 2003). Um critério para avaliar a eficiência da pulverização foliar é a razão do nutriente aplicado na folha que é absorvido e mobilizado para outras partes da planta, incluindo o sistema radicular (BUKOVAC; WITTWER, 1957).

Muitos resultados na literatura têm demonstrado o comportamento de compostos orgânicos e inorgânicos quando aplicados sobre as folhas. Estes resultados têm sido obtidos com o uso de isótopos ( $^{32}\text{P}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{42}\text{K}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{15}\text{N}$  e  $^{10}\text{B}$ ), o que torna possível discriminar o elemento aplicado na folha do mesmo elemento presente na planta ou simultaneamente absorvido pelas raízes (CHAMEL, 1988).

A análise da literatura evidencia que a quantidade e intensidade do B absorvido pelas folhas variam de acordo com as espécies vegetais. Hanson (1991), empregando a técnica isotópica, demonstrou que a absorção de B por folhas de cerejeira ocorreu durante 15 dias após a aplicação foliar. Shu et al. (1994) verificaram que menos de 1% do  $^{10}\text{B}$  aplicado nas folhas de pessegueiro foi absorvido após 3 dias da aplicação. Picchioni, Weinbaum e Brown (1995) pulverizaram soluções enriquecidas em  $^{10}\text{B}$  nas folhas de diferentes espécies, e verificaram que após 24 horas da pulverização cerca de 88% a 96% do B aplicado foi absorvido. Kerrien, Chamel e Imbert (1997), utilizando-se de várias fontes de B marcado em  $^{10}\text{B}$ , demonstraram que cerca de 10% do B aplicado nas folhas foi absorvido após 2 dias da aplicação, e 12% após 12 dias.

#### **4.4 Remobilização do boro em plantas**

Nas plantas de forma geral, o B era considerado um nutriente imóvel. Porém pesquisas mais recentes têm demonstrado que as espécies vegetais apresentam diferentes características quanto à mobilidade do nutriente, podendo classificá-las em espécies em que o B tem redistribuição restrita e espécies em que o B é altamente móvel (BROWN;

SHELP, 1997).

Sabe-se que a mobilidade do B ocorre nas espécies que produzem polióis como produtos fotossintéticos primários, como demonstrado ocorrer em espécies do gênero *Pyrus*, *Malus* e *Prunus* por Hu e Brown (1996) e Hu et al. (1997). Segundo os mesmos autores, nestas espécies ocorre a formação de complexos polioliol-B-polioliol nos tecidos fotossintéticos e estes são transportados pelo floema até os drenos, como meristemas vegetativos e reprodutivos. Nas espécies que não produzem quantidades suficientes de polióis, o B, uma vez transportado até a folha pelo fluxo transpiratório, não pode entrar no floema, resultando na sua imobilidade (BROWN; HU, 1998).

Os polióis são açúcares simples como o sorbitol, manitol e dulcitol e estão presentes em muitos vegetais, como determinados por Zimmermann e Ziegler (1975). Porém em espécies do gênero *Saccharum* é encontrado no floema a sacarose, que segundo Marschner (1997), por não ter ligações cis-diol, não forma complexos estáveis com o B.

Nas espécies de plantas em que o B é móvel no floema, ocorre a formação de complexos contendo B com ligações cis-diol. O ácido bórico reage com álcoois formando complexos de boro ésteres ou neutro cis-diol monoborato ésteres ou monoborato com açúcar, os quais desempenham importante papel no transporte do nutriente na planta (DEMBITSKY et al., 2002; DORDAS et al., 2001).

A ocorrência do transporte do B das folhas em que foi aplicado, para outras partes das plantas desenvolvidas após a pulverização foliar, foi demonstrada em algumas espécies, através do uso de ácido bórico enriquecido em  $^{10}\text{B}$ . Shu et al. (1994) verificaram que 94% do B absorvido pelas folhas de pessegueiro, foi transportado para outras partes da planta em 3 dias. Perica et al. (2001) observaram que 39% do B presente na inflorescência de oliveira vieram da adubação foliar. Picchioni, Weinbaum e Brown (1995), em estudo com diferentes espécies, constataram que cerca de 70% a 80% do B absorvido pelas plantas foi mobilizado em 24 horas.

Nas espécies em que o B tem redistribuição restrita, o nutriente absorvido pelas raízes é transportado para a parte aérea pela corrente transpiratória (xilema) e se acumula nos pontos de crescimento das folhas e dos ramos. Isso pode ser evidenciado pelo gradiente da concentração de B em folhas de idades diferentes. Em plantas nas quais o B tem redistribuição restrita, o teor deste nutriente nas folhas velhas é muito maior que o teor nas folhas mais novas, entretanto, nas espécies em que o B é móvel no floema, as folhas mais velhas têm teores de B muito próximos aos das folhas mais novas (HU; BROWN, 1997).

#### 4.5 Boro na cultura da cana-de-açúcar

Apesar de essencial à vida das plantas, o papel do boro não está totalmente esclarecido. O íon borato pode complexar açúcares, indicando a probabilidade de sua participação no transporte de carboidratos das folhas para outros órgãos. Tal fato teria sua importância ressaltada no caso específico da cana-de-açúcar.

A cultura da cana-de-açúcar extrai cerca de 195 e 116 g de B para produzir 100 t de colmos industrializáveis e de folhas, respectivamente, totalizando 311 g de B (ORLANDO FILHO, 1993). Os teores foliares do elemento considerados adequados para cana-de-açúcar estão entre 10 e 30 mg kg<sup>-1</sup> do peso do material vegetal seco (ESPIRONELLO et al., 1996).

Na literatura poucos trabalhos relacionados a nutrição de B em cana-de-açúcar, foram encontrados. Nesse sentido, Alvarez e Wutke (1963), utilizando 1 kg ha<sup>-1</sup> de B no solo, e Malavolta (1990), com duas aplicações foliares de 0,175 g ha<sup>-1</sup> de B, conseguiram aumentos de produtividade da cana-de-açúcar, na ordem de 18%. Orlando Filho et al. (2001), obtiveram aumentos expressivos na ordem de 6 a 20% em canaviais dos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, aplicando doses de 6 e 3 L ha<sup>-1</sup> de B solúvel.

Adorna, Crusciol e Rossato (2013), concluíram que a aplicação de Zn e B propiciou o aumento na produtividade de colmos e açúcar em solo arenoso e com baixo teor do nutriente. Outros trabalhos recentes, associando o B ao uso de maturadores químicos, indicaram estreita correlação entre o fornecimento do nutriente na pré-colheita da cana-de-açúcar e o aumento do teor de sacarose das plantas (LEITE, 2010; SIQUEIRA, 2014).

Franco et al. (2009), constataram que o B na planta derivado do fertilizante <sup>10</sup>B, quantificado na colheita de cana-de-açúcar, representou uma pequena fração do total de B acumulado pela planta, em torno de 2% do montante total aplicado, indicando a baixa eficiência agrônômica da taxa de B aplicada (4 kg ha<sup>-1</sup>). Tendo em vista a falta de dados sobre recuperação do fertilizante <sup>10</sup>B por variedades de cana-de-açúcar na literatura mundial e o aspecto inédito deste estudo utilizando a técnica de diluição isotópica de <sup>10</sup>B para a cultura, fica evidente que os resultados não podem ser interpretados isoladamente, sobretudo se baseado exclusivamente na eficiência de aplicação de B (recuperação de 2%). Portanto novos estudos são necessários para refinar a recomendação de B para a cana-de-açúcar, não apenas no que diz respeito a taxa a ser aplicada, mas também para investigar o destino do micronutriente na planta.

Historicamente no setor canavieiro, pouca atenção tem sido dada para



a resposta da cana-de-açúcar à aplicação de micronutrientes. Estudos são escassos e os resultados na maioria das vezes inconclusivos.

Recentemente, empresas de fertilizantes têm promovido e recomendado a aplicação de micronutrientes para as culturas, via solo no sulco de plantio ou através das folhas, apesar da falta de apoio científico comprovando a eficácia destas práticas. Portanto, pesquisas mais eficientes se fazem necessárias, com intuito de se estabelecer os parâmetros subjacentes às aplicações de micronutrientes a fim de evitar uma aplicação excessiva, o que poderia aumentar desnecessariamente os custos de produção ou ainda prejudicar a cultura no caso de doses excessivas.

#### **4.6 Sintomas de deficiência e toxicidez de B**

Entre os micronutrientes, a deficiência de B tem sido observada com maior frequência em solos brasileiros e um número crescente de culturas têm apresentado sintomas visuais de deficiência de B (MOREIRA et al., 2000; ABREU et al., 2005). O B está presente no solo como  $H_3BO_3$  não dissociado, sendo facilmente lixiviado. A deficiência de B é mais comumente observada onde a taxa de infiltração de água é elevada (solos com textura arenosa, bem drenados e com baixo teor de matéria orgânica). A calagem excessiva também pode causar sua deficiência.

O B é um elemento essencial para o crescimento da planta, como componente de diversos ativadores e compostos enzimáticos, além de participar em diversos processos, tais como, na absorção de íons, transporte de carboidratos, síntese de lignina e celulose, além de ácidos nucleicos e proteínas (ALLEONI; CAMARGO; CASAGRANDE, 1998).

Os sintomas da deficiência de B estão relacionados com a mobilidade do nutriente na planta. Nas espécies em que é relativamente imóvel, o sintoma de deficiência que primeiro aparece é o desenvolvimento anormal dos pontos de crescimento apical, e com o decorrer do tempo, ocorre a morte das gemas apicais (MENGEL; KIRKBY, 2001).

Alguns autores observaram que os sintomas de deficiência de boro manifestam-se nos tecidos mais novos, nos quais ocorre intensa atividade metabólica e, conseqüentemente, elevado consumo de carboidratos. Portanto, sintomas de deficiência de B seriam na realidade sintomas de deficiência de glicídios (ORLANDO FILHO et al., 2001).

De acordo com Römheld (2001) e Dannel et al. (2002), a principal função do B é a estabilização das paredes celulares e presumivelmente, de biomembranas,

pela complexometria de compostos orgânicos de funcionalidade cis-diol. Consequentemente, a deficiência de B irá resultar na inibição do crescimento radicular. O envolvimento do B no metabolismo dos fenóis e AIA pode causar a morte nos pontos de crescimento e necrose em folhas novas (BOHNSACK; ALBERT, 1977).

Os sintomas de deficiência de B em cana-de-açúcar são caracterizados por folhas imaturas que aparecem torcidas e “amarradas”, podendo ficar necróticas. Folhas novas apresentam-se torcidas, com pregas e vincos, curtas, deformadas, enrugadas e ásperas. Ocorrem lesões translúcidas ou em forma de “sacos de água” entre as nervuras. As folhas tendem a ficarem quebradiças, podendo haver morte do meristema apical e, em estágio avançado da deficiência, da planta inteira. Já os sintomas de toxidez do elemento para a cultura se caracterizam pelo aparecimento de clorose nas pontas e margens das folhas novas, estendendo-se às mais velhas e cloróticas que logo se tornam necróticas (GASCHO; ANDERSON; BOWEN, 1993; GUPTA, 1993; ORLANDO FILHO et al., 2001).

Evans (1959), embora não tenha encontrado correlação entre a presença da doença e a deficiência de B, constatou uma similaridade muito grande entre o sintoma de deficiência deste elemento e aquele causado por *Fusarium moniliforme*, responsável pela doença conhecida como “Pokkah boeng”.

O B é um micronutriente extremamente importante para a cana-de-açúcar, principalmente quando relacionado ao acúmulo de sacarose. Segundo Siqueira (2014), o efeito promissor do B no acúmulo de sacarose, pode estar relacionado à sua função na formação da parede celular e na estrutura dos vasos condutores.

Como consequência do papel estrutural, além das funções exercidas no crescimento dos tecidos vegetais e a imobilidade do nutriente no floema de muitas espécies, o B tem que ser suprido continuamente durante toda a vida da planta, sendo que flutuações na disponibilidade do nutriente no solo podem causar efeitos adversos no crescimento e na produtividade das culturas (BROWN et al., 2002).

#### **4.7 Parâmetros morfológicos radiculares**

A disponibilidade dos nutrientes aos vegetais é influenciada por fatores de solo, que determinam o movimento até as raízes, e por atributos morfológicos e fisiológicos das plantas, que determinam a absorção. A morfologia do sistema radicular é determinada pelo comprimento, volume, superfície e diâmetro das raízes e dos pelos radiculares (SCHENK; BARBER, 1979). A eficiência de absorção dos nutrientes varia na

razão direta do comprimento e da espessura das raízes, tendo em vista que esses atributos influenciam na superfície de absorção (VILELA; ANGHINONI, 1984).

A morfologia radicular pode ser alterada em resposta às influências externas, para melhor adaptação ao meio de crescimento. O comprimento radicular pode apresentar diferenças varietais quanto à absorção de nutrientes (SACRAMENTO; ROSOLEM, 1997).

As diferenças de comportamento das plantas frente a falta ou excesso de nutrientes, sugerem um controle genético da nutrição. A aquisição de elementos minerais do ambiente está em função da morfologia radicular e da eficiência dos mecanismos de absorção (EPSTEIN; JEFFERIES, 1984; MARSCHNER, 1986; DUNCAN; BALIGAR, 1990).

Na literatura, evidências sugerem que o comprimento e a área superficial seriam as mais importantes características morfológicas radiculares para inferir sobre a eficiência de absorção de água e nutrientes (ZONTA et al., 2006; VILELA; ANGHINONI, 1984; BARBER, 1995). Os mesmos autores ressaltam que um sistema radicular com um maior comprimento indica uma maior capacidade das raízes na exploração do solo. E também, que a avaliação da área superficial radicular torna-se um parâmetro de interesse na absorção de nutrientes pouco móveis no solo, pois para estes elementos, a difusão constitui o principal mecanismo de movimento no solo e contato íon-raiz, sendo a absorção diretamente proporcional à área superficial das raízes.

Assim, conclui-se que as características morfológicas e fisiológicas do sistema radicular, além de fatores relacionados ao solo, afetam a absorção de nutrientes pelas raízes, podendo ser consideradas críticas, quando o acesso da raiz ao nutriente torna-se um fator limitante, evidenciando a importância de diferenças genéticas na morfologia do sistema radicular, visto que estas interferem diretamente na capacidade adaptativa das espécies, às variações na disponibilidade de nutrientes (ALVES et al., 2002)

#### **4.8 Relações do B com outros nutrientes**

O B é conhecido por ter influência favorável sobre a absorção de cátions especialmente Ca, retardando a absorção de ânions e ter um papel essencial no metabolismo de carboidratos e de nitrogênio (BATEY, 1971).

A resposta das culturas ao B não só varia entre espécies de plantas, tipo de solo e condições ambientais, mas também seu excesso / deficiência podem afetar a disponibilidade e a absorção de outros nutrientes de plantas (TARIQ; MOTT, 2007).

Existem evidências de que o B pode desempenhar um papel significativo no transporte de nutrientes através da membrana celular das plantas (TANADA, 1983). Pesquisas indicam que o suprimento adequado de B pode ter influência como um regulador ou inibidor no acúmulo e utilização de outros nutrientes de plantas (ALVAREZ-TINAUT et al., 1979). Além disso, em quantidades excessivas, o B pode interferir com os processos metabólicos, afetando a absorção de outros nutrientes pelas plantas (COREY; SCHULTE, 1973). Nesse sentido, Singh, Dahiya e Narwal (1990) relataram que o fornecimento de B teve um efeito antagônico sobre a absorção de K e Ca em plantas. Mas, em contraste, um efeito sinérgico sobre a absorção de P e Mg também foi relatado. Sugerindo assim, que a deficiência de B pode causar aumento ou redução das concentrações de nutrientes nos vegetais (CARPENA-ARTES; CARPENA-RUIZ, 1987).

Os resultados de algumas pesquisas indicam que os efeitos do B estão relacionados com os valores proporcionais equivalentes de cátions e ânions nas plantas, e que estes resultados têm relação com o tipo de íon ou com a valência dos íons (WALLACE; BEAR, 1949; VALMIS; ULRICH, 1971). Portanto, uma outra cadeia na investigação a respeito do B, é a utilização de relações proporcionais de nutrientes, por exemplo  $K+Ca/Mg$ ,  $Mg+Ca/K$ ,  $K/Ca$ ,  $K/Mg$ , entre outras, ao invés de valores simples de elementos individuais em análises de rendimento (SHEAR; CRANE; MAYERS, 1946; WALLACE; BEAR 1949; LEECE, 1978)

Pode-se concluir, a partir dos resultados destas pesquisas, que o B está envolvido em processos fisiológicos e bioquímicos no interior da célula da planta, alterando a concentração e a translocação de nutrientes. No entanto, há uma falta de concordância entre os pesquisadores no que diz respeito ao efeito específico do B sobre o comportamento de um dado elemento presente no substrato ou nas plantas.

## **5 MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1 Localização e características do ambiente experimental**

O trabalho foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal, localizado na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas - FCA, Campus de Botucatu/UNESP, localizada no município de Botucatu-SP, latitude 22° 51'S, longitude 48° 26'W Grw, e altitude de 740 m.

### **5.2 Delineamento experimental**

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com esquema fatorial composto por duas variedades (1- RB867515 e 2- RB92579) e duas concentrações de B na solução nutritiva (1- Deficiente: 4,5  $\mu\text{mol L}^{-1}$  e 2- Adequado: 45  $\mu\text{mol L}^{-1}$  de B), totalizando 4 tratamentos com 4 repetições. Perfazendo-se 16 unidades experimentais no total.

### **5.3 Caracterização das variedades de cana-de-açúcar**

A variedade RB867515 tem melhor desempenho em solos de textura leve e fertilidade média e sua produtividade agroindustrial é superior a outras importantes variedades. Apresenta hábito de crescimento ereto e despalha fácil. Tem apresentado boa capacidade de brotação mesmo em plantio tardio sob baixas temperaturas. O perfilhamento é

médio com colmos de diâmetro médio e alta uniformidade. Os colmos possuem entrenós cilíndricos, de cor verde-arroxeadado sob a palha, e roxo intenso quando expostos ao sol. Apresenta pouca rachadura. As folhas são de largura média, arqueadas, curvas e bordos com serrilhamento pouco agressivo. A bainha é de comprimento longo com quantidade de cera regular e pouco joçal, neste caso, caduco. O palmito é médio, de cor verde-arroxeadado e com pouca cerra. O teor de fibra é relativamente alto, em média 13%, e a maturação é média recomendada para colheita do meio para o final de safra. Pode ser uma ótima opção para corte em áreas de vinhaça com aplicação de maturadores (CATÁLOGO NACIONAL DE VARIEDADES “RB” DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2010).

A variedade RB92579 tem como principais características: excelente produtividade agrícola, ótimo perfilhamento, bom fechamento da entrelinha, ótima brotação das soqueiras, garantindo longevidade dos canaviais; porte semi-ereto, com ótima colheitabilidade; boa recuperação após períodos de seca; altamente responsiva à irrigação e muito eficiente no uso da água; alta eficiência no uso dos principais nutrientes; ótimo teor de sacarose, maturação média com PUI longo, recomendada para colheita do meio para o final de safra; florescimento baixo; tolerante em relação ao ataque da broca comum, resistente a ferrugem marrom e escaldadura das folhas e moderadamente resistente ao carvão (CATÁLOGO NACIONAL DE VARIEDADES “RB” DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2010).

A escolha das variedades levou em consideração os relatos de produtores e consultores com experiência em cana-de-açúcar (informação verbal)<sup>1</sup>. Segundo os mesmos, através de observações e avaliações de campo (dados não publicados na literatura), a variedade RB867515 tem se mostrado bastante suscetível a deficiência de B no solo, inclusive com aparecimento de sintomas visuais de deficiência e redução na produtividade, além de maior ocorrência de doenças como estria vermelha (*Bactéria - Acidovorax avenae*). Já a variedade RB92579, tem se mostrado mais tolerante pois, nas mesmas épocas e locais, não tem apresentado sintomas visíveis de deficiência do micronutriente e nem redução de produtividade.

---

<sup>1</sup> Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndorfer, Universidade Federal de Uberlândia – MG, contato realizado por e-mail (ghk@uber.com.br), em 14 de maio de 2014.

## 5.4 Instalação e condução do experimento.

### 5.4.1 Solução nutritiva

Para o crescimento e desenvolvimento das plantas sob diferentes concentrações de B, foi utilizada a solução nutritiva proposta por Furlani e Furlani (1988), modificada. As concentrações dos nutrientes expressas em  $\text{mg L}^{-1}$  foram:  $\text{N-NO}_3^- = 138$ ;  $\text{N-NH}_4^+ = 20$ ;  $\text{P} = 16$ ;  $\text{K} = 141$ ;  $\text{Ca} = 151$ ;  $\text{Mg} = 17$ ;  $\text{S} = 56$ ;  $\text{Cu} = 0,04$ ;  $\text{Fe} = 3,6$ ;  $\text{Mn} = 0,5$ ;  $\text{Mo} = 0,08$ ;  $\text{Zn} = 0,15$ ;  $\text{Cl} = 33$  e  $\text{B} = 0,05$  e  $0,5$  (deficiente e adequado, respectivamente); preparada com as seguintes fontes:  $\text{Ca(NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ;  $\text{KCl}$ ;  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ;  $\text{KNO}_3$ ;  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; Rexolim M48 (6,5 % de Fe quelatizado com EDDHMA);  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ;  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ ;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ;  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (Tabela 1).

**Tabela 1.** Composição da solução nutritiva de Furlani e Furlani (1988), modificada.

Solução Estoque		Relação estoque / solução	Solução Nutritiva	
Componentes	Concentração		Concentração	
Nº	$\text{g L}^{-1}$	$\text{ml L}^{-1}$	Nutriente	$\text{mg L}^{-1}$
1	$\text{Ca(NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	3	$\text{N-NO}_3^-$	157
	$\text{NH}_4\text{NO}_3$		$\text{N-NH}_4^+$	23
2	$\text{KCl}$	3	Ca	178
	$\text{K}_2\text{SO}_4$		K	207
	$\text{KNO}_3$		Mg	19
3	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1	S	64
4	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	1	P	16
5	Rexolim <sup>®</sup> M48 (6,5% Fe)	1	Fe	3,6
6	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1	Mn	0,5
	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$		Zn	0,15
	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$		Cu	0,05
	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$		Mo	0,09
			Cl	43
	$\text{H}_3\text{BO}_3$		Boro	$\mu\text{mol L}^{-1}$
7	Adequado	1	Adequado	45
8	Deficiente	1	Deficiente	4,5

Considerou-se as concentração de B de  $4,5 \mu\text{mol L}^{-1}$  e  $45 \mu\text{mol L}^{-1}$  como deficiente e adequado, respectivamente para o desenvolvimento das plantas, com base em experimentos prévios e na literatura (HOAGLAND; ARNON, 1950; FURLANI;

FURLANI 1988; ORLANDO FILHO, 1993; ESPIRONELLO et al., 1996; MALAVOLTA et al., 1997; ORLANDO FILHO et al., 2001). A fonte de B utilizada foi o ácido bórico  $H_3BO_3$  (nome comercial Boric Acid *Sigma-Aldrich*<sup>®</sup>), previamente pesado e posteriormente diluído em água deionizada.

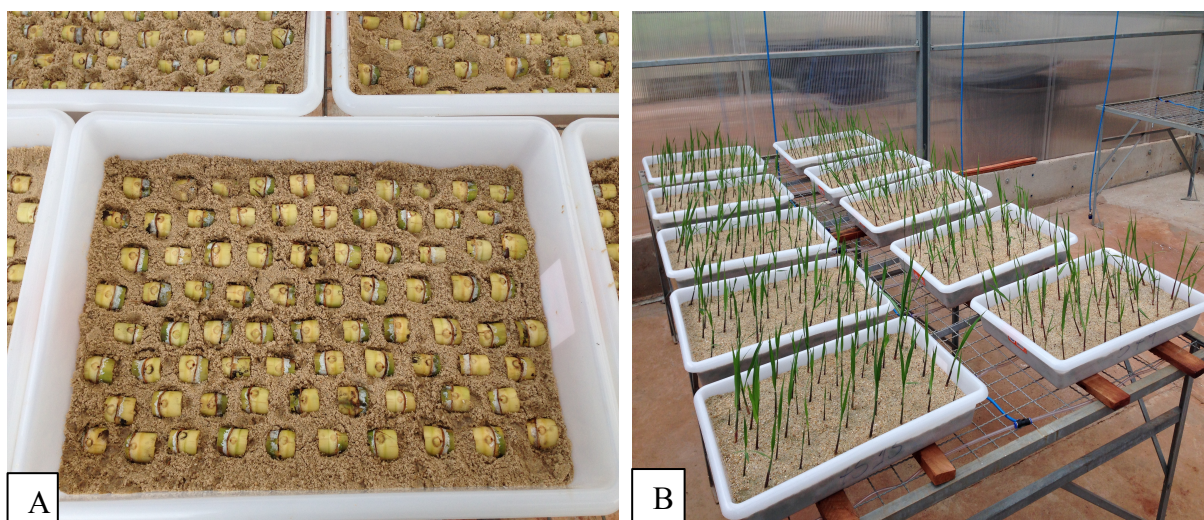
Inicialmente, a solução nutritiva foi diluída a um décimo da força iônica durante a primeira semana e a metade da força iônica na segunda semana. Sendo substituída pela solução nutritiva completa, com força iônica total, a partir da terceira semana após a transferência das plântulas.

#### 5.4.2 Obtenção das plântulas

Os colmos de cana-de-açúcar para confecção das mudas foram colhidos na Usina da Barra pertencente ao Grupo Raízen na cidade de Igarapu do Tietê – SP.

Para a obtenção das mudas, destacou-se do colmo as gemas vegetativas com auxílio de equipamento apropriado, juntamente com uma camada de tecido de reserva (denominadas mudas do tipo “*chip*” dentro do setor canavieiro, por serem pequenas e possuírem aspecto de um *chip* eletrônico). As gemas selecionadas, foram extraídas do terço superior do colmo para que houvesse maior uniformidade de brotação.

Posteriormente foram colocadas para germinar em bandejas de plástico, contendo areia grossa como substrato, sendo irrigadas diariamente com água deionizada. As bandejas foram alocadas em bancadas dentro da casa de vegetação (Figura 1), com temperatura ambiente entre 25 °C / 31 °C e umidade controlada. Decorridos 30 dias da emergência, as plântulas foram selecionadas para serem transferidas para a solução nutritiva.



**Figura 1.** Mudas “chip” (A) e plântulas de cana-de-açúcar (B) em bandejas com areia grossa, em casa de vegetação.

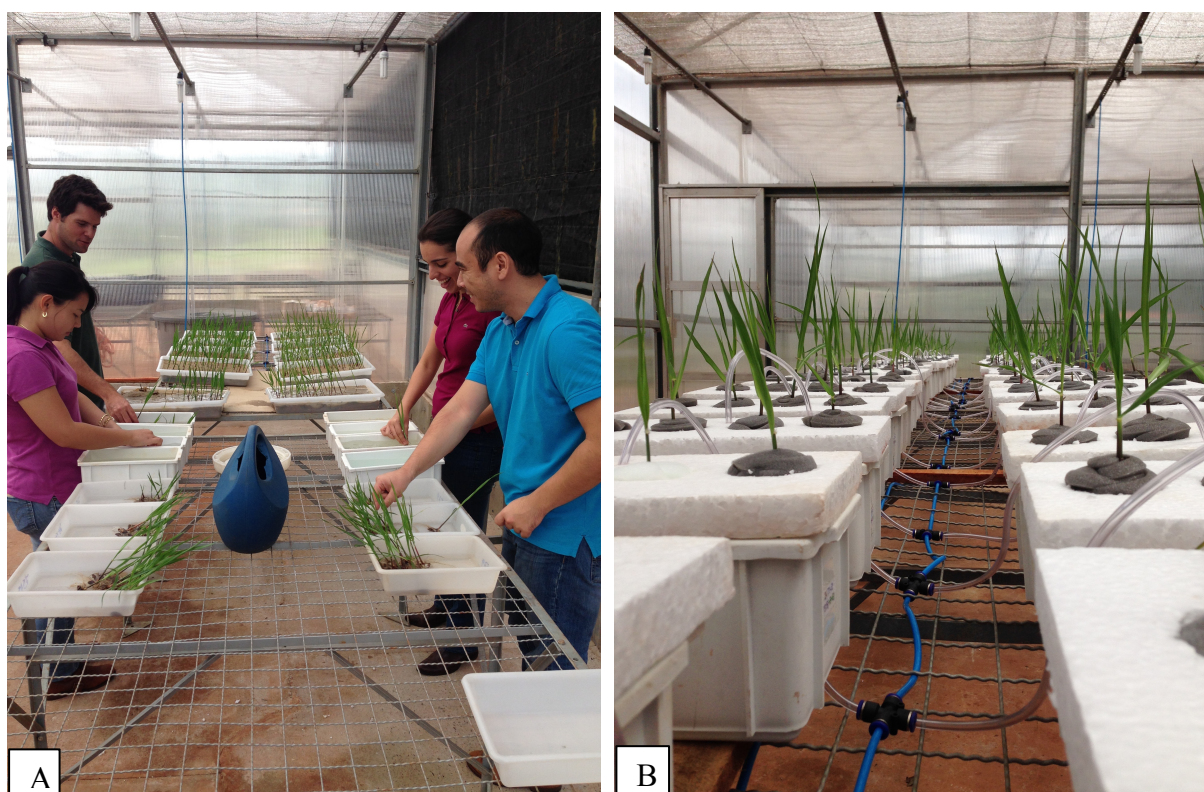


### 5.4.3 Transferência das plântulas

As plântulas foram previamente selecionadas quanto a sanidade e uniformidade e transferidas para vasos plásticos onde foram fixadas com espuma em placas de isopor, para que apenas o sistema radicular ficasse em contato com a solução nutritiva (Figura 2).

Cada vaso recebeu três plântulas de cana-de-açúcar e foram devidamente equipados para que os 14 litros de solução nutritiva fossem aerados constantemente.

O volume da solução foi mantido com variação máxima de 5% e o volume de água evapotranspirado foi completado com água deionizada. Foram monitorados diariamente os valores de pH da solução nutritiva de cada vaso, os quais ficaram mantidos em  $5,5 \pm 0,5$ , e quando necessário utilizou-se HCl ou NaOH 0,1 N para correção. A solução nutritiva foi renovada semanalmente.



**Figura 2.** Seleção das plantas quanto a sanidade e uniformidade (A) e transferência das plântulas de cana-de-açúcar para vasos devidamente equipados contendo solução nutritiva (B).

## 5.5 Obtenção dos dados

### 5.5.1 Parâmetros biométricos

Aos 100 dias após a transferência das plantas para solução nutritiva, procederam-se as análises biométricas não destrutivas de: altura de plantas (AP); diâmetro de colmos (DC); comprimento médio de entrenó (CE); número de folhas (NF) e número de perfilhos (NP).

Para a medição da altura de plantas foi utilizado uma régua graduada em centímetros, a medição foi feita a partir da inserção das raízes no colo da planta até a região auricular da folha +1 ou TVD (*Top Visible Dewlap leaf*), de acordo com a numeração sugerida por Kuijper (DILLEWIJN, 1952). A determinação do diâmetro de colmo foi feita com auxílio de paquímetro digital e realizada no terço médio do colmo (Figura 3). O comprimento médio de entrenó foi calculado dividindo-se os valores de altura de planta pelo número de folhas (MACHADO et al., 2009)



**Figura 3.** Determinação do diâmetro de colmo com auxílio de paquímetro digital.

### 5.5.2 Parâmetros morfológicos radiculares

Após as análises biométricas, as plantas foram divididas em colmos, folhas e raízes. Foram coletadas três sub-amostras das raízes de cada unidade experimental, extraídas no sentido do comprimento, ou seja, do ponto de surgimento das raízes adventícias no colo da planta, até a extremidade do sistema radicular, contendo os diferentes tipos de raiz.

Em seguida, as amostras foram armazenadas em coletor universal com capacidade de 100 ml, contendo solução alcoólica 70%, e acondicionadas em ambiente refrigerado, para posterior análise.

As variáveis comprimento, superfície e diâmetro médio das raízes foram determinadas em Scanner desenvolvido para esse fim, acoplado a um computador contendo o Software WinRhizo, que utiliza como princípio o método proposto por Tennant (1975).

### **5.5.3 Produção de matéria seca**

A parte aérea (colmos + folhas) e também as raízes das plantas, de cada unidade experimental, foram submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar, a 65 °C, até atingirem peso constante e em seguida pesadas para a determinação da matéria seca da raiz (MSRA), matéria seca do colmo (MSC) e matéria seca de folhas (MSF).

As amostras do sistema radicular das plantas utilizadas nas determinações morfológicas, também foram secas em estufa a 65 °C, para determinação da matéria seca e posteriormente foram somadas a MSRA.

A matéria seca da parte aérea (MSPA), foi determinada por meio do somatório da matéria seca de colmos e de folhas. A matéria seca total (MSTotal) foi determinada por meio do somatório da matéria seca da parte aérea e do sistema radicular. A relação raiz/parte aérea (RA/PA) das plantas foi determinada através da divisão da massa de matéria seca da raiz pela massa de matéria seca da parte aérea

### **5.5.4 Concentração de N, P, K, Ca e B**

Determinado a matéria seca da parte aérea, o material foi moído em moinho tipo Willey, e a concentração dos nutrientes que tem relação com o B, notadamente, além do B, N, P, K e Ca nos tecidos vegetais, determinados conforme metodologia proposta por Malavolta et al. (1997).

Anteriormente a implantação do experimento também foi determinado a concentração de B nos *chips* das variedades utilizadas.

### **5.5.5 Quantidade acumulada de N, P, K, Ca e B**

Através dos dados de produção de matéria seca e da concentração de N, P, K, Ca e B nas diferentes partes da planta, foi determinada a quantidade acumulada dos respectivos nutrientes pela multiplicação dos valores de concentração pelos valores de matéria seca.

A partir dos dados de acúmulo de N, P, K, Ca e B no colmo e na folha, foi possível determinar a concentração média dos respectivos nutrientes na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar mediante a razão: nutrientes acumulados (colmo + folha) / matéria seca total da parte aérea (colmo + folha).

### **5.5.6. Absorção de nutrientes por unidade de comprimento de raiz**

De posse dos resultados de acúmulo de N, P, K, Ca e B na parte aérea das plantas, foi realizada a determinação da quantidade de nutrientes absorvidos por metro de raiz através da razão: quantidade total do respectivo nutriente acumulado na parte aérea expressa em mg ou  $\mu\text{g planta}^{-1}$  / comprimento radicular em metros  $\text{planta}^{-1}$  (ROSOLEM; GIOMMO; LAURENTI, 2000).

## **5.6 Análises estatísticas**

Os dados foram submetidos à análise de variância e ao teste LSD a 5% de significância para comparação das médias. Os resultados da análise estatística foram obtidos por meio do programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2008).

## 6 RESULTADOS

O fator variedade influenciou a superfície, o diâmetro e MSRA. O fator boro influenciou o comprimento, a superfície e o diâmetro de raiz. Houve efeito da interação dos fatores para diâmetro e MSRA (Tabela 2).

Assim, constatou-se maior área superficial e diâmetro de raiz na variedade RB867515 e o contrário para MSRA, ou seja, para esta variável a RB92579 foi superior a RB867515 (Tabela 2).

A deficiência de B acarretou em menor comprimento e superfície radicular (Tabela 2).

**Tabela 2.** Comprimento, superfície, diâmetro e matéria seca de raiz (MSRA) de variedades de cana-de-açúcar submetidas a concentrações de boro na solução nutritiva por 100 dias. Botucatu-SP, 2015.

Fatores	Comprimento m planta <sup>-1</sup>	Superfície m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup>	Diâmetro mm	MSRA g planta <sup>-1</sup>
<u>Variedade</u>				
RB867515	610 a <sup>†</sup>	0,60 a	0,3341 a	6,9 b
RB92579	584 a	0,50 b	0,2820 b	7,4 a
<u>Boro<sup>‡</sup></u>				
Deficiente	534 b	0,50 b	0,3360 a	7,2 a
Adequado	660 a	0,60 a	0,2900 b	7,1 a
<u>ANOVA (Probabilidade de F)</u>				
Variedade (V)	0,0859	0,0001	<0,0001	0,0151
Boro (B)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,2989
V × B	0,9647	0,7355	0,0155	<0,0001

<sup>†</sup>Médias seguidas de letras distintas na coluna dentro de cada fator, diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

<sup>‡</sup>Concentração de boro na solução nutritiva: deficiente = 4,5 µmol L<sup>-1</sup> e adequado = 45 µmol L<sup>-1</sup>.

Desdobrando a interação dos fatores, constatou-se que sob deficiência de B a variedade RB92579 teve maior produção de MSRA do que a variedade RB867515. Sob concentração de B adequado na solução nutritiva, aconteceu o contrário, ou seja a variedade RB867515 teve maior produção de MSRA. A variedade RB867515 produziu maior quantidade de MSRA em concentração de B adequado na solução nutritiva, enquanto a variedade RB92579 produziu menor quantidade de MSRA em concentração de B adequado (Tabela 3).

Quanto ao diâmetro de raiz, constatou-se que a variedade RB867515 teve maior diâmetro radicular do que a variedade RB92579, tanto em concentração de B deficiente, quanto adequado. Porém, constatou-se para ambas variedades, que o diâmetro de raiz foi maior em plantas cultivadas sob deficiência de B do que em concentração de B adequado na solução (Tabela 3).

**Tabela 3.** Desdobramento da interação dos fatores para matéria seca (MSRA) e diâmetro de raiz de variedades de cana-de-açúcar submetidas a concentrações de boro na solução nutritiva por 100 dias. Botucatu-SP, 2015.

Variedade	Concentração de Boro ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	
	Deficiente (4,5)	Adequado (45)
	<u>MSRA (g planta<sup>-1</sup>)</u>	
RB867515	6,35 bB <sup>†</sup>	7,55 aA
RB92579	8,17 aA	6,62 bB
	<u>Diâmetro (mm)</u>	
RB867515	0,36 aA	0,31 aB
RB92579	0,29 bA	0,27 bB

<sup>†</sup>Médias seguidas de letras distintas minúscula na coluna e maiúscula na linha, diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

O fator variedade influenciou AP, CE, NP, NF, MSC, MSPA, MS Total e RA/PA. O fator boro influenciou AP, CE, MSC, MSPA, MS Total e RA/PA. Houve efeito da interação dos fatores para AP, MSC, MSF e RA/PA (Tabela 4).

Assim, constatou-se maior AP, CE, NP, NF, MSPA e MS total na variedade RB92579. As variáveis DC e MSF não foram influenciadas pelo fator variedade (Tabela 4).

A deficiência de B acarretou em menor AP, CE e RA/PA e o contrário foi observado para MSC, MSPA e MS Total, ou seja, essas variáveis foram maiores em plantas cultivadas sob deficiência de B na solução nutritiva. Não houve influência do fator boro para DC, NP, NF e MSF (Tabela 4).

**Tabela 4.** Altura de planta (AP), comprimento de entrenó (CE), diâmetro de colmo (DC), número de perfilhos (NP), número de folhas (NF), matéria seca de colmos (MSC), de folhas (MSF), da parte aérea (MSPA) e total (MS Total) e relação raiz/parte aérea (RA/PA) de variedades de cana-de-açúcar submetidas a concentrações de boro na solução nutritiva por 100 dias. Botucatu-SP, 2015.

Fatores	AP	CE	DC	NP	NF
	----- cm -----			---- n° planta <sup>-1</sup> ----	
<u>Variedade</u>					
RB867515	57 b <sup>†</sup>	5,8 b	1,9 a	0,125 b	9,8 b
RB92579	81 a	7,7 a	2,0 a	1,583 a	10,5 a
<u>Boro<sup>‡</sup></u>					
Deficiente	67 b	6,5 b	1,9 a	0,958 a	10,2 a
Adequado	71 a	7,0 a	1,9 a	0,750 a	10,2 a
<u>ANOVA (Probabilidade de F)</u>					
Variedade (V)	<0,0001	<0,0001	0,2011	<0,0001	0,0397
Boro (B)	<0,0001	0,0253	0,8712	0,2948	0,8943
V × B	0,0012	0,6722	0,3273	0,9975	0,2455
	MSC	MSF	MSPA	MS Total	RA/PA
	----- g planta <sup>-1</sup> -----				
<u>Variedade</u>					
RB867515	19 b	16 a	36 b	43 b	0,19 a
RB92579	24 a	16 a	41 a	48 a	0,18 b
<u>Boro</u>					
Deficiente	24 a	16 a	40 a	48 a	0,18 b
Adequado	20 b	16 a	36 b	43 b	0,20 a
<u>ANOVA (Probabilidade de F)</u>					
Variedade (V)	<0,0001	0,3155	<0,0001	<0,0001	0,0141
Boro (B)	0,0001	0,3155	0,0001	0,0001	0,0034
V × B	0,0176	<0,0001	0,8424	0,1610	<0,0001

<sup>†</sup>Médias seguidas de letras distintas na coluna dentro de cada fator, diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

<sup>‡</sup>Concentração de boro na solução nutritiva: deficiente = 4,5 µmol L<sup>-1</sup> e adequado = 45 µmol L<sup>-1</sup>.

Desdobrando a interação dos fatores, constatou-se que a variedade RB92579 teve maior AP do que a variedade RB867515, tanto em concentração de B deficiente quanto adequado na solução nutritiva. Porém, as duas variedades tiveram maior AP em concentração de B adequado na solução nutritiva quando comparado as plantas cultivadas sob concentração de B deficiente na solução (Tabela 5).

Quanto a MSC, constatou-se que a variedade RB92579 teve maior produção de MSC do que a variedade RB867515, tanto em concentração de B deficiente

quanto adequado na solução nutritiva. Porém, ambas variedades tiveram maior produção de MSC em concentração de B deficiente na solução nutritiva (Tabela 5).

Em relação a MSF, constatou-se que sob deficiência de B a variedade RB92579 teve maior produção de MSF do que a variedade RB867515. Sob concentração de B adequado na solução nutritiva, aconteceu o contrário, ou seja, a variedade RB867515 teve maior produção de MSF. A variedade RB867515 produziu maior quantidade de MSF em concentração de B adequado na solução nutritiva, enquanto a variedade RB92579 teve menor produção de MSF em concentração de B adequado (Tabela 5).

O mesmo comportamento foi observado para relação RA/PA, ou seja, sob deficiência de B a variedade RB92579 apresentou maior relação RA/PA do que a variedade RB867515. Sob concentração de B adequado na solução nutritiva, aconteceu o contrário, ou seja a variedade RB867515 teve relação RA/PA maior. A variedade RB867515 teve maior relação RA/PA em concentração de B adequado na solução nutritiva, enquanto a variedade RB92579 teve menor relação RA/PA em concentração de B adequado na solução (Tabela 5).

**Tabela 5.** Desdobramento da interação dos fatores para matéria seca de colmo (MSC) e de folhas (MSF) e relação raiz/parte aérea (RA/PA) de variedades de cana-de-açúcar submetidas a concentrações de boro na solução nutritiva por 100 dias. Botucatu-SP, 2015.

Variedade	Concentração de Boro ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	
	Deficiente (4,5)	Adequado (45)
	<u>AP (cm)</u>	
RB867515	54 bB <sup>†</sup>	60 bA
RB92579	79 aB	83 aA
	<u>MSC (g planta<sup>-1</sup>)</u>	
RB867515	23 bA	16 bB
RB92579	25 aA	23 aB
	<u>MSF (g planta<sup>-1</sup>)</u>	
RB867515	15 bB	17 aA
RB92579	17 aA	16 bB
	<u>RA/PA</u>	
RB867515	0,17 bB	0,23 aA
RB92579	0,19 aA	0,17 bB

<sup>†</sup>Médias seguidas de letras distintas, minúscula na coluna e maiúscula na linha, diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

O fator variedade influenciou as concentrações dos nutrientes P, K, Ca e B na folha, N, P, K, Ca e B no colmo e na parte aérea. O fator boro influenciou as concentrações dos nutrientes P e B na folha, N, P e K no colmo e N, P, K e B na parte aérea.



Houve efeito da interação dos fatores para as concentrações de P, K, Ca e B na folha, N, P e B no colmo e P e K na parte aérea (Tabela 6).

**Tabela 6.** Concentração de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e boro nas folhas, no colmo e na parte aérea de variedades de cana-de-açúcar submetidas a concentrações de boro na solução nutritiva por 100 dias. Botucatu-SP, 2015.

Fatores	N	P	K	Ca	B
	g kg <sup>-1</sup>				mg kg <sup>-1</sup>
<u>Variedade</u>	<u>Folha</u>				
RB867515	22 a <sup>†</sup>	3,8 a	16 a	6,8 a	12 b
RB92579	23 a	3,1 b	14 b	4,9 b	15 a
<u>Boro<sup>‡</sup></u>					
Deficiente	22 a	3,2 b	15 a	5,9 a	11 b
Adequado	23 a	3,7 a	15 a	5,9 a	16 a
<u>ANOVA (Probabilidade de F)</u>					
Variedade (V)	0,0741	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Boro (B)	0,4361	0,0003	0,4131	0,9975	<0,0001
V × B	0,1604	0,0003	0,0004	0,0001	<0,0001
<u>Variedade</u>	<u>Colmo</u>				
RB867515	21 a	4,8 a	38 a	4,6 a	11 b
RB92579	19 b	3,4 b	32 b	3,8 b	12 a
<u>Boro</u>					
Deficiente	19 b	3,4 b	33 b	4,2 a	11 a
Adequado	21 a	4,9 a	37 a	4,3 a	12 a
<u>ANOVA (Probabilidade de F)</u>					
Variedade (V)	0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Boro (B)	0,0021	0,0055	<0,0001	0,4466	0,1488
V × B	0,0384	0,0055	0,2359	0,4466	<0,0001
<u>Variedade</u>	<u>Parte Aérea</u>				
RB867515	22 a	4,4 a	28 a	5,6 a	12 b
RB92579	20 b	3,3 b	25 b	4,3 b	13 a
<u>Boro</u>					
Deficiente	20 b	3,6 b	26 b	4,9 a	11 b
Adequado	22 a	4,0 a	27 a	5,0 a	13 a
<u>ANOVA (Probabilidade de F)</u>					
Variedade (V)	0,0197	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Boro (B)	0,0179	0,0014	0,0017	0,1086	<0,0001
V × B	0,0540	0,0014	0,0015	0,0724	0,1793

<sup>†</sup>Médias seguidas de letras distintas na coluna dentro de cada fator, diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

<sup>‡</sup>Concentração de boro na solução nutritiva: deficiente = 4,5 µmol L<sup>-1</sup> e adequado = 45 µmol L<sup>-1</sup>.

Assim, constatou-se maior concentração dos nutrientes P, K e Ca na folha, N, P, K e Ca no colmo e na parte aérea da variedade RB867515. Porém para o B constatou-se o contrário, ou seja, a variedade RB92579 teve maior concentração de B na folha, no colmo e na parte aérea. A concentração de N na folha não foi influenciada pelo fator variedade (Tabela 6).

A deficiência de B acarretou em menores concentrações de P e B na folha, N, P e K no colmo e N, P, K e B na parte aérea. O fator boro não influenciou as concentrações dos nutrientes N, K e Ca na folha, Ca e B no colmo e Ca na parte aérea (Tabela 6).

Desdobrando a interação dos fatores, constatou-se que sob deficiência de B, ambas variedades apresentaram concentrações foliares semelhantes dos nutrientes P, K e B. Porém, as concentrações de Ca na folha, N e P no colmo e P e K na parte aérea foram maiores na variedade RB867515 do que na variedade RB92579. O contrário aconteceu com a concentração de B no colmo, ou seja, sob deficiência de B, a variedade RB92579 teve maior concentração de B no colmo do que a variedade RB867515 (Tabela 7).

Sob concentração de B adequado na solução nutritiva, a variedade RB867515 teve maior concentração de P, K e Ca na folha, N, P e B no colmo e P e K na parte aérea do que a variedade RB92579. O contrário aconteceu com a concentração foliar de B, ou seja, sob concentração de B adequado na solução nutritiva, a variedade RB92579 apresentou maior concentração foliar de B do que a variedade RB867515 (Tabela 7).

A variedade RB867515 teve maior concentração de P, K e B na folha; N, P e B no colmo e P na parte aérea sob concentração de B adequado na solução nutritiva do que sob concentração de B deficiente. O contrário aconteceu com a concentração foliar de Ca, ou seja, sob concentração de B deficiente na solução, a variedade RB867515 teve maior concentração de Ca na folha do que sob concentração de B adequado. A concentração de K na parte aérea não foi influenciada pela concentração de B na solução nutritiva (Tabela 7).

A variedade RB92579 teve maior concentração de Ca e B na folha e K na parte aérea sob concentração de B adequado na solução nutritiva do que sob concentração de B deficiente. O contrário aconteceu com a concentração de K na folha e de B no colmo, ou seja, sob concentração de B deficiente na solução, a variedade RB92579 teve maior concentração de K na folha e de B no colmo do que sob concentração de B adequado na solução nutritiva. As concentrações de P na folha, N e P no colmo e P na parte aérea não foram influenciadas pela concentração de B na solução nutritiva (Tabela 7).

**Tabela 7.** Desdobramento da interação dos fatores para concentração de fósforo, potássio, cálcio e boro nas folhas, nitrogênio, fósforo e boro no colmo e fósforo e potássio na parte aérea de variedades de cana-de-açúcar submetidas a concentrações de boro na solução nutritiva por 100 dias. Botucatu-SP, 2015.

Variedade	Concentração de Boro ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	
	Deficiente (4,5)	Adequado (45)
		<u>P Folha (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</u>
RB867515	3,3 aB <sup>†</sup>	4,3 aA
RB92579	3,1 aA	3,1 bA
		<u>K Folha (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</u>
RB867515	15 aB	16 aA
RB92579	15 aA	14 bB
		<u>Ca Folha (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</u>
RB867515	7,2 aA	6,4 aB
RB92579	4,5 bB	5,3 bA
		<u>B Folha (<math>\text{mg kg}^{-1}</math>)</u>
RB867515	11 aB	13 bA
RB92579	11 aB	18 aA
		<u>N Colmo (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</u>
RB867515	20 aB	22 aA
RB92579	18 bA	19 bA
		<u>P Colmo (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</u>
RB867515	4,3 aB	5,3 aA
RB92579	3,4 bA	3,4 bA
		<u>B Colmo (<math>\text{mg kg}^{-1}</math>)</u>
RB867515	9,8 bB	12 aA
RB92579	13 aA	11 bB
		<u>P Parte Aérea (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</u>
RB867515	3,9 aB	4,8 aA
RB92579	3,3 bA	3,3 bA
		<u>K Parte aérea (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</u>
RB867515	28 aA	28 aA
RB92579	24 bB	25 bA

<sup>†</sup>Médias seguidas de letras distintas, minúscula na coluna e maiúscula na linha, diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

Assim, constatou-se maior acúmulo dos nutrientes P, K e Ca na folha; P no colmo e P e K na parte aérea, na variedade RB867515. Porém, para o acúmulo de N e B na folha, no colmo e na parte aérea constatou-se o contrário, ou seja, a variedade RB92579 acumulou maiores quantidades de N e B na folha, no colmo e na parte aérea. O acúmulo de K e Ca no colmo e K na parte aérea não foi influenciado pelo fator variedade (Tabela 8).

A concentração de B deficiente na solução acarretou em menores quantidades acumuladas de P e B na folha e B na parte aérea. O contrário foi observado para as quantidades acumuladas de N, P, K, Ca e B no colmo e N, K e Ca na parte aérea, ou seja, a deficiência de B acarretou em maior acúmulo de N, P, K, Ca e B no colmo e N, K e Ca na parte aérea. O fator boro não influenciou as quantidades acumuladas de N, K e Ca na folha e P na parte aérea (Tabela 8).

Desdobrando a interação dos fatores, constatou-se que sob deficiência de B ambas variedades apresentaram quantidades acumuladas semelhantes dos nutrientes P na folha, K no colmo e P na parte aérea. Porém, o acúmulo de N, K e B na folha foi maior na variedade RB92579 do que na variedade RB867515 (Tabela 9).

Sob concentração de B adequado na solução nutritiva, a variedade RB867515 acumulou maior quantidade de N, P e K na folha e P na parte aérea do que a variedade RB92579. O contrário aconteceu com o acúmulo de B na folha e K no colmo, ou seja, sob concentração de B adequado na solução nutritiva, a variedade RB92579 teve maior acúmulo de B na folha e K no colmo do que a variedade RB867515 (Tabela 9).

**Tabela 8.** Quantidade acumulada de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e boro nas folhas, no colmo e na parte aérea de variedades de cana-de-açúcar submetidas a concentrações de boro na solução nutritiva por 100 dias. Botucatu-SP, 2015.

Fatores	mg planta <sup>-1</sup>				B µg planta <sup>-1</sup>
	N	P	K	Ca	
<u>Variedade</u>	<u>Folha</u>				
RB867515	364 b <sup>†</sup>	63 a	255 a	111 a	203 b
RB92579	381 a	50 b	234 b	81 b	237 a
<u>Boro</u> <sup>‡</sup>					
Deficiente	369 a	52 b	244 a	95 a	182 b
Adequado	377 a	61 a	245 a	97 a	259 a
<u>ANOVA (Probabilidade de F)</u>					
Variedade (V)	0,0314	<0,0001	0,0001	<0,0001	<0,0001
Boro (B)	0,2652	0,0003	0,8594	0,3633	<0,0001
V × B	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,2871	<0,0001
<u>Variedade</u>	<u>Colmo</u>				
RB867515	400 b	92 a	732 a	90 a	206 b
RB92579	446 a	82 b	762 a	92 a	295 a
<u>Boro</u>					
Deficiente	451 a	92 a	788 a	100 a	275 a
Adequado	395 b	82 b	706 b	82 b	226 b
<u>ANOVA (Probabilidade de F)</u>					
Variedade (V)	0,0197	0,0040	0,2105	0,5723	<0,0001
Boro (B)	0,0058	0,0036	0,0030	0,0020	0,0002
V × B	0,1370	0,4564	0,0022	0,0981	0,0695
<u>Variedade</u>	<u>Parte Aérea</u>				
RB867515	765 b	154 a	987 a	201 a	409 b
RB92579	827 a	132 b	996 a	173 b	533 a
<u>Boro</u>					
Deficiente	820 a	144 a	1032 a	194 a	457 b
Adequado	771 b	143 a	951 b	179 b	485 a
<u>ANOVA (Probabilidade de F)</u>					
Variedade (V)	0,0149	<0,0001	0,7046	0,0008	<0,0001
Boro (B)	0,0462	0,7179	0,0047	0,0316	0,0228
V × B	0,2570	0,0059	0,0905	0,1055	0,8731

<sup>†</sup>Médias seguidas de letras distintas na coluna dentro de cada fator, diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

<sup>‡</sup>Concentração de boro na solução nutritiva: deficiente = 4,5 µmol L<sup>-1</sup> e adequado = 45 µmol L<sup>-1</sup>.

**Tabela 9.** Desdobramento da interação dos fatores para acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio na folha, acúmulo de potássio no colmo e acúmulo de fósforo na parte aérea de variedades de cana-de-açúcar submetidas a concentrações de boro na solução nutritiva por 100 dias. Botucatu-SP, 2015.

Variedade	Concentração de Boro ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	
	Deficiente (4,5)	Adequado (45)
	<u>N Folha (<math>\text{mg planta}^{-1}</math>)</u>	
RB867515	334 bB <sup>†</sup>	395 aA
RB92579	403 aA	359 bB
	<u>P Folha (<math>\text{mg planta}^{-1}</math>)</u>	
RB867515	51 aB	74 aA
RB92579	53 aA	48 bB
	<u>K Folha (<math>\text{mg planta}^{-1}</math>)</u>	
RB867515	233 bB	276 aA
RB92579	255 aA	214 bB
	<u>B Folha (<math>\mu\text{g planta}^{-1}</math>)</u>	
RB867515	173 bB	233 bA
RB92579	190 aB	285 aA
	<u>K Colmo (<math>\text{mg planta}^{-1}</math>)</u>	
RB867515	816 aA	648 bB
RB92579	760 aA	763 aA
	<u>P Parte Aérea (<math>\text{mg planta}^{-1}</math>)</u>	
RB867515	149 aA	160 aA
RB92579	139 aA	126 bB

<sup>†</sup>Médias seguidas de letras distintas, minúscula na coluna e maiúscula na linha, diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

A variedade RB867515 apresentou maiores quantidades acumuladas de N, P, K e B na folha sob concentração de B adequado na solução nutritiva do que sob concentração de B deficiente. O contrário aconteceu com o acúmulo de K no colmo, ou seja, sob concentração de B deficiente na solução, a variedade RB867515 teve maior acúmulo de K no colmo do que sob concentração de B adequado. O acúmulo de P na parte aérea não foi influenciado pela concentração de B na solução nutritiva (Tabela 9).

A variedade RB92579 apresentou maiores quantidades acumuladas de N, P e K na folha e P na parte aérea sob concentração de B deficiente na solução nutritiva do que sob concentração de B adequado. O contrário aconteceu com o acúmulo de B na folha, ou seja, sob concentração de B adequado na solução, a variedade RB92579 teve maior acúmulo de B na folha do que sob concentração de B deficiente na solução nutritiva. O acúmulo de K no colmo não foi influenciado pela concentração de B na solução nutritiva (Tabela 9).

O fator variedade influenciou a eficiência de absorção dos nutrientes N, P, Ca e B. O fator boro influenciou a eficiência de absorção dos nutrientes N, P, K, Ca e B.

Não houve efeito da interação dos fatores para a eficiência de absorção dos nutrientes (Tabela 10).

Assim, constatou-se maior eficiência de absorção dos nutrientes P, K e Ca da variedade RB867515 e o contrário para N e B, ou seja, a variedade RB92579 foi mais eficiente na absorção de N e B (Tabela 10).

A deficiência de B acarretou em maior eficiência de absorção dos nutrientes N, P, K, Ca e B (Tabela 10).

**Tabela 10.** Quantidade de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e boro absorvidos por metro de raiz de variedades de cana-de-açúcar submetidas a concentrações de boro na solução nutritiva por 100 dias. Botucatu-SP, 2015

Fatores	Quantidade de Nutriente Absorvido por Metro de Raiz				
	N	P	K	Ca	B
	mg m <sup>-1</sup>				µg m <sup>-1</sup>
<u>Variedade</u>					
RB867515	1,27 b <sup>†</sup>	0,25 a	1,65 a	0,33 a	0,68 b
RB92579	1,44 a	0,23 b	1,73 a	0,29 b	0,92 a
<u>Boro<sup>‡</sup></u>					
Deficiente	1,54 a	0,27 a	1,94 a	0,36 a	0,86 a
Adequado	1,17 b	0,22 b	1,44 b	0,27 b	0,73 b
<u>ANOVA (Probabilidade de F)</u>					
Variedade (V)	0,0021	0,013	0,1055	0,0049	<0,0001
Boro (B)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0002
V × B	0,1327	0,0388	0,3016	0,0741	0,1954

<sup>†</sup>Médias seguidas de letras distintas na coluna dentro de cada fator, diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

<sup>‡</sup>Concentração de boro na solução nutritiva: deficiente = 4,5 µmol L<sup>-1</sup> e adequado = 45 µmol L<sup>-1</sup>.

## **7 DISCUSSÃO**

### **7.1 Parâmetros morfológicos radiculares**

O comprimento radicular foi reduzido pois a deficiência de B prejudica o alongamento das células (incluindo alterações no comprimento e largura) e a divisão destas na região meristemática da raiz, o que resulta na inibição do alongamento total da raiz. Esta inibição pode ser causada principalmente por efeitos adversos da deficiência de B na estrutura da parede celular e no aumento das células recém-divididas (DELL; HUANG, 1997).

Segundo alguns autores, a resposta mais rápida à depleção ou à deficiência de B em plantas superiores é a inibição ou interrupção do alongamento da raiz, tanto de raízes principais quanto laterais (DUGGER, 1983; MARSCHNER, 1995). Além disso, a inibição do alongamento na região meristemática da raiz, ocorre dentro de poucas horas após a remoção do B da solução nutritiva (COHEN; ALBERT, 1974; BOHNSACK; ALBERT, 1977; COHEN; LEPPER, 1977; HIRSCH; TORREY, 1980). Porém, raízes reprimidas podem retomar o alongamento se o B for reabastecido antes de causar danos permanentes na região meristemática da raiz (BOHNSACK; ALBERT, 1977; DELL; HUANG; 1997)

Embora a restrição no crescimento do sistema radicular seja um dos sintomas mais evidentes da deficiência de B, as funções bioquímicas do B no processo de crescimento das raízes, ainda não estão bem definidas (BOARETTO, 2006). Lukaszewski e Blevins (1996) propuseram que a ação do B no meristema radicular está associado com o



metabolismo do ascorbato. O mecanismo da interação B-ascorbato pode estar relacionado com a associação do B com o ciclo de oxi-redução do ascorbato e com o transporte de elétrons na membrana plasmática, o que pode influenciar no crescimento do tecido.

Outros autores propõem que a inibição do alongamento da raiz é causada pelo acúmulo de níveis excessivos de ácido indolacético endógeno (AIA) nas regiões meristemáticas de raízes sob deficiência de B (DUGGER, 1983). Esta hipótese é amplamente baseada no aspecto morfológico visualmente semelhante, de raízes com níveis de deficiência de B e supra-ótimas do AIA (BOHNSACK; ALBERT, 1977; HIRSCH; TORREY, 1980). Por outro lado, existem evidências que o acúmulo excessivo de AIA endógeno nas regiões apical e subapical da raiz não é a principal causa para a inibição do alongamento da raiz devido a deficiência de B (HIRSCH; PENGELLY; TORREY, 1982). Portanto, há divergência na opinião de pesquisadores quanto a relação existente entre acúmulo excessivo de AIA e inibição do alongamento de raízes causado pela deficiência de B.

O aumento do diâmetro radicular das plantas sob deficiência de B constatado no presente trabalho, também foi observado por outros autores (KOUCHI; KUMAZAWA, 1975; HIRSCH; TORREY, 1980; LOOMIS; DURST, 1992; PINHO et al., 2008). O espessamento das raízes das plantas sob deficiência de B é um aspecto desfavorável ao crescimento e desenvolvimento das mesmas, uma vez que as raízes finas são as principais responsáveis pela absorção de água e nutrientes (VILELA; ANGHINONI, 1984; FITTER, 1991). Segundo Hu e Brown (1994), a mal formação da parede em células de raízes causada pela deficiência de B, também pode levar à anormalidade na forma final e no tamanho das células recém-divididas, isto pode ter acarretado no espessamento das raízes constatado no presente trabalho.

A parede celular das plantas é constituída por microfibrilas rígidas de moléculas de celulose embebidas numa matriz do tipo gel composto por hemicelulose, pectina, lignina e por proteínas (BECKER; DEAMER, 1991; BRETT; WALDRON, 1996). A parede celular primária tem propriedades de elasticidade, que é reversível, e extensibilidade, que permite a expansão da parede de uma forma plástica em resposta ao crescimento celular. Quando uma célula da planta atinge o seu tamanho e forma final, pode depositar uma parede celular secundária na superfície interior da parede principal. A parede secundária contém mais celulose e lignina do que a parede primária, dando origem a sua falta de elasticidade e extensibilidade, fixando assim o tamanho e forma da célula (BECKER; DEAMER, 1991). O desenvolvimento anormal estrutural nas paredes celulares provocadas por deficiência de B pode ser relacionado com a diminuição drástica na plasticidade da parede celular, tal como

observado por Hu e Brown (1994), conduzindo à falha na expansão ou alongamento de células recém-divididas.

A Inibição da divisão celular é, provavelmente, a resposta secundária da região meristemática da raiz à deficiência de B. A inibição ou paralisação da divisão celular foi apenas observada nas extremidades das raízes sujeitas a deficiência prolongada de B (mais do que 6 h de -B) (COHEN; ALBERT, 1974; ROBERTSON; LOUGHMAN, 1974; KOUCHI; KUMAZAWA, 1975; MOORE; HIRSCH, 1983).

Diante das evidências, conclui-se que o B desempenha um papel primordial no crescimento celular e um papel secundário na divisão das células, ambos os papéis podem contribuir para alongamento total raiz. A incapacidade de aumento e crescimento das células na região merismática das raízes com deficiência de B é causada pela mal formação da estrutura da parede celular e pela perda da extensibilidade plástica. A parede celular primária é vital no processo de crescimento celular, devido à sua plasticidade (DELL; HUANG; 1997).

## **7.2 Crescimento e produção de biomassa**

A menor altura e comprimento de entrenós observados nas plantas com deficiência de B, estão relacionados ao papel essencial que este nutriente exerce na formação de tecidos meristemáticos caulinares (HU et al., 1997; BLEVINS; LUKASZEWSKI, 1998), ou seja, na falta de B o crescimento e desenvolvimento caulinar são inibidos. Esta inibição pode ser causada principalmente por efeitos adversos da deficiência de B na estrutura da parede e aumento das células recém-divididas (DELL; HUANG, 1997).

O aumento na produção de matéria seca bem como redução da relação raiz / parte aérea das plantas com deficiência de B, evidenciam um maior investimento relativo de fotoassimilados e alocação de C para o crescimento dessas estruturas, sugerindo, dessa maneira, uma tentativa de adaptação das plantas às baixas concentrações de B na solução (DECHEN; NACHTIGALL, 2006; HORN et al., 2006; BATISTA, 2014).

O impacto da deficiência de B sobre o particionamento de assimilados, pode influenciar fortemente a capacidade das plantas em lidar com outras condições ambientais desfavoráveis, como deficit hídrico e baixa disponibilidade de outros nutrientes. No campo, plantas com deficiência de B apresentando razões parte aérea / raiz mais altas seriam menos resilientes a um declínio em água e nutrientes disponíveis no solo,

pois haveria uma maior demanda da parte aérea por água e nutrientes por unidade de comprimento radicular (DELL; HUANG, 1997).

Os parâmetros biométricos que não foram influenciados pelo fator B no presente trabalho, estão associados a baixa exigência do nutriente por gramíneas em relação às dicotiledôneas. Portanto, as reservas existentes no tecido das mudas, somado às baixas concentrações de B existentes na solução, foram suficientes para suprir a necessidade da planta, para a formação dessas estruturas (MONSON; GAINES, 1986; BROWN et al., 1992; GUPTA, 1993; HU; BROWN; LABAVITCH, 1996; DUPAS, 2012). A concentração de B existente no tecido de reserva das mudas utilizadas no presente trabalho, embora não tenha sido apresentada, também foi determinada, e os valores estão na ordem de 17 e 20 mg de B kg<sup>-1</sup> de matéria seca, nas variedades RB867515 e RB92579 respectivamente.

Sugere-se para futuros trabalhos, concentrações de B inferiores a 4,5 µmol L<sup>-1</sup> (0,05 mg L<sup>-1</sup> de B), além de análises bioquímicas de açúcares totais, açúcares solúveis, açúcares redutores, sacarose e amido, nas diferentes partes da planta, bem como cortes histológicos dos tecidos e período experimental prolongado, para melhor entendimento e visualização dos sintomas de deficiência de B em cana-de-açúcar.

### **7.3 Aspectos nutricionais**

A menor concentração de nutrientes na parte aérea das plantas sob deficiência de B, são explicadas pela restrição do desenvolvimento radicular, como redução do comprimento, superfície e aumento do diâmetro. A eficiência das plantas na absorção dos nutrientes varia na razão direta do comprimento e da espessura das raízes pois esses atributos influenciam na superfície de absorção (VILELA; ANGHINONI, 1984; FITTER, 1991; BARBER 1995; HORN et al., 2006; ZONTA et al., 2006). Portanto, as raízes das plantas cultivadas sob deficiência de B, tiveram a área superficial reduzida e, conseqüentemente, menor número de sítios de absorção de nutrientes em contato com a solução nutritiva, resultando assim em menor concentração dos nutrientes na parte aérea das plantas.

Existe também, a possibilidade de ocorrência de interações dos nutrientes. Em plantas superiores, essas interações ocorrem quando o suprimento de um nutriente afeta a absorção, redistribuição ou a função de outro nutriente, induzindo deficiência ou toxidez, podendo modificar o desenvolvimento vegetal. (GUPTA, 1993; LOUÉ 1993; MALAVOLTA et al. 1997; TARIQ; MOTT, 2007). Essas interações podem ter provocado ligeiro desequilíbrio nutricional no interior das plantas, afetando a absorção dos nutrientes

estudados (CORRÊA et al, 2006; TARIQ; MOTT, 2007).

Assim, a interação B – N é atribuída a influência que o B exerce no aumento da atividade da enzima N-redutase (BONILLA et al., 1980; SHEN; LIANG; SHEN, 1993).

As interações B – P e B – K, são atribuídas às funções que o B exerce na permeabilidade da membrana à entrada e saída de íons das células vegetais, através do estímulo da atividade da enzima ATPase, (POLLARD; PARR; LOUGHMAN, 1977; POWER; WOODS, 1997; SHORROCKS, 1990; SALVADOR et al. 2003). Os possíveis mecanismos, sendo que este controle é exercido, incluem interação direta de B com componentes poli-hidroxi da membrana e da elevação dos níveis endógenos de auxinas (DELA-FUENTE; TANG; GUZMAN, 1986; TARIQ; MOTT, 2007).

Interações B – Ca, são atribuídas ao papel do B na translocação do Ca tornando-o solúvel nos tecidos (WALLACE, 1961). Portanto, sob deficiência de B a planta tende a acumular o Ca numa forma insolúvel, ou seja, como componente da parede celular, devido a grande similaridade de funções que ambos desempenham no metabolismo da mesma (DELA-FUENTE; TANG; GUZMAN, 1986; RAMON; CARPENA-RUIZ; GARATE, 1990). Isso em parte, ajuda explicar os resultados observados no presente trabalho, onde não foi constatado influência do B apenas sobre a concentração de Ca na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar, sugerindo assim, uma tentativa de adaptação das plantas ao meio restritivo em B, através da absorção constante de Ca, cuja disponibilidade na solução, não variou.

Embora tenha sido constatado influência do B na concentração dos nutrientes na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar, exceto Ca, os respectivos teores, incluindo o B, estão dentro das faixas consideradas adequadas para o desenvolvimento da cana-de-açúcar (ORLANDO FILHO, 1993; MALAVOLTA et al., 1997). Assim, justifica-se a baixa ocorrência de sintomas visuais de deficiência de B, bem como seu efeito na variabilidade dos parâmetros biométricos observados no presente trabalho. Dessa forma, constata-se que o grau de deficiência, ao qual a cana-de-açúcar foi submetido, foi baixo e insuficiente para reduzir a concentração de B na planta para níveis limitantes durante o período estudado (100 dias).

A quantidade acumulada de nutrientes na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar sofreu um efeito de diluição e, portanto, comportou-se de forma contrária à concentração dos nutrientes. Este resultado está relacionado ao fato, de que em níveis muito baixo de disponibilidade de um nutriente, um suprimento levemente maior do mesmo, resultará em um aumento proporcionalmente maior em crescimento da planta, então a

quantidade acumulada do nutriente, com base em unidade de matéria seca, ou a sua concentração no tecido, na verdade diminui. O que acontece, essencialmente, é diluição pelo crescimento. Esse fenômeno é conhecido como efeito Steenbjerg (STEEMBJERG; JAKOBSEN, 1963; SUMNER, 1979; SAVOY; ROBINSON 1990; JONES, 1993; EPSTEIN; BLOOM, 2006). Portanto, a maior quantidade de nutrientes acumulados na parte aérea das plantas sob deficiência de B, foi fortemente influenciada pelo aumento na produção de matéria seca dessas plantas, dessa forma, se comportando de forma contrária a real concentração dos nutrientes nos tecidos.

Da mesma forma, a quantidade de nutrientes absorvidos por metro de raiz também está sujeita ao mesmo efeito, pois é calculada através da razão: quantidade do nutriente acumulada na parte aérea / comprimento radicular. Embora, as plantas submetidas a deficiência de B tenham apresentado restrição no comprimento radicular, o aumento na produção de matéria seca dessas plantas foi proporcionalmente maior, e portanto, influenciou nesses resultados.

#### **7.4 Diferenças varietais**

As diferenças entre as variedades não foram previamente discutidas devido a ausência de dados na literatura a respeito do assunto. Porém, observa-se que a variedade RB92579, embora seja mais exigente quanto ao B em relação a variedade RB867515, é também mais eficiente na sua absorção a partir de baixas concentrações do elemento na solução nutritiva, ou seja, um fenômeno compensando o outro. Assim, uma pequena quantidade de B, capaz de cumprir seu papel estrutural e o funcionamento das membranas, foi suficiente mesmo com o menor nível de B na solução ( $4,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ ), enquanto que, para funções como alongamento e divisão celular, entre outras, seriam necessárias maiores quantidades do nutriente (ROSOLEM; ESTEVES; FARELLI, 1999).

A variedade RB92579, foi lançada posteriormente à variedade RB867515, ou seja, é uma variedade mais nova. Provavelmente, uma das características que levou a sua seleção no melhoramento genético da cana-de-açúcar, foi sua eficiência na absorção de nutrientes, entre outras importantes características dessa variedade (CATÁLOGO NACIONAL DE VARIEDADES “RB” DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2010). Assim, justificando o seu melhor desempenho e a maior tolerância à baixa disponibilidade de B na solução nutritiva em relação a variedade RB867515, conforme foi constatado no presente trabalho.

## 8 CONCLUSÃO

A deficiência de B reduziu o comprimento e superfície das raízes, e aumentou o diâmetro radicular das plantas de cana-de-açúcar.

O comprimento de entrenós e altura de plantas, foram reduzidos nas plantas submetidas a baixa concentração de B na solução nutritiva.

A produção de matéria seca foi incrementada nas plantas sob deficiência de B.

A concentração de nutrientes na parte aérea, exceto Ca, foi reduzida nas plantas de cana-de-açúcar submetidas a deficiência de B.

A variedade RB92579 apresentou maior produção de MSRA, MSC, MSF, menor diâmetro radicular e maior AP em relação a variedade RB867515, sob baixa concentração de B.

As variedades de cana-de-açúcar estudadas, comportam-se de maneira diferente frente a baixa disponibilidade de B na solução nutritiva. Sendo a variedade RB92579 mais tolerante e a variedade RB867515 mais suscetível.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C.A.; VAN RAIJ, B.; ABREU, M.F.; GONZÁLES, A.P. Routine soil testing to monitor heavy metals and boron. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, p. 564-571, 2005.
- ADORNA, J.C.; CRUSCIOL, C.A.C.; ROSSATO, O.B. Fertilization with filter cake and micronutrients in plant cane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 649-657, June 2013.
- 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. **Scientia Agricola**, 55:379-387, 1998.
- ALVAREZ-TINAUT, M.C.; LEAL A.; AGUI, I.; RECALDE-MARTINEZ, L. Physiological effects of B-Mn interaction in tomato plants. II. The uptake and translocation of macro elements. **Analise de Edafologia y Agrobiologia**, 38: 991-1012, 1979.
- ALVAREZ, R.; WUTKE, A.C.P. Adubação de cana-de-açúcar. IX. Experimentos preliminares com micronutrientes. **Bragantia**, 22: 647-650, 1963.
- ALVES, V.M.C.; PARENTONI, S.N.; VASCONCELLOS, C.A.; PITTA, G.V.E.; FRANÇA, C.C.M. Cinética de absorção de fósforo e crescimento do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para eficiência a fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, 1:85-92, 2002.
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2.ed. New York, John Wiley and Sons. 414p, 1995.
- BATEY, T. Manganese and boron deficiency. **Trace elements in soils and crops**. Technical Bulletin, 21. Her Majesty's Stationary Office, London. p. 137-148, 1971.
- BATISTA, R.O. **Cinética de absorção de nutrientes, morfologia radicular e eficiência nutricional de clones de cedro australiano**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, MG: UFLA. 104 p. 2014.

- BECKER, W.M.; DEAMER, D.W. **The World of the Cell**, 2nd ed. The Benjamin / Cummings Publ. Company Inc., Sydney, 1991.
- BIEVRE, P.D.; BARNES, I.L. Table of the isotopic composition of the elements as determined by mass spectrometry. **International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes**, Amsterdam, v. 65, p. 211-230, 1985.
- BLEVINS, D.G.; LUKASZEWSKI, K.M. Boron plant structure and function. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 49, p. 481-500, 1998.
- BOARETTO, A.E.; MURAOKA, T.; BOARETTO, R.M. Absorção e translocação de micronutrientes, aplicado via foliar, pelos citros. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 24, n. 1, p. 177-197, 2003.
- BOARETTO, R.M. **Boro (<sup>10</sup>B) em laranjeira: Absorção e mobilidade**. (Tese de Doutorado). Piracicaba, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo. 120p, 2006.
- BOHNSACK, C.W.; ALBERT, L.S. Early effects of boron deficiency on indoleacetic acid oxidase levels of squash root tips. **Plant Physiology**. 59:1047–1050, 1977.
- BONILLA, I.; CADAHIA, O.; CARPENA, O.; HERNANDO, V. Effects of boron on nitrogen metabolism and sugar levels of sugar beet. **Plant Soil**, 57: 3-9, 1980.
- BRETT, C.T.; WALDRON, K.W. **Physiology and Biochemistry of Plant Cell Walls**, 2 ed. Chapman and Hall, London, 1996.
- BROWN, P. H.; HU, H. Does boron play only a structural role in the growing tissues of higher plants?. **Plant and Soil**, The Hague, v. 196, p. 211-215, 1997.
- BROWN, P. H.; PICCHIONI, G.; JENKIN, M.; HU, H. Use of ICP-MS and <sup>10</sup>B to trace the movement of boron in plants and soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 23, n. 17-20, p. 2781-2807, 1992.
- BROWN, P.H.; BELLALLOUI, WIMMER, M.A.; BASSIL, E.; RUIZ, J.; HU, H.; PFEFFER, H.; DANDEL, F.; ROMHELD, V. **Boron in plant biology**. Plant Biology, Stuttgart, v. 4, n. 2, p. 205-223, 2002.
- BROWN, P.H.; HU, H. Phloem boron mobility in diverse plant species. **Botanica Acta**, Stuttgart, v. 111, p. 331-335, 1998.
- BROWN, P.H.; SHELP, B.J. Boron mobility in plants. In: DELL, B.; BROWN, P.H.; BELL, R.W. **Boron in soils and plants: Reviews**. Dordrecht: Kluwer Academic. p. 85-101, 1997.
- BUKOVAC, M.J.; WITTEWER, S.H. Absorption and mobility of foliar applied nutrients. **Plant Physiology**, Rockville, v. 32, p. 428-435, 1957.
- CARPENA-ARTES, O.; CARPENA-RUIZ, R.O. Effects of boron in tomato plant. Leaf evaluations. **Agrochimica**, 31: 391-400, 1987.



- CATÁLOGO NACIONAL DE VARIEDADES “RB” DE CANA-DE-AÇÚCAR. Curitiba: Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro, 2010. 136p. Disponível em: <<http://www.canaufv.com.br/catalogo/catalogo-2010>>.pdf. Acesso em: novembro de 2015
- CHAMEL, A.R. Foliar uptake of chemicals studied with whole plants and isolated cuticles. In: NEUMANN, P.M. **Plant growth and leaf-applied chemicals**. Boca Raton: CRC Press, p. 27-50. 1988.
- COHEN, M.S.; ALBERT, L.S. Autoradiographic examination of meristems of intact boron-deficient squash roots treated with tritiated thymidine. **Plant Physiology**. 54, 766–768, 1974.
- COHEN, M.S.; LEPPER, R.Jr.; Effects of boron on cell elongation and division in squash roots. **Plant Physiology**. 59, 884–887, 1977
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 2 – Safra 2015/16, n. 1 - Primeiro Levantamento, Brasília, abril, 2015. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: novembro de 2015.
- COREY, R.B.; SCHULTE, E.E. Factors affecting the availability of nutrients to plants. In: WALSH, L.M.; BEATON, J.D. **Soil testing and plant analysis**. Soil Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin, USA, p. 23-34, 1973.
- CORRÊA, J.C.; COSTA, A. de M.; CRUSCIOL, C.A.C.; MAUAD, M. Doses de boro e crescimento radicular e da parte aérea de cultivares de arroz de terras altas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.1, p.1077-1082, 2006.
- CUNHA, C.A.H.; MACHADO, R.E.; COELHO, R.D. **Irrigação da cana-de-açúcar: Análise Econômica**. STAB, v.19, nº 4, 2001.
- DANNEL, F., H. PFEFFER, V. RÖMHELD. Update on boron in higher plants – uptake, primary translocation and compartmentation. **Plant Biology**. 4:193–204, 2002.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G.R. Micronutrientes. In: FERNANDES, M.S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa-MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.327-354, 2006.
- DECHEN, A.R., et al. Funções dos micronutrientes nas plantas. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Instituto de Potassa e Fosfato, p. 65-78, 1991.
- DELA-FUENTE, R.K.; TANG, P.M.; GUZMAN, C.C. Plant growth substances, 1985: Plant environment interactions. WILKINSIN, R.E. **Proceedings of the 12th International Conference on Plant Growth Substances**, August 26-31, 1985, Madison Avenue, New York, USA, p. 227-, 1986.
- DELL, B.; HUANG, L. Physiological response of plants to low boron. **Plant and Soil** 193, 103-120, 1997.

- DEMBITSKY, V.M.; SMOUM, R.; AL-QUNTAR, A.A.; ALI, H.A.; PERGMAMENT, I.; SREBNIK, M. Natural occurrence of boron-containing compounds in plants, algae and microorganisms. **Plant Science**, Amsterdam, v. 163, p. 931-942, 2002.
- DILLEWIJN, C. VAN. Botany of sugar cane. Waltham: Chronica Botanica, 371 p, 1952.
- DORDAS, C.; CHRISPPEELS, M.J.; BROWN, P.H. Permeability and channel-mediated transport of boric acid across membrane vesicles isolated from squash roots. **Plant Physiology**, Rockville, v. 124, n. 3, p. 1349-1361, 2000.
- DORDAS, C.; SAH, R.; BROWN, P.H.; ZENG, Q.; HU, H. Remobilização de micronutrientes e elementos tóxicos em plantas superiores. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B. VAN; ABREU, C.A. (Ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq; Fapesp; Potafos. p.43-61, 2001.
- DUGGER, W.M. Boron in plant metabolism. In: LAUCHLI, A.; BIELESKI, R.L. **Encyclopedia of Plant Physiology**, ed. 15B: 626–50. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- DUNCAN, R.R.; BALIGAR, V.C. Genetics, breeding and physiological mechanisms of nutrient uptake and use efficiency: an overview. In: BALIGAR, V.C.; DUNCAN, R.R. **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego, Academic Press. p.3-35, 1990.
- DUPAS, E. **Nitrogênio, potássio e boro**: aspectos produtivos, morfológicos, nutricionais e frações fibrosas e proteicas do capim tanzânia. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” ESALQ-USP – Piracicaba-SP. 89 p. 2012.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. Nutrition and growth. In: EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, p. 243-273, 2006.
- EPSTEIN, E.; JEFFERIES, R.L. The genetic basis of selective ion transport in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, v.15, p.162-184, 1984.
- ESPIRONELLO, A.; RAIJ, B.VAN; PENATTI, C.P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J.L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M.G.A.; ROSSETTO, R. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B.VAN; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo/ Fundação IAC. p.237-239. (Boletim Técnico, 100), 1996.
- EVANS, H. Elements other than nitrogen, phosphorus and potassium in the mineral nutrition. In: **Congress of the international society of sugar cane technologists**, 10, Proceedings. Amsterdam, Elsevier, p.437-508, Hawaii, 1959.
- FERREIRA, D.F. SISVAR: A program for statistical analysis and teaching. **Revista Symposium** 6:36–41, 2008.
- FITTER, A.H. Characteristics and functions of root systems. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. **Plant root: The Hidden Half**. New York, Dekker.p.3-22, 1991.

- FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OTTO, R.; FARONI, C.E. e TOVAJAR, J.G. Utilization of boron ( $^{10}\text{B}$ ) derived from fertilizer by sugar cane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:1667-1674, 2009.
- FURLANI, A.M.C. Nutrição mineral. In: KERBAUY, G.B. **Fisiologia vegetal**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan. p. 40-75, 2004.
- FURLANI, A.M.C.; FURLANI, P.R. **Composição e pH de soluções nutritivas para estudos fisiológicos e seleção de plantas em condições nutricionais adversas**. Campinas: Instituto Agrônômico. (Boletim técnico, 121) , 34 p. 1988.
- GASCHO, G.J.; ANDERSON, B.L.; BOWEN, J.E. Sugarcane. In: BENNETT, W.F., ed. **Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants**. Saint Paul, APS Press/The American Phytopathological Society. p. 37-42, 1993.
- GASSERT, B.; SPRICH, E.; PFEFFER, H.; DANDEL, F.; WIRÉN, N.; ROMHELD, V. Characterization of boron uptake in higher plants. In: GOLDBACH, H.E. et al. **Boron in plant and animal nutrition**. New York: Kluwer Academic. p. 119-126, 2002.
- GONÇALVES, J.S.; VEIGA FILHO, A.A. **Açúcar e Álcool**. Prognóstico Agríc., v.2, p.141-150, 1998.
- GUPTA, U.C. Boron nutrition of crops. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 31, p. 273-307, 1979.
- GUPTA, U.C. Responses to boron on field and horticultural crop yields. In: GUPTA, U.C., ed. **Boron and its role in crop production**. Boca Raton, CRC Press. p. 177-183, 1993.
- HANSON, E.J. Movement of boron out of tree fruit leaves. **Hortscience**, Alexandria, v. 26, n. 3, p. 271-273, 1991.
- HIRSCH, A.M.; PENGELLY, W.L.; TORREY, J.G. Endogenous IAA levels in boron-deficient and control root tips of sunflower. **Botanical Gazette**. 143, 15-19, 1982.
- HIRSCH, A.M.; TORREY, J.G. Ultrastructural changes in sunflower root cells in relation to boron deficiency and added auxin. **Canadian Journal of Botany**. 58, 856-866, 1980.
- HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soils**. Berkeley: The College of Agriculture University of California. 32 p. 1950.
- HORN, D., et al. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, p. 77-85, 2006.
- HU, H.; BROWN, P. H. Localization of boron in cell walls of squash and tobacco and its association with pectin. Evidence for a structural role of boron in the cell wall. **Plant Physiology**, Rockville, v. 105, p. 681-689, 1994.

- HU, H.; BROWN, P. H.; LABAVITCH, J. M. Species variability in boron requirement is correlated with cell wall. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 47, n. 295, p. 272-232, 1996.
- HU, H.; BROWN, P.H. Absorption of boron by plant roots. In: DELL, B.; BROWN, P.H.; BELL, R.W. **Boron in soils and plants: Reviews**. Dordrecht: Kluwer Academic. p. 49-58, 1997
- HU, H.; BROWN, P.H. Phloem mobility of born in species dependent: evidence of boron mobility in sorbitol-rich species. **Annals of Botany**, Oxford, v. 77, n. 5, p. 497-505, 1996.
- HU, H.; PENN, S.G.; LEBRILLA, C.B.; BROWN, P.H. Isolation and characterization of soluble boron complexes in higher plants. **Plant Physiology**, Rockville, v. 113, n. 2, p. 649-655, 1997.
- JONES Jr., J.B. Modern interpretation systems for soil and plant analysis in the USA. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, 33:1039-1043, 1993.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. Element of group III. In: **Trace elements in soils and plants**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press. p. 127-134, 1984.
- KERRIEN, F.; CHAMEL, A.; IMBERT, J.L. Comparative study of foliar uptake and translocation of boron ( $^{10}\text{B}$ ) supplied as four different products in radish plants. In: BELL, R.W.; RERKASEM, B. **Boron in soils and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic. p. 191-195, 1997.
- KOBAYASHI, M.; MATOH, T. In vitro reconstitution of the boron-polysaccharide complex purified from cultured tobacco BY-2 cells. In: BELL, R.W.; RERKASEM, B. **Boron in soils and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic. p. 237-241, 1997.
- KOUCHI, H.; KUMAZAWA, K. Anatomical responses of root tips to boron deficiency II. Effect of boron deficiency on the cellular growth and development in root tips. **Soil Science and Plant Nutrition**. 21, 137-150, 1975.
- LEECE, D.R. Effects of boron on the physiological activity of zinc in maize. **Australian Journal of Agricultural Research**, 29: 739-749, 1978.
- LEITE, G.H.P. **Maturadores associados à boro e silício aplicados via foliar em cana-de-açúcar (*saccharum spp.*)** (Tese de Doutorado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2010.
- LOOMIS, W. D.; DURST, R. W. Chemistry and biology of boron. **BioFactors**, Oxford, v. 3, n. 4, p. 229-239, 1992.
- LOUÉ, A. **Oligo-éléments en agriculture**. Antibes: SCPA. 577p. 1993.
- LUKASZEWSKI, K. M.; BLEVINS, D. G. Root growth inhibition in boron deficient or aluminum-stressed squash may be a result of impaired ascorbate metabolism. **Plant Physiology**, Rockville, v. 112, p. 1135-1140, 1996.

- MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G. de A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1575-1582, dez. 2009.
- MALAVOLTA, E. Micronutrientes na adubação da cana-de-açúcar. In: **Seminário sobre micronutrientes**. Cali, CIAT. 27 p. 1990.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. Metodologia para análise de elemento em material vegetal. In: MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p. 231-307, 1997.
- MARSCHNER, H. Functions of mineral: Micronutrients. In: MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. San Diego: Academic Press. p. 313-404, 1997.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press. 647p. 1986.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. London, Academic Press. p.347-364, 1995.
- MATOH, T. Boron in plant cell walls. In: DELL, B.; BROWN, P. H.; BELL, R. W. **Boron in soils and plants: Reviews**. Dordrecht: Kluwer Academic. p. 59-70, 1997.
- MATOH, T.; KOBAYASHI, M. Boron in plant cell walls. In: GOLDBACH, H. E.; et al. **Boron in plant and animal nutrition**. New York: Kluwer Academic. p. 143-155, 2002.
- MATTOS JUNIOR, D.; BATAGLIA, O.C.; QUAGGIO, J.A. Nutrição dos citros. In: MATTOS JUNIOR, D. et al. **Citros**. 1. ed. Campinas: Instituto Agrônomo. p. 197-219, 2005.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. Boron. In: MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 5. ed. Dordrecht: Kluwer Academic. p. 621-638, 2001.
- MONSON, W.G.; GAINES, T.P. Supplemental boron effects on yield and quality of seven bermudagrasses. **Agronomy Journal**, 78:522-523, 1986.
- MOORE, H.M.; HIRSCH, A.M. Effects of boron deficiency on mitosis and incorporation of tritiated thymidine into nuclei of sunflower root tips. **American Journal of Botany**. 70, 165-17, 1983.
- MORAES, M.A.F.D. **A desregulamentação do setor sucroalcooleiro do Brasil**. Americana - SP, 238 p., 2000.
- MOREIRA, A.; CARVALHO, J.G.; MORAES, L.A.C. e SALVADOR, J.O. Efeito da relação cálcio e magnésio do corretivo sobre micronutrientes na alfafa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**., 35:2051-2056, 2000.

- OLIVEIRA, J.G. **Perspectivas para a cogeração do bagaço de cana-de-açúcar: potencial do mercado de carbono do setor sucroalcooleiro paulista**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- ORLANDO FILHO, J. Calagem e adubação da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S.; OLIVEIRA, E.A.M. (Orgs.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ-USP. p. 133-146, 1993.
- ORLANDO FILHO, J.; ROSSETO, R.; CASAGRANDE, A.A. Cana-de-açúcar. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B. VAN; ABREU, C.A. (Ed). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq; Fapesp; Potafos: 355-368, 2001
- PERICA, S.; BELLALLOUI, N.; GREVE, C.; HU, H.; BROWN, P.H. Boron transport and soluble carbohydrate concentrations in olive. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 126, n. 3, p. 291-296, 2001.
- PFEFFER, H.; DANIEL, F.; ROMHELD, V. Are there two mechanisms for boron uptake in sunflower? **Journal of Plant Physiology**. Melbourne, v. 155, p. 34-40, 1999.
- PICCHIONI, G.A.; WEINBAUM, S.A.; BROWN, P.H. Retention and the kinetics of uptake and export of foliage-applied, labeled boron by apple, pear, prune and sweet cherry leaves. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 120, n. 1, p. 28-35, 1995.
- PINHO, L.G.R.; MONNERAT, P.H.; PIRES, A.A.; MARCIANO, C.R.; SOARES, Y.J.B. Distribuição de nutrientes e sintomas visuais de deficiência de boro em raízes de coqueiro-anão verde. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. 32, 2581-2590, 2008.
- POLLARD, A.S.; PARR, A.J.; LOUGHMAN, B.C. Boron in relation to membrane function in higher plants. **Journal of Experimental Botany**, 28: 831-841, 1977.
- POWER, P. P.; WOODS, W. G. The chemistry of boron and its speciation in plants. In: DELL, B.; BROWN, P.H.; BELL, R.W. **Boron in soils and plants: reviews**. Dordrecht: Kluwer Academic. p. 1-14, 1997.
- RAIJ, B. VAN; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. (**Boletim 100**) 2 ed. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação IAC. 285p. 1996.
- RAMON, A.M.; CARPENA-RUIZ R.O.; GARATE, A. The effects of short-term deficiency of boron on potassium, calcium and magnesium distribution in leaves and roots of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) plants. **Developments in Plant and Soil Sciences**. 41: 287-290, 1990.
- ROBERTSON, G.A.; LOUGHMAN, B.C. Response to boron deficiency: a comparison with responses produced by chemical methods of retarding root elongation. **New Phytologist**, 73, 821–832, 1974.

- RÖMHELD, V. Aspectos fisiológicos dos sintomas de deficiência e toxicidade de micronutrientes e elementos tóxicos em plantas superiores. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B. VAN; ABREU, C.A. (Ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq; Fapesp; Potafos. p.71-84, 2001.
- ROSOLEM, C.A.; ESTEVES, J.A.F.; FERELLI, L. Resposta de cultivares de algodão ao boro em solução nutritiva. **Scientia Agricola**. p. 705-711, 1999.
- ROSOLEM, C.A.; GIOMMO, J.S.; LAURENTI, R.L.B. Crescimento radicular e nutrição de cultivares de algodoeiro em resposta à calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 35:827-833, 2000.
- SACRAMENTO, L.V.; ROSOLEM, C.A. Cinética de absorção de potássio e seus ajustes em plantas de soja em função da idade e estado nutricional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 21: 213-219, 1997.
- SALVADOR, J.O.; MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; CABRAL, C.P. Influência do boro e do manganês no crescimento e na composição mineral de mudas de goiabeira. **Ciência e Agrotecnologia**, 27:325-331, 2003.
- SAVOY, H.J.; ROBINSON, D.L. Norm range size effects in calculating diagnosis and recommendation integrated system indices. **Agronomy Journal**, 82:592-596, 1990.
- SCHENK, M.K.; BARBER, S.A. Phosphate uptake by corn as affected by soil characteristics and root morphology. **Soil Science Society of America Journal**., 43:880-883, 1979.
- SHEAR, C.B.; CRANE, H.L.; MAYERS, A.T. Nutrient-element balance: A fundamental concept in plant nutrition. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, 47: 239-248, 1946.
- SHEN, Z.; LIANG Y.; SHEN, K. Effect of boron on the nitrate reductase activity in oilseed rape plants. **Journal of Plant Nutrition**, 16:1229-1239, 1993.
- SHORROCKS, V.M. **Behavior, function and significance of boron in agriculture**. Report on an International Workshop at St. John's College, Oxford, England. 23-25 July, 1990. Published by Borax Consolidated Limited, London, 1990.
- SHORROCKS, V.M. The occurrence and correction of boron deficiency. In: DELL, B.; BROWN, P.H.; BELL, R.W. **Boron in soils and plants: Reviews**. Dordrecht: Kluwer Academic. p. 121-148, 1997.
- SHU, Z.H.; OBERLY, G.H.; CARY, E.E.; RUTZKE, M. Absorption and translocation of boron applied to aerial tissues of fruiting 'Reliance' peach trees. **Hortscience**, Alexandria, v. 29, n. 1, p. 25-27, 1994.
- SINGH, J.P.; DAHIYA D.J.; NARWAL, R.P. Boron uptake and toxicity in wheat in relation to zinc supply. **Fertilizer Research**, 24: 105-110, 1990

- SIQUEIRA, G.F. **Aplicação de boro e maturadores na pré-colheita da cana-de-açúcar em início e final de safra**. Tese (Doutorado). Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP. 139p. 2014.
- STEENBJERG, F., JAKOBSEN, S. T. Plant nutrition and yield curves. **Soil Science**. 95, 69–90, 1963.
- SUMNER, M.E. Interpretation of foliar analysis for diagnostic purposes. **Agronomy Journal**, 71:343-348, 1979.
- TANADA, T. Localization of boron in membranes. **Journal of Plant Nutrition**, 6:743-749, 1983.
- TANAKA, M.; FUJIWARA, T. Physiological roles and transport mechanisms of boron: perspectives from plants. **European Journal of Physiology** 2008. p. 456, 671– 677, 2008.
- TARIQ, M.; MOTT, C.J.B. Effect of boron on the behavior of nutrients in soil-plant systems - A Review. **Asian Journal of Plant Sciences**, 6: 195-202, 2007.
- TENNANT, D. A test of a modified line intercept method of estimating root length. **Journal of Applied Ecology**., 63:995-1001, 1975.
- VALE, F.; ARAUJO, M.A.G.; VITTI, G.C. Avaliação do estado nutricional dos micronutrientes em áreas com cana-de-açúcar. In: FERTBIO. 2008, Londrina. **Anais... Embrapa Soja: SBCS: IAPAR, UEL**. 1. CD-ROM, 2008.
- VALMIS, J.; ULRICH, A. Boron nutrition in the growth and sugar content of sugar beets. **Journal of the American Society of Sugar Beet Technologists**, 16: 428-439, 1971.
- VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em cultivares de soja afetados pela interação alumínio-fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 8:91-96, 1984.
- WALLACE, A.; BEAR, F.E. Influence of potassium and boron on nutrient element balance and growth of ranger alfalfa. **Plant Physiology**, 26: 664-680, 1949.
- WALLACE, T. **Essential points in the nutrition of plants**: The diagnosis of mineral deficiencies in plants by visual symptoms, 3<sup>rd</sup> Edn., Her Majesty's Stationary Office, London. p. 5-17, 1961.
- WARINGTON, K. The effect of boric acid and borax on the broad bean and certain other plants. **Annals of Botany**, London, v. 37, p. 629-672, 1923.
- YAN, X.; WU, P.; LING, H.; XU, G.; XU, F.; ZHANG, Q. Plant nutriomics in China: an overview. **Annals of Botany**, p.98, 473–482, 2006.
- ZIMMERMANN, M.H.; ZIEGLER, H. List of sugars and sugar alcohols in sieve-tube exudates. In: ZIMMERMANN, M.H.; MILBURN, J.A. **Encyclopedia of Plant Physiology**. Berlin: Sp, 1975.



ZONTA, E., et al. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In:  
FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de  
Ciência do Solo. p. 7-5, 2006.