

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

**ADUBAÇÃO COM SILÍCIO E TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO EM
CANA-DE-AÇÚCAR**

BRENO KENNEDY LIMA BEZERRA

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

BOTUCATU-SP
Fevereiro – 2015

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

**ADUBAÇÃO COM SILÍCIO E TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO EM
CANA-DE-AÇÚCAR**

BRENO KENNEDY LIMA BEZERRA

Orientador: Marcelo de Almeida Silva

Co-orientadora: Mônica Sartori de Camargo

Dissertação apresentada a Faculdade
de Ciências Agrônômicas da UNESP
– Campus de Botucatu para obtenção
do título de Mestre em Agronomia
(Agricultura).

BOTUCATU-SP
Fevereiro – 2015

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

B574a Bezerra, Breno Kennedy Lima, 1986-
Adubação com silício e tolerância ao déficit hídrico em cana-de-açúcar / Breno Kennedy Lima Bezerra. - Botucatu : [s.n.], 2015
xii, 60 f. : grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2015
Orientador: Marcelo de Almeida Silva
Coorientador: Mônica Sartori de Camargo
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar - Adubação. 2. Silício na agricultura. 3. Irrigação com déficit hídrico. I. Silva, Marcelo de Almeida. II. Camargo, Mônica Sartori de. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. IV. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ADUBAÇÃO COM SILÍCIO E TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR

AUTOR: BRENO KENNEDY LIMA BEZERRA

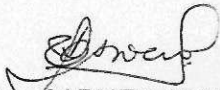
ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. MÔNICA SARTORI DE CAMARGO

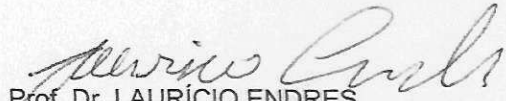
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA
Dep de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu



Profa. Dra. CARMEN SILVIA FERNANDES BOARO
Departamento de Botânica / Instituto de Biociências de Botucatu



Prof. Dr. LAURÍCIO ENDRES
Centro de Ciências Agrárias / Universidade Federal de Alagoas

Prof. Laurício Endres
CECA-UFAL Matr. 13477021

Data da realização: 26 de fevereiro de 2015.

“O intelectual não é filho de si mesmo, ele é filho da Ideia, da Verdade eterna, do Verbo criador e animador imanente a sua criação. Quando pensa corretamente, o pensador segue Deus à risca, ele não segue sua própria quimera. Quando tateia e se debate no esforço da busca, ele é Jacó lutando com o anjo e “forte contra Deus””.

(A.-D. Sertillanges, A vida intelectual).

A Grande Mãe de Deus, Maria Santíssima;

*Aos meus pais, Rejane Lima Bezerra e Benedito José Bezerra,
por me educarem com dignidade e caráter;*

*A minha esposa, Andrea Akemi Hoshino Bezerra, por tamanha dedicação
e Amor, caminhando junto a mim mesmo nas batalhas mais duras.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao meu Bom Deus, por Ele todas as coisas foram feitas, tudo d'Ele provém e sem Ele nada subsiste;

Ao Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva pela orientação, formação e amizade;

À Dra. Mônica Sartori de Camargo pela co-orientação, pelos ensinamentos, pelas conversas e pela amizade;

Aos meus irmãos de república, Pedro Bento da Silva, Carlos Jorge da Silva, Alexandre Carneiro, Leonardo Barbosa, por me proporcionarem, em Botucatu, uma extensão do “Lar” nordestino;

Aos amigos do Laboratório de Ecofisiologia Vegetal Aplicada à Agricultura, Lucas Holanda, Rodrigo Oliver, Alexandrius Barbosa, Gerardo Espinoza, Marcela Brunelli, Paula Moura, Fernanda Bortolheiro, Renata Pincelli, Laís Pereira e Samara Zanetti, por todo auxílio e amizade;

Às técnicas da APTA Regional Polo Centro Sul, Mara, Neusa e Fabiana, pela amizade e ajuda na condução do experimento;

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Campus de Botucatu, por proporcionar-me a realização do Curso de Mestrado e aos seus docentes pelos ensinamentos e pela formação profissional.

SUMÁRIO

RESUMO	1
SUMMARY	3
1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1. Área experimental.....	14
3.2. Caracterização das variedades e da matéria-prima utilizada.....	14
3.3. Caracterização do solo utilizado: análise de textura e química	15
3.4. Manutenção da água na capacidade de campo	15
3.5. Caracterização das condições ambientais durante o experimento.....	15
3.6. Delineamento experimental.....	17
3.7. Condução do experimento	18
5.7.1 Experimento 1.....	18
5.7.2 Experimento 2.....	18
5.8 Avaliações morfológicas e fisiológicas	18
5.8.1 Variáveis morfológicas	19
5.8.2 Variáveis fisiológicas.....	19
5.8.2.1 <i>Índice SPAD</i>	19
5.8.2.2 <i>Conteúdo de clorofila</i>	19
5.8.2.3 <i>Teor relativo de água na folha (TRA)</i>	20
5.8.2.4 <i>Potencial de água foliar (Ψ_w)</i>	20
5.8.2.5 <i>Massa foliar específica (MFE)</i>	21
5.8.2.6 <i>Extravasamento de eletrólitos (EE)</i>	21
5.9 Análise estatística	21
6 RESULTADOS.....	22

6.1 Experimento 1: Déficit durante a fase de perfilhamento do desenvolvimento da cultura (três meses após o transplântio).....	22
6.1.1 Avaliações de atributos morfológicos	22
6.7.1 Avaliações de atributos fisiológicos	26
6.8 Experimento 2: Déficit durante a fase de máximo desenvolvimento da cultura (seis meses após o transplântio).....	33
6.8.1 Avaliações de atributos morfológicos.....	33
6.8.2 Avaliações de atributos fisiológicos	39
7 DISCUSSÃO.....	44
7.1 Atributos morfológicos.....	44
7.2 Atributos fisiológicos	47
8 CONCLUSÕES.....	52
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
10 REFERÊNCIAS	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características químicas do solo utilizado no experimento.....	15
Tabela 2. Quantidades de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) de diferentes fontes utilizadas no experimento.	18
Tabela 3. Quantidades de silicato, calcário e cloreto de magnésio utilizadas no experimento.	18
Tabela 4. Comprimento de plantas, número de perfilhos, número de folhas totais e de folhas verdes durante a fase de perfilhamento de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por três meses antes do déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.	22
Tabela 5. Comprimento de plantas, número de perfilhos, número de folhas totais e folhas verdes durante a fase de perfilhamento de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por três meses após 30 dias com e sem déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.	23
Tabela 6. Comprimento de plantas, número de perfilhos, número de folhas totais e de folhas verdes durante a fase de perfilhamento de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício, seguidos por 60 dias com e sem déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.....	24
Tabela 7. Valores para índice SPAD, teores de clorofila <i>a</i> e clorofila <i>b</i> , potencial de água medido às 5 (antemanhã) e 12 horas, extravasamento de eletrólitos e massa foliar específica de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por três meses, Piracicaba – SP, 2014.	27
Tabela 8. Valores para índice SPAD, teores de clorofila <i>a</i> e clorofila <i>b</i> , potencial de água medido às 5 e 12 horas, extravasamento de eletrólitos e massa foliar específica de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por três meses, seguidos por 30 dias com e sem déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.	28
Tabela 9. Valores para índice SPAD, teores de clorofila <i>a</i> e clorofila <i>b</i> , potencial de água medido às 5 e 12 horas, extravasamento de eletrólitos e massa foliar específica de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por três meses, seguidos por 60 dias com e sem déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.	29
Tabela 10. Comprimento de plantas, número de perfilhos, número de folhas totais e de folhas verdes de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por seis meses, Piracicaba – SP, 2014.	33

- Tabela 11. Comprimento de plantas, número de perfilhos, número de folhas totais e de folhas verdes de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por seis meses, seguidos por 30 dias com e sem déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014..... 34
- Tabela 12. Comprimento de planta, número de perfilhos, número de folhas totais e de folhas verdes de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por seis meses, seguidos por 60 dias com e sem déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014..... 35
- Tabela 13. Valores para índice SPAD, teores de clorofila *a* e clorofila *b*, potencial de água medido às 5 e 12 horas, extravasamento de eletrólitos e massa foliar específica de plantas de cana-de-açúcar de duas variedades, seis meses após o transplântio, Piracicaba – SP, 2014..... 39
- Tabela 14. Valores para índice SPAD, teores de clorofila *a* e clorofila *b*, potencial de água medido às 5 e 12 horas, extravasamento de eletrólitos e massa foliar específica de plantas de cana-de-açúcar de duas variedades cultivadas por seis meses, seguidos por 30 dias de déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014. 40
- Tabela 15. Valores para índice SPAD, teores de clorofila *a* e clorofila *b*, potencial de água medido as 5 e 12 horas, extravasamento de eletrólitos e massa foliar específica de plantas de cana-de-açúcar de duas variedades cultivadas por seis meses, seguidos por 60 dias de déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014. 41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Temperaturas mínima ($T^{\circ} \text{ min}$), média calculada ($T^{\circ} \text{ medCAL}$), máxima ($T^{\circ} \text{ max}$) e umidade relativa do ar (UR) no período de março a outubro de 2014 dentro da casa-de-vegetação onde o efeito da adubação silicatada foi avaliado em plantas de cana-de-açúcar sob déficit hídrico, APTA (Polo Centro Sul), Piracicaba, SP..... 16

Figura 2. Radiação incidente no período de janeiro a outubro de 2014 dentro da casa-de-vegetação onde o efeito da adubação silicatada foi avaliado em plantas de cana-de-açúcar sob déficit hídrico, APTA (Polo Centro Sul), Piracicaba, SP. 17

Figura 3 Efeito da variedade no comprimento de plantas (A), número de perfilhos (B), número de folhas totais (C) e número de folhas verdes (D) aos 0, 30 e 60 DAE e do regime hídrico no comprimento de plantas (E) e número de folhas totais (F) aos 30 e 60 DAE na fase de perfilhamento de duas variedades cana-de-açúcar, Piracicaba – SP, 2014. T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$)..... 25

Figura 4 Efeito do regime hídrico no número de folhas verdes (A), da interação regime hídrico e silício no número de perfilhos (B) aos 30 e 60 DAE e da interação variedade e silício no número de perfilhos (C) e número de folhas totais (D) na fase de perfilhamento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 0, 30 e 60 DAE, Piracicaba – SP, 2014. T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$)..... 26

Figura 5 Efeito do silício no índice SPAD (A), conteúdo de clorofila b (B), extravasamento de eletrólitos (C), potencial de água na folha (D) e massa foliar específica (E) na fase de perfilhamento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 0, 30 e 60 dias após o estresse e da variedade no teor relativo de água (F) aos 60 dias após o estresse, Piracicaba – SP, 2014. Cl b= conteúdo de clorofila b; EE=extravasamento de eletrólitos; Ψ_{w5} =potencial de água na folha na antemanhã; MFE= massa foliar específica; T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$). 30

Figura 6 Efeito da variedade no extravasamento de eletrólitos (A) e do regime hídrico no potencial de água na folha (B) aos 0, 30 e 60 DAE na fase de perfilhamento de duas variedades cana-de-açúcar, Piracicaba – SP, 2014. EE= extravasamento de eletrólitos; Ψ_{w5} =potencial de água na folha na antemanhã; T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de

quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$). 31

Figura 7 Efeito da interação regime hídrico e variedades para o extravasamento de eletrólitos (A) e conteúdo de clorofila *a* (B) na fase de perfilhamento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 0, 30 e 60 dias após o estresse, Piracicaba – SP, 2014. EE= extravasamento de eletrólitos; Cl *a*=conteúdo de clorofila *a*; T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$). 32

Figura 8 Efeito da interação regime hídrico e silício no teor relativo de água na fase de perfilhamento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 60 dias após o estresse, Piracicaba – SP, 2014. TRA= teor relativo de água; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$). 32

Figura 9 Efeito da variedade no comprimento de plantas (A), número de perfilhos (B), número de folhas totais (C) e número de folhas verdes (D) aos 0, 30 e 60 DAE na fase de máximo desenvolvimento de duas variedades cana-de-açúcar, Piracicaba – SP, 2014. T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$). 36

Figura 10 Efeito do silício no comprimento de plantas (A), número de folhas totais (B) e número de folhas verdes (C) aos 0, 30 e 60 DAE, e do regime hídrico no número de folhas totais (D), número de perfilhos (E) e número de folhas verdes (F) aos 30 e 60 DAE na fase máximo desenvolvimento de duas variedades cana-de-açúcar, Piracicaba – SP, 2014. T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$). 37

Figura 11 Efeito da interação variedade e silício para número de perfilhos (A) e de folhas totais (B) na fase de máximo desenvolvimento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 0, 30 e 60 DAE, Piracicaba – SP, 2014. T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$). 38

Figura 12 Efeito da interação regime hídrico e silício para comprimento de plantas na fase de máximo desenvolvimento de duas variedades de cana-de-açúcar, aos 60 DAE, Piracicaba – SP, 2014. CC= capacidade de campo. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$). 38

Figura 13 Efeito da variedade no teor relativo de água (A), índice SPAD (B), extravasamento de eletrólitos (C) e conteúdo de clorofila *a* (D) na fase de máximo desenvolvimento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 0, 30 e 60 DAE, Piracicaba – SP, 2014. TRA= teor relativo de água; EE=extravasamento de eletrólitos; Cl *a*= conteúdo de clorofila *a*; T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$)..... 42

Figura 14 Efeito do regime hídrico no potencial de água na folha na antemanhã (A) e teor relativo de água (B), de variedade no conteúdo de clorofila *b* (C) e de silício no teor relativo de água (D) na fase de máximo desenvolvimento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 0, 30 e 60 DAE, Piracicaba – SP, 2014. Ψ_{w5} = potencial de água na folha às 5h da manhã; Cl *b*= conteúdo de clorofila *b*; TRA= teor relativo de água; T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$)..... 43

RESUMO

Embora o setor sucroalcooleiro brasileiro enfrente, atualmente, uma de suas piores crises, a cultura da cana-de-açúcar continua em expansão para novas áreas, inclusive em solos arenosos sujeitos à deficiência hídrica. O silício (Si) é um elemento capaz de minimizar os efeitos do déficit hídrico em várias plantas, mas poucas são as informações sobre seus efeitos em cana-de-açúcar sob déficit hídrico. Assim, o objetivo foi avaliar os efeitos da adubação silicatada em duas variedades de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico em duas épocas (perfilhamento e máximo desenvolvimento). Foram conduzidos dois experimentos em casa-de-vegetação na área experimental da APTA Regional Polo Centro Sul, Piracicaba (SP) em vasos (100 L). O delineamento foi em blocos casualizados em arranjo fatorial triplo 2x2x2 (variedade, silício, regime hídrico) com quatro repetições. Foram estudadas duas variedades de cana-de-açúcar (tolerante - RB867515 e sensível à seca - RB855536), com e sem o fornecimento de Si (600 e 0 kg ha⁻¹) e com e sem restrição hídrica (60% e 100% da umidade na capacidade de campo, respectivamente), condição esta imposta durante o perfilhamento ou no máximo desenvolvimento (três e seis meses após o transplante). As avaliações foram feitas em três períodos: antes da imposição do déficit hídrico e após 30 dias e 60 dias. Foram estudados os efeitos nos atributos morfológicos (comprimento de plantas, número de perfilhamento, folhas totais e verdes) e fisiológicos da planta (índice SPAD, extravasamento de eletrólitos, conteúdo de clorofila *a* e *b*, massa foliar específica, teor relativo de água na folha e potencial de água foliar). O Si favoreceu o desenvolvimento morfológico das plantas, conferindo maior número de folhas totais e perfilhos na fase de perfilhamento e maior número de folhas totais, perfilhos e comprimento de plantas na fase de máximo desenvolvimento para ambas as cultivares. Houve efeito da interação Si e variedades para número de folhas e perfilhos em ambas as fases de desenvolvimento. Na fisiologia das plantas, o Si proporcionou menor extravasamento de eletrólitos sob déficit hídrico e maior massa foliar específica, teor relativo de água foliar, clorofila *a* e *b*, índice SPAD e no potencial de água foliar durante a antemanhã para ambas as cultivares. Foi observado efeito distinto entre as duas fases estudadas, pois durante a fase de máximo desenvolvimento houve efeito do silício apenas no teor relativo de água. Concluiu-se que a adubação silicatada é uma ferramenta no desenvolvimento da cana-de-açúcar em condições de ótimo e restrito regime hídrico,

minimizando seus danos nas plantas, o que poderia contribuir para o incremento na biomassa da planta.

SILICON FERTILIZATION AND THE WATER DEFICIT TOLERANCE IN SUGARCANE

Botucatu, 2015. 60 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: BRENO KENNEDY LIMA BEZERRA

Advisor: MARCELO DE ALMEIDA SILVA

Co-advisor: MÔNICA SARTORI DE CAMARGO

SUMMARY

Although the Brazilian sugar and ethanol industry has been facing one of its worst crises, sugarcane crop has been expanding to new areas, including sandy soils subject to water deficit. Silicon (Si) is an element that can minimize the effects of drought in several plants, but there is little information on its effects on sugarcane subjected to water deficit. Thus, the objective of this study was to evaluate the use of silicon fertilization in two sugarcane cultivars under water deficit during phase (tillering and maximum development). The two experiments were carried out inside a greenhouse at Agency for Agribusiness Technology of São Paulo (APTA), Piracicaba, SP, where were transplanted pre-sprouted seedlings in pots of 100 L. The design was randomized blocks with triple factorial 2x2x2 (variety, silicon and water regime) with four replications. Two varieties of sugarcane (drought tolerant -RB867515 and as sensitive-RB855536), with and without silicon-supplied (600 and 0 kg ha⁻¹) subjected or not to water restriction (60% and 100% humidity of field capacity, respectively) this condition was imposed for 30 and 60 days during the tillering phase or maximum development phase (three and six months after transplanting) were studied. Evaluations were done at three periods: before water deficit and after 30 and 60 days. The effects in biochemical attributes (plant height, number of tillers, total leaves and green leaves) and physiological (SPAD index, electrolyte leakage, chlorophyll *a* and *b* content, specific leaf mass, leaf relative water content and leaf water potential) were studied. Si increased morphological development, by increasing on number of total leaves and tillers during tillering phase and increasing on number of total leaves, tillers and plant height on maximum development phase, on both varieties. There was effect of interaction

Si and varieties on number of total leaves, tillers on both development phases. Regarding plant physiology aspect, Si has provided less electrolyte leakage during water stress and increased of specific leaf mass, leaf relative water content, chlorophyll *a* and *b* content, SPAD index and leaf water potential in predawn on both cultivars. Different effects were observed between two phases, and it was observed there was only Si effect in leaf relative water content at the maximum development phase. It was concluded silicon fertilization is tool to sugarcane development with or without water stress due to minimizing damage in plants and it could provide increase of plant biomass.

Keywords: *Saccharum* spp., silicon fertilization, drought, fitomass, ecophysiology.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar tem grande importância econômica para o Brasil, que é seu maior produtor mundial, com produção estimada de 642,1 milhões de toneladas em pouco mais de 9 milhões de hectares na safra 14/15. Em relação à safra passada, a produção teve queda de cerca de 2,5%, atenuada pelo acréscimo de 2,2% na área plantada no país (CONAB, 2014). Dentre os estados, São Paulo apresenta a maior produtividade, sendo responsável por mais de 52% da área cultivada no país. A colheita é destinada para produção de açúcar e álcool, gerando renda, empregos e energia alternativa na substituição do uso de combustíveis fósseis.

O cultivo da cana-de-açúcar é realizado em vários tipos de solos, sendo utilizados inclusive aqueles de baixa fertilidade, como os arenosos e de textura média. Esses solos representam grande parte das áreas de expansão da cana-de-açúcar no estado de São Paulo e no Centro-Oeste. Um dos principais fatores limitantes para essa cultura, especialmente nesses solos com baixa capacidade de armazenamento de água, é a deficiência hídrica, pois ela pode ocorrer em períodos de alta demanda de água pela planta (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A necessidade hídrica da cana-de-açúcar varia de acordo com a variedade e o estágio fenológico (AUDE, 1993): brotação e estabelecimento, perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação. As fases de perfilhamento e rápido crescimento manifestam maior sensibilidade à deficiência hídrica (RAMESH, 2000), influenciando negativamente a produção de fitomassa e o rendimento de sacarose (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; MACHADO et al., 2009) e podendo reduzir 35% na fitomassa (INMAN-BAMBER, 2004).

Para tolerar o déficit hídrico, os principais mecanismos das plantas são alterações fisiológicas e bioquímicas, cuja maior compreensão tem sido buscada para

cana-de-açúcar nos últimos anos (ASHRAF; FOOLAD, 2007; QUEIROZ et al., 2011). As alterações fisiológicas na cana-de-açúcar, assim como nas plantas em geral, incluem o fechamento parcial dos estômatos, redução da taxa fotossintética, aumento do potencial de água foliar, senescência foliar, diminuição da altura e diâmetro do colmo, aumento do número de perfilho e diminuição do número de folhas novas.

As folhas são os órgãos que absorvem as maiores quantidades de Si, variando seus teores com a variedade (DEREN et al., 1993). Embora o Si não seja considerado um nutriente (EPSTEIN, 1999), pode incrementar a produtividade e a capacidade fotossintética devido à melhoria da arquitetura das folhas (ELAWAD et al., 1982) e a tolerância a estresses bióticos e abióticos (SAVANT et al., 1999; EPSTEIN, 1999).

Baseado nestas informações, esse trabalho testou a hipótese geral de que a aplicação de silício no solo promove maior tolerância ao déficit hídrico em cana-de-açúcar, com efeito nos atributos morfológicos e fisiológicos entre uma variedade tolerante e outra susceptível à deficiência hídrica em função da época de sua ocorrência.

Com os resultados obtidos, espera-se melhor compreensão de quais mecanismos são afetados pelo Si em variedades de cana-de-açúcar tolerantes e, especialmente, em susceptíveis ao déficit hídrico, o que pode ser um dos primeiros passos para sua utilização em áreas da expansão com baixo armazenamento de água e sujeitas a deficiência hídrica, contribuindo, também, para a melhoria do manejo da cultura com maior rentabilidade ao agricultor.

Desta maneira, o objetivo geral foi avaliar os efeitos da adubação silicatada em duas variedades de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico em duas épocas (perfilhamento e máximo desenvolvimento). Como objetivos específicos avaliou-se o efeito do uso de silício no desenvolvimento de plantas de cana-de-açúcar em condições ambientais não restritivas; se o uso de silício altera o metabolismo basal das plantas conferindo maior tolerância ao déficit hídrico; se a duração do déficit altera as respostas obtidas com a aplicação de silício; se há diferença de resposta ao uso de silício entre uma variedade tolerante e uma sensível ao déficit hídrico; se o uso do silício afeta os atributos morfológicos e fisiológicos; e se a época de ocorrência do déficit hídrico altera o efeito do Si na tolerância ao déficit e nas respostas morfológicas e fisiológicas das plantas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A expansão da cana-de-açúcar

O setor sucroalcooleiro enfrenta hoje uma de suas maiores crises, apesar disso a cultura da cana-de-açúcar continua se expandindo para novas áreas de cultivo. Detentor do primeiro lugar na produção mundial, o Brasil estima cerca de 9 milhões de hectares de área colhida para a safra 2014/15, demonstrando acréscimo de 2,2% em relação à safra passada, aumento este que minimizou a queda na produtividade nacional (6,1%) (CONAB, 2014). Dentre os estados, São Paulo apresenta a maior produção e é responsável por mais de 52% da área cultivada.

A produção brasileira é destinada tanto para a produção de açúcar quanto de álcool, gerando renda, empregos e energia. Para a obtenção desta bioenergia, no panorama nacional, faz-se necessário o manejo dos fatores de produção, visando o aumento na produtividade, mediante superação de problemas encontrados nas áreas propensas à expansão (MARQUES; PINTO, 2013). Dentre os vários obstáculos encontrados nestas áreas destacam-se os solos arenosos, em áreas sujeitas a longos períodos de veranicos.

Para atender a demanda nacional, urge a necessidade da obtenção de novas cultivares, tendo em vista que mais de 60% das áreas aptas para a expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil estão em regiões de aptidão mediana (MANZATTO et al., 2009), onde podem ocorrer limitações pedológicas e/ou climáticas, tais como deficiência nutricional e hídrica.

Manzatto et al. (2009), em seu estudo sobre o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar, destacam que metade de toda área apta ao plantio da cana-de-açúcar, cerca de 30 milhões de hectares, está localizada na região centro-oeste do

Brasil, conhecida por seus solos ácidos, em produção agrícola intensiva, semi-intensiva, lavouras especiais (perenes, anuais) e pastagens. Um dos principais fatores limitantes da cana-de-açúcar, especialmente nesses solos com baixa capacidade de armazenamento de água é a deficiência hídrica, pois ela pode ocorrer em períodos de alta demanda de água pela planta (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Uma parte significativa do cerrado está concentrada na região Centro-Oeste, apresentando características climáticas peculiares, como duas estações bem definidas, uma com intensa precipitação e outra estação seca, período marcado por acentuada deficiência hídrica (SANO et al., 2008).

Segundo Lopes (1984), a estacionalidade das chuvas, principal fator causal do déficit hídrico nas regiões de expansão canavieira, pode ocasionar efeitos prejudiciais às plantas se o período de restrição hídrica coincidir com os estádios de maior requerimento hídrico da cultura (GAVA et al., 2010), assim como para as condições técnicas do manejo (SILVA et al., 2012). A compreensão desse fator ambiental é de grande importância para estas áreas, pois a maior parte das cultivares desenvolvidas nos últimos anos no Brasil, não apresenta potencial produtivo para essas condições (OLIVEIRA, 2012).

O déficit hídrico

A água sempre se apresentou como o principal fator da distribuição geográfica da vegetação (SCHULZE, 1986), atuando como o fator limitante mais comum para o desenvolvimento das plantas, embora seja o componente mais abundante na natureza (KRAMER, 1969). No entanto, a capacidade das plantas em detectar e responder efetivamente a condições hídricas restritivas depende dos mecanismos internos de cada planta, mediante sucessivas reações em cadeia. Estes ajustes ocorrem dentro de poucos segundos, minutos ou até mesmo horas (BRAY, 1997), mesmo assim, podem ocasionar problemas ao desenvolvimento e à produção de várias culturas agrícolas (MACHADO et al., 2009).

De acordo com Larcher (2004), um organismo vegetal enfrenta uma sucessão de fases características ao déficit: primeiramente, observa-se uma fase de alarme, caracterizada pela perda de estabilidade das estruturas, como proteínas biomembranas, e de suas funções vitais, como processos bioquímicos e fotossintéticos,

seguindo-se para a fase de resistência, a qual é induzida sob estresse contínuo a adquirir características de rusticidade e ajustamento. O aumento ou persistência do estresse levará à última fase, ou seja, em sua exaustão e colapso prematuro.

A regulação das respostas ao déficit hídrico enfrentado pela planta é reconhecida a partir da perda de água pela célula, desencadeando uma transdução do sinal em nível celular. Desta forma, um estresse ao nível físico pode ser convertido em uma resposta bioquímica, refletindo desta forma na diminuição ou perda de turgor, alteração do volume celular, mudança da atividade da água e alteração na membrana celular (BRAY, 1997).

Segundo Taiz e Zeiger (2004), o déficit hídrico não se limita apenas a regiões áridas e semiáridas, pois mesmo em regiões reconhecidas por apresentar clima úmido, a distribuição irregular das chuvas, em algum período, pode limitar o crescimento das culturas. Desta forma, nas regiões em que são observados períodos de déficit hídrico acentuado, é clara a necessidade de estudos sobre as relações hídricas da cultura, para o conhecimento do quanto esta dada cultura tolera períodos de restrição hídrica, visando novas estratégias de manejo (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

De acordo com Smit e Singels (2006), o déficit hídrico ocasionado pela perda excessiva de água da planta para a atmosfera na forma de vapor é a principal causa de perda econômica e fracasso de colheita em todo o mundo. Isso é perceptível quando a taxa transpiratória é superior à absorção de água e seu transporte para parte aérea. O conhecimento de como os vegetais respondem ao déficit hídrico é de grande importância para a escolha tanto da variedade como de melhores práticas de manejo, sobretudo, para aperfeiçoar a exploração dos recursos naturais, tendo em vista o melhor aproveitamento da água (ROBERTSON et al., 1999). Mesmo onde a irrigação não está disponível, o conhecimento de relações hídricas das culturas pode ajudar em programas de melhoramento em que a tolerância à seca pode ser uma característica importante para a seleção de novas variedades (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Déficit hídrico na cana-de-açúcar

A principal finalidade na produção da cana-de-açúcar é a produção de sacarose visando à fabricação de açúcar e álcool. Para o alcance do mesmo, é fundamental que a cultura tenha um período seco em sua fase de maturação. Em

contrapartida, períodos de seca nas fases de perfilhamento e máximo desenvolvimento, afetarão drasticamente a produção final da cultura (AUDE, 1993), uma vez que a cana-de-açúcar demonstra grande requerimento hídrico nestes períodos, conferindo maior ou menor impacto produtivo conforme a fase fenológica em que enfrenta o déficit (RAMESH, 2000; MACHADO et al., 2009).

Segundo Machado et al. (2009), para reduzir os efeitos deletérios da restrição hídrica, a cana-de-açúcar passa por alterações em seu desenvolvimento morfológico. Mesmo sob estas circunstâncias é observado decréscimo significativo na produção de biomassa. Estudos demonstram que em consequência do déficit hídrico, houve redução de até 35% na biomassa vegetal da cultura, quando ocorrido em período de alta demanda evaporativa (INMAN-BAMBER, 2004). Uma vez que a cultura apresenta variação genotípica quanto à tolerância ao mesmo (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Bray (1997) afirma que a deficiência hídrica presente nos períodos de seca pode afetar negativamente o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas principalmente pela redução da fotossíntese, causada pelo fechamento estomático. No entanto, a capacidade da planta responder e sobreviver a essa deficiência hídrica depende dos mecanismos internos, expressos por respostas celulares da planta. Segundo Inman-Bamber e Smith (2005), a cana-de-açúcar possui mecanismos distintos de respostas à seca, com destaque para o controle estomático, o enrolamento foliar, o tamanho e a distribuição do sistema radicular.

No Brasil, estudos foram realizados visando observar os efeitos do déficit hídrico nas alterações fisiológicas da cana-de-açúcar. Barbosa et al. (2009), ao utilizarem variedades reconhecidas como tolerantes SP79-1011, RB92579 e RB867515, juntamente com sensíveis à seca RB72454, RB855536 e RB855113, sob condições de restrição hídrica, verificaram que a SP79-1011 demonstrou melhor desempenho fisiológico frente às demais, durante déficit hídrico na fase de perfilhamento. Em vaso, Machado et al. (2009) verificaram que IAC94-2094 foi mais tolerante sob deficiência hídrica que IACSP96-2042, independente da fase fenológica, demonstrando maior massa seca do colmo e sólidos solúveis no caldo. Pincelli e Silva (2012), estudando cultivares sob deficiência hídrica em vasos (22 L), verificaram que aos 56 dias, SP81-3250 e SP83-2847 apresentaram maior largura de folhas, maior número de folhas verdes e massa seca, sendo consideradas tolerantes à seca.

Conforme Oliveira et al. (2007), o déficit hídrico afeta tanto o crescimento quanto a estrutura do dossel, caso ocorra na fase inicial da cultura, afetará significativamente o grau de interceptação da radiação e assim nos processos fotossintéticos, interferindo do rendimento final da cultura (SMIT; SINGELS, 2006). O reflexo disso é observado com a redução do tamanho das plantas como um todo, diminuindo a produção de perfilhos; o número, o comprimento e o diâmetro de colmos industrializáveis, a área foliar e o peso dos colmos (ROBERTSON et al., 1999; GONÇALVES, 2008). A tolerância ao déficit hídrico precisa de uma regulação fina de perda de água, a fim de manter uma adequada absorção de CO₂ (COLOM; VAZZANA, 2003).

Segundo Inman-Bamber e Smith (2005), o enrolamento das folhas, a senescência foliar, o fechamento dos estômatos e o sistema radicular profundo são características encontradas em variedades classificadas como tolerantes à seca. Esses mecanismos de tolerância à seca variam em suas intensidades de expressão de acordo com a cultivar. Atualmente estas mudanças em resposta à restrição hídrica são pouco estudadas e utilizadas em programas de melhoramento genético da cana-de-açúcar, fatores fundamentais para locais onde ocorrem períodos de estiagem e menor disponibilidade de água para utilização na irrigação.

Silício na cana-de-açúcar

Uma das alternativas viáveis na redução do dano por déficit hídrico em cana-de-açúcar que vem sendo bastante estudada é o uso do elemento silício, que é requerido em grandes quantidades por essa planta, chegando a apresentar 509 kg ha⁻¹ de Si em uma produtividade de 74 t ha⁻¹ de cana-de-açúcar (ROSS et al., 1974). Mesmo ainda não sendo reconhecido como um nutriente (EPSTEIN, 2009), os solos tropicais e subtropicais, propensos ao intemperismo e sucessivos cultivos, tendem a apresentar baixos níveis de Si trocável (MCKEAGUE; CLINE, 1963). Em contrapartida, trabalhos já demonstraram que o fornecimento do elemento pode incrementar a produtividade e a capacidade fotossintética devido à melhoria da arquitetura das folhas (ELAWAD et al., 1982; RAVEN, 1983) e à tolerância a estresses bióticos e abióticos (SAVANT et al., 1999; EPSTEIN, 2009).

De acordo com McKeague e Cline (1963), o silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre e pode ser encontrado no solo nas formas solúvel ou facilmente aproveitável pelas plantas, constituída primordialmente pelo ácido monossilícico, silício adsorvido ou precipitado com óxidos de Fe, Al e Mn; sílica oriunda da decomposição da matéria orgânica do solo e constituída por formas amorfas (MATICHENKOV; AMMOSOVA, 1996), e silício estrutural em minerais silicatados, compondo cerca de 31% da crosta terrestre (EPSTEIN, 1999). Sendo encontrado geralmente em baixos teores em sua forma prontamente disponível para as plantas, nos solos tropicais e subtropicais esse quadro é agravado pelo manejo intensivo e a monocultura, podendo levar rapidamente ao esgotamento do solo e como consequência, reduzir a sustentabilidade de diversas culturas (KORNDÖRFER et al., 2002).

Uma das principais formas de Si no solo, no tocante à área agrônômica, é o ácido monossilícico (H_4SiO_4), por ser sua forma solúvel passível de ser absorvida pelas plantas. Esta fração varia de 1 a 40 mg de Si L^{-1} (MCKEAGUE; CLINE, 1963) e sua maior parte está na forma não dissociada (RAVEN, 1983) e fracamente adsorvida ao solo, cerca de 95 a 99%, ou seja, de 1 a 5% do Si encontra-se presente na solução do solo (MATICHENKOV et al., 1997).

Dentre os diversos fatores que interferem na solubilidade do Si no solo em condições aeróbicas, o pH é um dos mais estudados (MCKEAGUE; CLINE, 1963). Em contrapartida, o silício no solo é protagonista em diversas reações, como na elevação do pH, fornecimento de Ca e Mg, aumento da disponibilidade de fósforo às plantas e redução dos efeitos tóxicos de Al, Mn e Fe são os principais efeitos do silício nos solos (KORNDÖRFER et al., 2003).

O uso de silício melhora a arquitetura da planta e aumenta a fotossíntese (DEREN et al., 1994), resultado da menor abertura do ângulo foliar, deixando as folhas mais eretas, diminuindo o autossombreamento, mesmo em condições de alta densidade populacional e elevadas doses de nitrogênio (YOSHIDA et al., 1969; BALASTRA et al., 1989). Também aumenta a altura das plantas, consequência de maior comprimento da lâmina foliar (YOSHIDA et al., 1969; TAKAHASHI, 1995; FARIA, 2000), embora tenha sido observada pouca influência no acúmulo de matéria seca (TANAKA; PARK, 1966; LIANG et al., 1994; CARVALHO, 2000).

O silício está presente na cana-de-açúcar em elevadas concentrações, podendo variar desde 0,14% em folhas jovens até 6,7% nos colmos e folhas

velhas. Segundo Korndörfer et al. (1998), os teores de Si nas folhas de cana-de-açúcar podem variar também segundo a variedade, tais como os teores encontrados para as variedades RB72454, SP79-1011 e SP71-6163, que apresentaram 0,76%, 1,04% e 1,14%, respectivamente, demonstrando maior deposição na lâmina foliar do que na bainha (TANAKA; PARK, 1966). Os teores de silício na cana-de-açúcar (palha) são classificados como baixo, quando menor que 17 g kg^{-1} ; médio, entre 17 a 34 g kg^{-1} , e alto, acima de 34 g kg^{-1} (KORNDÖRFER et al., 1999).

O aumento da produtividade em cana-de-açúcar é o principal benefício da aplicação de Si relatado na literatura nos Estados Unidos (AYRES, 1966; FOX et al., 1967; ROSS et al., 1974; ELAWAD et al., 1982) e na Austrália (KINGSTON et al., 2005). No Brasil, os resultados são consistentes em solos arenosos e de textura média. Korndörfer et al. (2002) mostraram aumento de 14 t ha^{-1} na produção em Neossolo Quarzarenico com 4 t ha^{-1} de metassilicato de cálcio. Bittencourt et al. (2003), estudando doses até 5600 kg ha^{-1} de silicato em solo de textura média, obtiveram aumentos de 7% na produção e 11% em açúcar. Brassioli et al. (2009) obtiveram superioridade na produção de colmos da 3ª a 5ª soqueira com silicato, quando comparadas ao uso de calcário.

Apesar de Si não ser um elemento essencial, a produção das plantas tidas como acumuladoras, fazendo parte deste grupo a cana-de-açúcar, poderia ser reduzida devido ao intenso uso do solo e o monocultivo em áreas tropicais úmidas (KORNDÖRFER et al., 2002). Segundo Deren et al. (1994), plantas acumuladoras, quando cultivadas em solos pobres deste elemento, expressam a estreita relação entre seu desenvolvimento e a disponibilidade do mesmo. Uma prova disso foi o observado por Elawad et al. (1982), em condições de campo, onde o comprimento das plantas de cana-de-açúcar apresentou relação quadrática com a dose de Si aplicada.

Embora estudos tenham demonstrado eficiência do silício na produção da cana-de-açúcar, ainda se dispõe de poucos resultados de seu efeito na fisiologia da planta e seu desenvolvimento.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área experimental

Foram conduzidos dois experimentos no ciclo de um ano, em casa-de-vegetação, na área experimental da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios – APTA (Polo Centro Sul), situada no município de Piracicaba – SP, sob coordenadas geográficas 22°41'03.0"S e 47°38'48.6"W. A altitude é de 547 m e o clima local é tropical de altitude Cwa, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger.

3.2. Caracterização das variedades e da matéria-prima utilizada

A escolha das variedades foi baseada em suas características quanto à tolerância, RB867515 (BIDÓIA et al., 2006; BARBOSA et al., 2009; NOGUEIRA et al., 2009), à sensibilidade ao déficit hídrico, RB855536 (BARBOSA et al., 2009; NOGUEIRA et al., 2009) e à representatividade em área cultivada. No censo varietal de 2011 (RIDESA, 2011), a RB867515 era a mais cultivada no estado de São Paulo, e a RB855536, mesmo sendo sensível à seca, era a sétima mais cultivada.

Para obtenção das mudas de cana-de-açúcar foram plantados toletes com uma gema em bandejas plásticas com areia lavada. Após 60 dias foi feito o transplante de duas mudas em cada vaso e a adubação do solo com nitrogênio, fósforo, potássio e micronutrientes, conforme Spironello et al. (1997). Foram utilizados vasos de 100 L, com abertura no fundo, contendo pedra britada coberta com manta para drenagem e solo.

3.3. Caracterização do solo utilizado: análise de textura e química

O solo utilizado foi um Neossolo Quartzarênico. Foram coletadas amostras de solo em área de vegetação natural para evitar efeito de adubações posteriores.

A análise granulométrica mostrou 93% de areia, 5% de argila e 2% de silte, caracterizando um solo de textura arenosa. De acordo com os resultados da análise química para fins de fertilidade, o solo apresentou acidez elevada, baixa saturação de bases (V%), elevado teor de cálcio e baixos teores de magnésio e potássio, conforme Raij et al., 1997 (Tabela 1).

O teor de silício no solo foi de 1 mg kg⁻¹ solúvel em ácido acético (0,5 mol L⁻¹) e 0,9 mg kg⁻¹ Si em CaCl₂ (0,01 mol L⁻¹), conforme Korndörfer et al. (1999). A textura do solo e o valor de Si solúvel justificaram a escolha do solo, considerado responsivo à adubação silicatada, conforme Berthelsen et al. (2001) e Mc Cray e Ji (2012),

Tabela 1. Características químicas do solo utilizado no experimento.

pH	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	T	V	m
CaCl ₂	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³		mmol _c dm ⁻³					%	
4,8	2,0	3,0	0,5	9,0	2,0	0	11	21,8	49	1

3.4. Manutenção da água na capacidade de campo

Para conhecer o potencial de água do solo nos vasos, foram retiradas amostras para determinação da curva de retenção de água pelo método de placa de pressão de Richards (TOPP et al., 1993). Para o manejo da irrigação e controle da tensão de água nos vasos foram instalados tensiômetros de punção em duas profundidades em cada vaso (0-10 e 0-20 cm de profundidade). As leituras do potencial de água foram obtidas a cada 2-3 dias, sendo calculada a lâmina de irrigação para atingir o potencial de água necessário (com ou sem deficiência hídrica). A irrigação foi feita com gotejadores, instalados em cada vaso, controlando-se a vazão com registros, conforme Barbosa (2010).

3.5. Caracterização das condições ambientais durante o experimento

Os valores de temperatura, umidade relativa do ar e radiação incidente, foram obtidos durante todo o período do controle da irrigação (05/03 – 02/10/2014) com o auxílio de um datalogger os dados foram obtidos dentro da casa-de-

vegetação na APTA (Polo Centro Sul) onde os experimentos foram conduzidos (Figura 1 e 2).

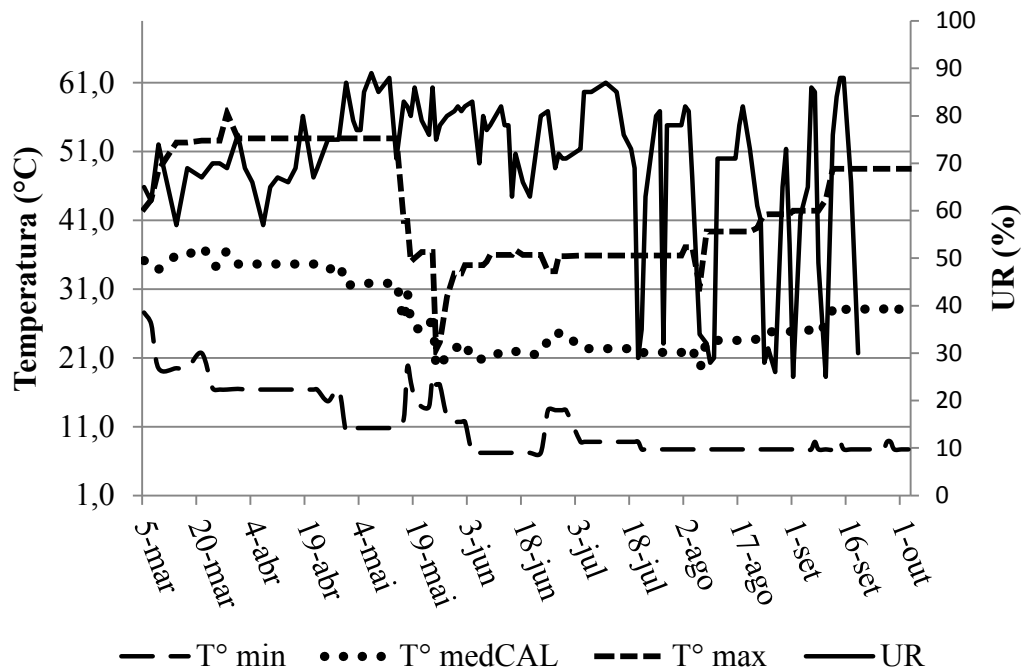


Figura 1. Temperaturas mínima ($T^{\circ} \text{ min}$), média calculada ($T^{\circ} \text{ medCAL}$), máxima ($T^{\circ} \text{ max}$) e umidade relativa do ar (UR) no período de março a outubro de 2014 dentro da casa-de-vegetação onde o efeito da adubação silicatada foi avaliado em plantas de cana-de-açúcar sob déficit hídrico, APTA (Polo Centro Sul), Piracicaba, SP.

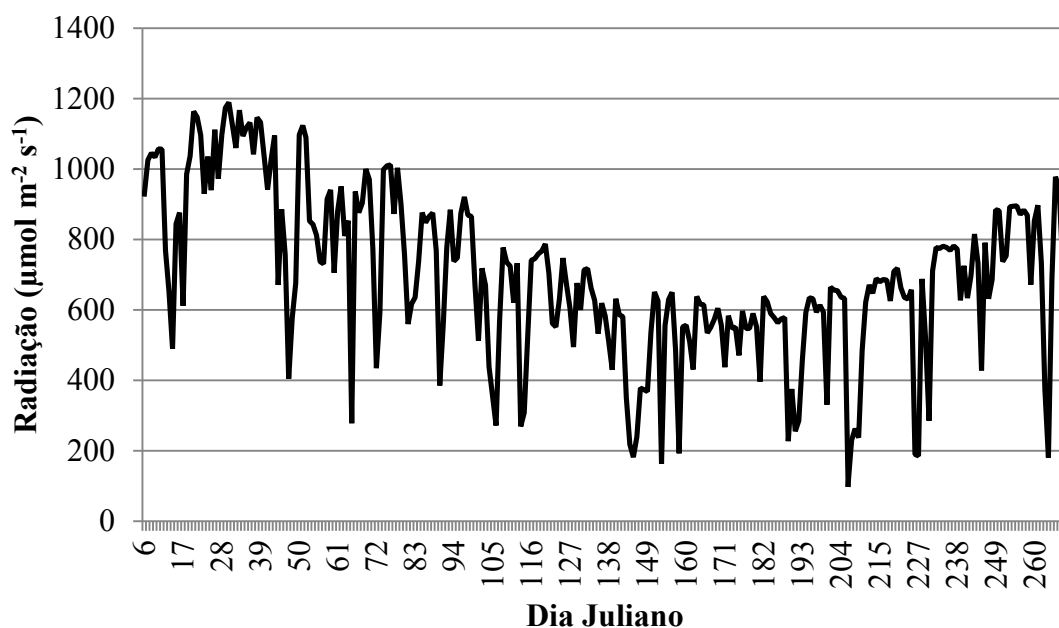


Figura 2. Radiação incidente no período de janeiro a outubro de 2014 dentro da casa-de-vegetação onde o efeito da adubação silicatada foi avaliado em plantas de cana-de-açúcar sob déficit hídrico, APTA (Polo Centro Sul), Piracicaba, SP.

3.6. Delineamento experimental

Foram conduzidos dois experimentos em delineamento experimental foi em blocos casualizados com quatro repetições, com duas variedades (tolerante - RB867515 e sensível à seca - RB855536), sem e com Si (0 e 600 kg ha⁻¹ Si), sem e com deficiência hídrica (100% e 60% da umidade na capacidade de campo - CC, caracterizando um arranjo fatorial triplo 2x2x2 (variedade, silício, regime hídrico). A diferença entre os dois experimentos consistiu na época de imposição do déficit hídrico. No primeiro experimento, o déficit hídrico foi imposto aos três meses após o transplântio das mudas para os vasos (fase de perfilhamento) e no segundo experimento isso ocorreu aos seis meses (fase de máximo crescimento da cultura). Como fonte de Si foi utilizado o silicato de cálcio e magnésio. Todas as parcelas receberam iguais quantidades de Ca e Mg (Tabela 2), sendo os tratamentos balanceados com calcário e cloreto de magnésio (MgCl₂) (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2. Quantidades de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) de diferentes fontes utilizadas no experimento.

Silício	Silicato		Calcário		MgCl ₂	Total fornecido	
	Ca	Mg	Ca	Mg	Mg	Ca	Mg
0	0,00	0,00	1518,82	100,92	165,31	1518,8	266,23
600	1518,82	266,23	0,00	0,00	0,00	1518,8	266,23

Valores em kg ha⁻¹.

Tabela 3. Quantidades de silicato, calcário e cloreto de magnésio utilizadas no experimento.

Silício	Silicato	Calcário	MgCl ₂
0	0,00	4608,07	0,00
600	5535,05	0,00	165,31

Valores em kg ha⁻¹.

3.7. Condução do experimento

5.7.1 Experimento 1

Os efeitos da adubação silicatada na fase de perfilhamento do desenvolvimento da cana-de-açúcar durante o déficit hídrico foram avaliados no período de 60 dias. O déficit hídrico (60%) foi iniciado aos três meses após o transplântio das mudas. O déficit foi induzido pela suspensão da irrigação até atingir 60% da CC e o controle do mesmo foi feito com auxílio de um tensímetro. Após 60 dias do início do déficit de cada experimento, a umidade do solo no tratamento com deficiência hídrica foi repostada para 100%, permanecendo até o final do experimento.

5.7.2 Experimento 2

Os efeitos da adubação silicatada na fase de máximo desenvolvimento da cana-de-açúcar durante o déficit hídrico foram avaliados assim como no experimento I no período de 60 dias. O déficit hídrico (60%) foi iniciado aos seis meses após o transplântio das mudas. A forma de indução, a duração e o controle do déficit ocorreu da mesma forma que no experimento 1.

Essas fases fenológicas foram escolhidas por serem as mais prejudiciais à produção (RAMESH, 2000).

5.8 Avaliações morfológicas e fisiológicas

Em ambas as fases de estudo, os períodos de avaliação foram: 0, 30 e 60 dias após o estresse hídrico (DAE). Na fase de perfilhamento, cujo déficit foi iniciado aos três meses após o transplântio (90 dias), as avaliações fisiológicas e morfológicas foram feitas aos 90, 120 e 150 DAE. Na fase de máximo crescimento, cujo déficit iniciou-se aos seis meses após o transplântio (180 dias), as avaliações foram feitas aos 180, 210 e 240 dias após iniciado o déficit.

A escolha dos períodos das avaliações fisiológicas (0, 30 e 60 dias após o início do déficit) foi feita com base em trabalhos com cana-de-açúcar sob déficit hídrico, tais como Silva et al. (2012), Pincelli e Silva (2012). Estes autores observaram diferenças significativas na fisiologia das plantas entre 28 e 90 dias de déficit hídrico.

5.8.1 Variáveis morfológicas

Em todos os pontos de avaliação, foi medido o comprimento das plantas, do solo até a inserção da folha +1 (Kuijper) com auxílio de trena e contado o número de folhas verdes (folhas com lígula visível e com mais de 50% de área verde) e totais. Antes e após o déficit hídrico, foi feita avaliação do número de perfilhos em cada vaso.

5.8.2 Variáveis fisiológicas

5.8.2.1 Índice SPAD

O índice SPAD foi obtido com auxílio de um clorofilômetro SPAD-502 (Minolta Corp., Ramsey, NJ, EUA). O valor de cada tratamento foi resultante da média de quatro leituras nas folhas +1 das quatro parcelas. O índice SPAD é uma medida indireta para se quantificar a clorofila, mediante emissão de feixe de luz o aparelho quantifica a intensidade do verde, no limbo foliar, correlacionando desta forma com a quantidade de clorofila no tecido foliar.

5.8.2.2 Conteúdo de clorofila

Para a quantificação do conteúdo de clorofila via espectrofotometria, foram coletados dois discos foliares (0,245 cm² cada) da folha +1 de

uma das plantas por vaso, amostrados da lâmina foliar por meio de um furador, excetuando-se a nervura central. Os discos foram acondicionados em frascos com tampa com 2 mL de dimetil-formamida (DMF) e os frascos encobertos com alumínio e preservados em caixa térmica durante 24h, para a extração dos pigmentos fotossintéticos.

Para a quantificação, 1 mL desta solução foi transferida para uma cubeta de quartzo já contendo 1 mL de água deionizada. Após leve agitação, a solução foi submetida a leituras de absorvância nos comprimentos de onda de 647 e 664 nm, que correspondem aos picos de absorção dos pigmentos clorofila *b* e clorofila *a*, respectivamente. Para os cálculos das quantidades de clorofila foram utilizadas as equações de Porra et al. (1989):

$$\text{Chl } a = 12,00 A^{663,8} - 3,11 A^{646,8} \quad (1)$$

$$\text{Chl } b = 20,78 A^{646,8} - 4,88 A^{663,8} \quad (2)$$

5.8.2.3 Teor relativo de água na folha (TRA)

Para esta análise foram coletados dois discos foliares (0,245 cm²) da folha TVD e determinada a massa fresca do tecido (Wf) em balança analítica. Após isso, as amostras foram reidratadas em água deionizada por 24 horas, para a obtenção da massa túrgida (Wt), fazendo-se uso de papel toalha para extrair o excesso de água. A massa seca (Wd) foi obtida após os discos permanecerem em estufa de circulação de ar forçada a 80°C por 48 horas. Os valores de TRA foram obtidos pela equação (1) de Jamaux et al.(1997):

$$\text{TRA} = [(Wf - Wd)(Wt - Wd)^{-1}] \times 100 \quad (3)$$

5.8.2.4 Potencial de água foliar (Ψ_w)

Em cada data de avaliação, o Ψ_w foi obtido em dois horários, durante o período da antemanhã (potencial de água de base) às 05:00h e no período mais quente do dia, entre 12:00 e 14:00h. O Ψ_w foi determinado na extremidade (ponta) da folha TVD, do perfilho primário, com auxílio de uma câmara de pressão Scholander (SoilMoisture Equipment, Santa Bárbara CA, EUA).

5.8.2.5 *Massa foliar específica (MFE)*

Para esta análise, dois discos foliares (0,245 cm²) do limbo da folha TVD foram secos em estufa de circulação de ar forçada a 80°C por 48 horas, para obtenção da massa seca (MS). O valor da MFE foi obtido mediante relação (2):

$$\text{MFE} = \text{MS do disco foliar (g)}/\text{área do disco foliar (cm}^2\text{)}. \quad (4)$$

5.8.2.6 *Extravasamento de eletrólitos (EE)*

Para a avaliação dos danos causados pelo déficit hídrico à integridade das membranas celulares, foi utilizado o método de extravasamento de eletrólitos, que mede a condutividade elétrica de uma solução aquosa contendo amostras foliares. Quanto maior o déficit, maior o dano às membranas, permitindo maior extravasamento de eletrólitos, gerando aumento na condutividade elétrica da solução.

Para as medidas, 10 discos foliares (0,245 cm²) foram coletados e mantidos em tubo plástico com 10 mL de água deionizada, à temperatura de 25° C por 24 horas. Após este período, a condutividade do meio foi determinada (Xi) com o auxílio de um condutivímetro de bancada (TECNOPON, modelo mCA150, Piracicaba, SP, Brasil). Após a avaliação da condutividade elétrica em condições naturais, os tubos com os discos foliares foram incubados em banho-maria a 60°C por 3 horas e a condutividade elétrica do meio foi avaliada novamente (Xf). O extravasamento de eletrólitos foi expresso como a porcentagem da condutividade inicial (Xi) em relação à condutividade final (Xf), de acordo com a equação (3) proposta por Scotti Campos (1997):

$$\text{EE} = (\text{Xi}/\text{Xf}) \times 100. \quad (5)$$

5.9 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, expressando significância, estes foram analisados pelo teste Tukey, considerando o delineamento utilizado em fatorial triplo, com duas doses de silicato, duas variedades, dois regimes de umidade no solo e quatro repetições.

6 RESULTADOS

6.1 Experimento 1: Déficit durante a fase de perfilhamento do desenvolvimento da cultura (três meses após o transplântio)

6.1.1 Avaliações de atributos morfológicos

Antes do início da indução do déficit hídrico, foi observado efeito da variedade no número de perfilhos e número de folhas totais, assim como efeito no número de folhas totais de acordo com a dose de silício. Foi observado, também, efeito da interação variedade e Si para número de perfilhos e número de folhas totais (Tabela 4).

Tabela 4. Comprimento de plantas, número de perfilhos, número de folhas totais e de folhas verdes durante a fase de perfilhamento de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por três meses antes do déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.

Silício(kg ha ⁻¹)	C. Plantas (cm)	NP	NF	NFV
Variedade RB867515				
0	62,1	2,8	9,1	6,4
600	59,2	3,3	9,6	6,8
Variedade RB855536				
0	55,2	3,8	9,6	6,7
600	61,0	3,5	10,6	7,3
Prob>F				
Bloco	0,119	0,073	0,121	0,106
Variedade (V)	0,282	0,003*	0,018*	0,138
Si	0,543	0,550	0,016*	0,089
V x Si	0,072	0,024*	0,037*	0,727

C. Plantas=comprimento de plantas; NP=número de perfilhos; NF=número de folhas totais; NFV=número de folhas verdes. *Significativos a 5% pelo teste F.

Após 30 dias de déficit hídrico, houve efeito do regime hídrico no comprimento de plantas e de variedade em todas variáveis, exceto no número de folhas

verdes. Foi observado efeito no número de perfilhos para as interações variedade e silício e para regime hídrico e Si (Tabela 5).

Tabela 5. Comprimento de plantas, número de perfilhos, número de folhas totais e folhas verdes durante a fase de perfilhamento de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por três meses após 30 dias com e sem déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.

Silício (kg ha ⁻¹)	C. Plantas (cm)	NP	NF	NFV
Variedade RB867515 sem déficit hídrico				
0	89,4	2,4	11,1	2,9
600	91,7	3,3	11,9	2,8
Variedade RB867515 com déficit hídrico				
0	84,8	2,9	12,3	3,0
600	80,4	2,5	11,5	2,4
Variedade RB855536 sem déficit hídrico				
0	84,8	2,9	13,3	2,8
600	80,4	2,5	12,3	2,9
Variedade RB855536 com déficit hídrico				
0	68,4	3,9	12,4	2,6
600	81,3	3,3	14,1	3,4
Prob>F				
Bloco	0,089	0,777	0,953	0,201
Regime hídrico (RH)	0,013*	0,296	0,361	0,883
Variedade (V)	0,004*	0,001*	0,001*	0,467
Si	0,176	0,527	0,693	0,884
RH x V	0,758	0,832	0,895	0,467
RH x Si	0,837	0,011*	0,512	0,884
V x Si	0,087	0,027*	0,693	0,069
RH x Si x V	0,156	0,148	0,083	0,196

C. Plantas=comprimento de plantas; NP=número de perfilhos; NF=número de folhas totais; NFV=número de folhas verdes. *Significativos a 5% pelo teste F.

Após 60 dias de déficit, foi observada a influência do regime hídrico no número de folhas totais e folhas verdes, assim como da variedade em todos os atributos morfológicos estudados, exceto no número de folhas totais (Tabela 6).

Tabela 6. Comprimento de plantas, número de perfilhos, número de folhas totais e de folhas verdes durante a fase de perfilhamento de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício, seguidos por 60 dias com e sem déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.

Silício (kg ha ⁻¹)	C. Plantas (cm)	NP	NF	NFV
Variedade RB867515 sem déficit hídrico				
0	97,5	2,3	16,5	1,4
600	93,0	3,3	16,6	2,0
Variedade RB867515 com déficit hídrico				
0	90,0	2,5	15,3	2,0
600	88,4	2,5	15,0	2,1
Variedade RB855536 sem déficit hídrico				
0	90,0	2,5	15,3	1,1
600	84,4	2,5	15,0	1,5
Variedade RB855536 com déficit hídrico				
0	73,5	3,4	15,8	1,6
600	82,7	3,1	16,1	1,6
Prob>F				
Bloco	0,451	0,064	0,102	0,672
Regime hídrico (RH)	0,055	0,113	0,005*	0,001*
Variedade (V)	0,008*	0,001*	0,134	0,046*
Si	0,585	0,461	0,445	0,982
RH x V	0,785	0,657	0,645	0,849
RH x Si	0,598	0,190	0,540	0,571
V x Si	0,164	0,113	0,361	0,193
RH x Si x V	0,905	0,305	0,878	0,849

C. Plantas=comprimento de plantas; NP=número de perfilhos; NF=número de folhas totais; NFV=número de folhas verdes. *Significativos a 5% pelo teste F.

Aos 30 e 60 DAE, a variedade RB867515 apresentou maior comprimento de plantas que a RB855536 (Figura 3A). Ocorrendo o oposto para número de perfilhos em todos os momentos de observação (Figura 3B). A RB855536 apresentou maior número de folhas totais aos 0 e 30 DAE, ocorrendo o oposto no número de folhas verdes (Figura 3C e D).

O comprimento das plantas foi maior na condição a 100% CC aos 30 DAE (Figura 3E). O número de folhas totais foi afetado negativamente aos 60 DAE (Figura 3F), assim como o número de folhas verdes (Figura 4A).

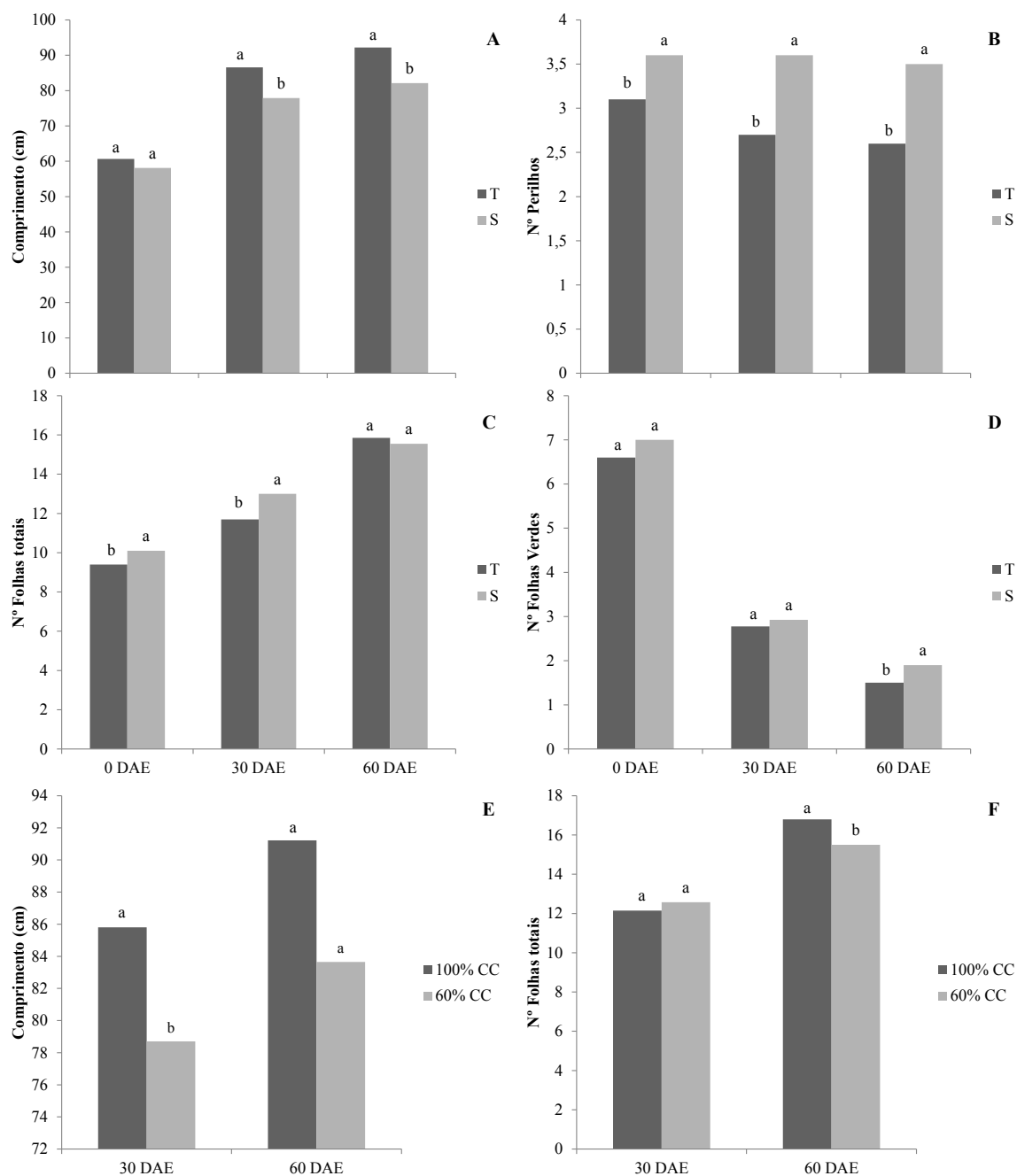


Figura 3 Efeito da variedade no comprimento de plantas (A), número de perfilhos (B), número de folhas totais (C) e número de folhas verdes (D) aos 0, 30 e 60 DAE e do regime hídrico no comprimento de plantas (E) e número de folhas totais (F) aos 30 e 60 DAE na fase de perfilhamento de duas variedades cana-de-açúcar, Piracicaba – SP, 2014. T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Na interação regime hídrico e Si, aos 30 DAE as plantas sem o fornecimento de Si (0 kg) e sob déficit hídrico apresentaram maior número de perfilhos (Figura 4B). No efeito da interação variedade e Si, antes do déficit, a RB867515 na

condição com Si, apresentou incremento no número de perfilhos e de folhas totais (Figura 4C e D). A variedade RB855536 aos 30 DAE apresentou menor número de perfilhos com o fornecimento de Si (Figura 4C).

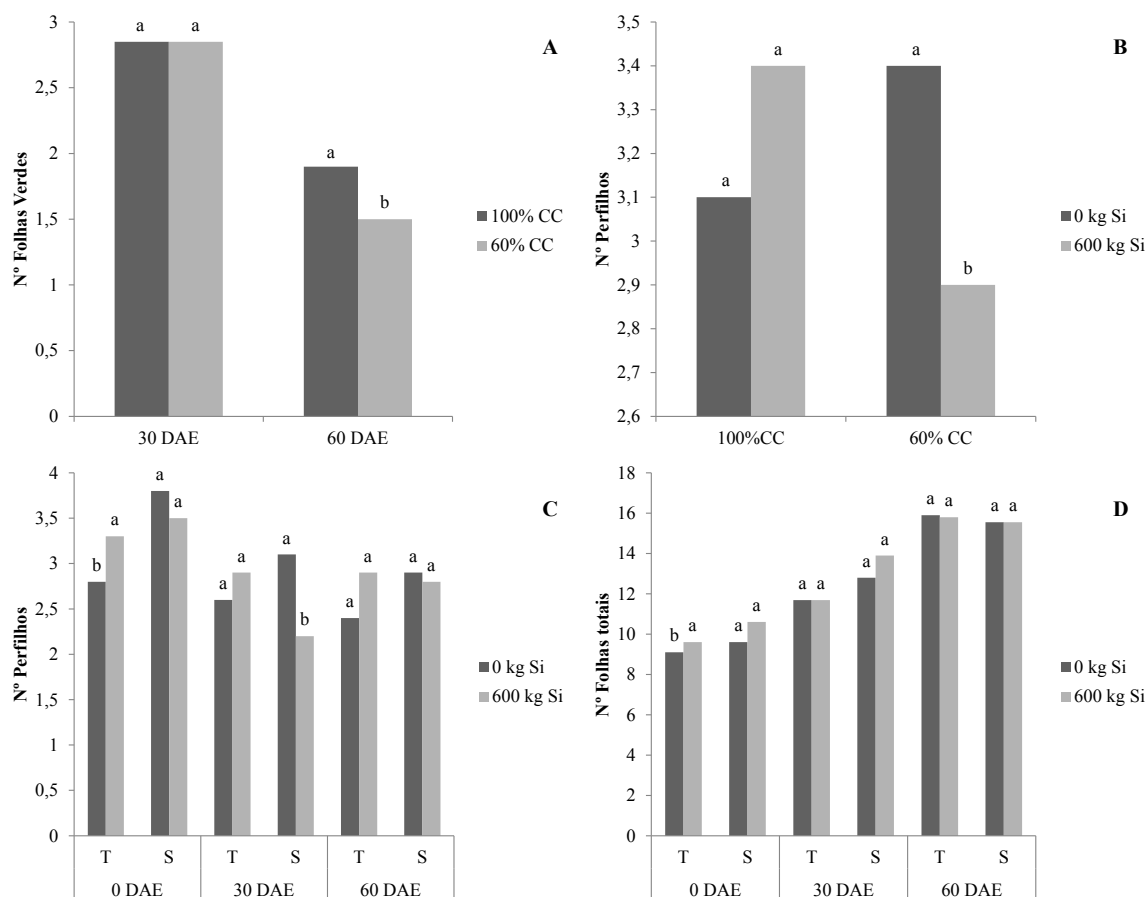


Figura 4 Efeito do regime hídrico no número de folhas verdes (A), da interação regime hídrico e silício no número de perfilhos (B) aos 30 e 60 DAE e da interação variedade e silício no número de perfilhos (C) e número de folhas totais (D) na fase de perfilhamento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 0, 30 e 60 DAE, Piracicaba – SP, 2014. T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

6.7.1 Avaliações de atributos fisiológicos

Antes do início do déficit hídrico, foi observado efeito positivo do silício, conferindo maior índice SPAD, teor de clorofila *b* e menor extravasamento de eletrólitos. Não ocorrendo interação entre variedade e silício (Tabela 7).

Tabela 7. Valores para índice SPAD, teores de clorofila *a* e clorofila *b*, potencial de água medido às 5 (antemanhã) e 12 horas, extravasamento de eletrólitos e massa foliar específica de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por três meses, Piracicaba – SP, 2014.

Silício (kg ha ⁻¹)	SPAD	Cl _a (µg cm ⁻²)	Cl _b	Ψ _{w5} (MPa)	Ψ _{w12}	EE (%)	MFE (gx1000)
Variedade RB867515							
0	38,23	17,70	2,10	-0,07	-0,61	23,85	0,1232
600	43,18	20,58	2,94	-0,06	-0,42	21,00	0,1222
Variedade RB855536							
0	39,70	20,02	2,49	-0,06	-0,45	23,16	0,1221
600	42,99	20,57	2,87	-0,06	-0,43	19,91	0,1222
Prob>F							
Bloco	0,845	0,363	0,894	-0,941	0,186	0,217	0,871
Variedade (V)	0,438	0,236	0,551	0,408	0,376	0,319	0,496
Si	0,001*	0,084	0,031*	0,408	0,265	0,002*	0,332
V x Si	0,313	0,233	0,402	0,250	0,341	0,823	0,426

Cl_a=clorofila *a*; *Cl_b*=clorofila *b*; Ψ_{w5}=potencial de água às 5 horas (antemanhã); Ψ_{w12}=potencial de água às 12 horas; EE=extravasamento de eletrólitos (%); MFE=massa foliar específica. *Significativos a 5% pelo teste F. Médias (quatro repetições) seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Após 30 dias de déficit hídrico, foi observado efeito da variedade no extravasamento de eletrólitos, onde a RB855536, susceptível ao déficit hídrico, apresentou maior extravasamento. Já com relação à adubação com Si, ocorreu efeito conferindo menores valores de extravasamento de eletrólitos e de potencial de água avaliado às 5 horas e maior massa foliar específica. No entanto, não houve interação significativa entre as variáveis (Tabela 8).

Tabela 8. Valores para índice SPAD, teores de clorofila a e clorofila b, potencial de água medido às 5 e 12 horas, extravasamento de eletrólitos e massa foliar específica de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por três meses, seguidos por 30 dias com e sem déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.

Silício (kg ha ⁻¹)	SPAD	Cl _a (µg cm ⁻²)	Cl _b	Ψ _{w5} (MPa)	Ψ _{w12}	EE (%)	MFE (gx1000)
Variedade RB867515 sem déficit hídrico							
0	26,52	10,16	3,76	-0,17	-0,67	29,32	0,1355
600	27,68	9,24	3,80	-0,07	-0,41	27,45	0,1487
Variedade RB867515 sob déficit hídrico							
0	25,67	6,42	2,38	-0,28	-0,77	30,73	0,1326
600	22,37	9,43	2,63	-0,10	-0,67	24,19	0,1426
Variedade RB855536 sem déficit hídrico							
0	27,37	11,21	2,01	-0,11	-0,76	36,85	0,1396
600	27,17	12,54		-0,11	-0,66	35,12	0,1446
Variedade RB855536 sob déficit hídrico							
0	27,20	8,96	1,80	-0,17	-0,91	37,18	0,1399
600	26,83	10,28	2,06	-0,09	-0,90	30,81	0,1375
Prob>F							
Bloco	0,231	0,162	0,668	0,134	0,138	0,840	0,443
Regime hídrico (RH)	0,099	0,060	0,107	0,281	0,111	0,423	0,176
Variedade (V)	0,084	0,051	0,195	0,390	0,135	0,035*	0,829
Si	0,470	0,233	0,432	0,031*	0,311	0,031*	0,030*
RH x V	0,139	0,807	0,695	0,544	0,943	0,943	0,863
RH x Si	0,672	0,886	0,702	0,268	0,603	0,603	0,347
V x Si	0,223	0,322	0,578	0,230	0,588	0,588	0,073
RH x Si x V	0,256	0,318	0,582	0,989	0,865	0,865	0,730

Cl_a=clorofila a; Cl_b=clorofila b; Ψ_{w 5}=potencial de água às 5 horas (antemanhã); Ψ_{w 12}=potencial de água às 12 horas; EE=extravasamento de eletrólitos (%); MFE=massa foliar específica. *Significativos a 5% pelo teste F. Médias (quatro repetições) seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey (p<0,05).

Após 60 dias de déficit hídrico, houve efeito do regime hídrico no teor relativo de água (TRA) e no potencial de água foliar avaliado às 5 horas da antemanhã e efeito da variedade sobre o TRA. Foi observada interação entre regime hídrico e variedade para o teor de clorofila a e para o extravasamento de eletrólitos e interação regime hídrico e silício, nobre o TRA nas plantas (Tabela 9).

Tabela 9. Valores para índice SPAD, teores de clorofila *a* e clorofila *b*, potencial de água medido às 5 e 12 horas, extravasamento de eletrólitos e massa foliar específica de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por três meses, seguidos por 60 dias com e sem déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.

Silício (kg ha ⁻¹)	SPAD	Cl _a (µg cm ⁻²)	Cl _b (µg cm ⁻²)	TRA (%)	Ψ _{w5} (MPa)	Ψ _{w12} (MPa)	EE (%)	MFE (gx1000)
Variedade RB867515 sem déficit hídrico								
0	23,98	10,58	2,96	83,12	-0,20	-1,16	26,42	0,1294
600	22,23	8,72	2,43	89,20	-0,20	-1,07	25,36	0,1426
Variedade RB867515 sob déficit hídrico								
0	23,33	8,31	2,42	87,44	-0,43	-1,18	30,13	0,1243
600	24,25	7,39	2,84	78,87	-0,28	-1,25	24,94	0,1294
Variedade RB855536 sem déficit hídrico								
0	21,20	6,22	3,15	74,15	-0,18	-1,05	30,84	0,1263
600	20,40	7,12	3,93	79,91	-0,15	-1,21	29,78	0,1334
Variedade RB855536 sob déficit hídrico								
0	23,28	8,33	2,18	69,89	-0,46	-1,49	24,69	0,1294
600	25,50	9,84	2,62	70,39	-0,38	-1,25	26,37	0,1243
Prob>F								
Bloco	0,918	0,629	0,307	0,456	0,001*	0,355	0,207	0,624
Regime hídrico (RH)	0,109	0,618	0,204	0,026*	0,015*	0,065	0,296	0,109
Variedade (V)	0,515	0,161	0,514	0,001*	0,849	0,328	0,419	0,414
Si	0,908	0,877	0,551	0,653	0,412	0,778	0,348	0,179
RH x V	0,271	0,002*	0,255	0,359	0,506	0,449	0,039*	0,414
RH x Si	0,278	0,528	0,739	0,025*	0,506	0,500	0,813	0,179
V x Si	0,666	0,051	0,479	0,303	0,874	0,878	0,254	0,279
RH x Si x V	0,946	0,889	0,489	0,270	0,751	0,130	0,254	0,784

Cl_a=clorofila *a*; Cl_b=clorofila *b*; Ψ_{w5}=potencial de água às 5 horas (antemanhã); Ψ_{w12}=potencial de água às 12 horas; EE=extravasamento de eletrólitos (%); MFE=massa foliar específica. *Significativos a 5% pelo teste F. Médias (quatro repetições) seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

O uso do Si apresentou efeito positivo proporcionando incremento no índice SPAD e clorofila *b* antes da indução do estresse (Figura 5A e B). Assim como conferindo menor extravasamento de eletrólitos aos 0 e 30 DAE. (Figura 5C). Aos 30 DAE as plantas supridas com Si apresentaram maior potencial de água na folha na antemanhã (Figura 5D) e maior massa foliar específica (Figura 5E). Além disso, a variedade tolerante à deficiência hídrica RB867515, apresentou maior TRA (Figura 5F).

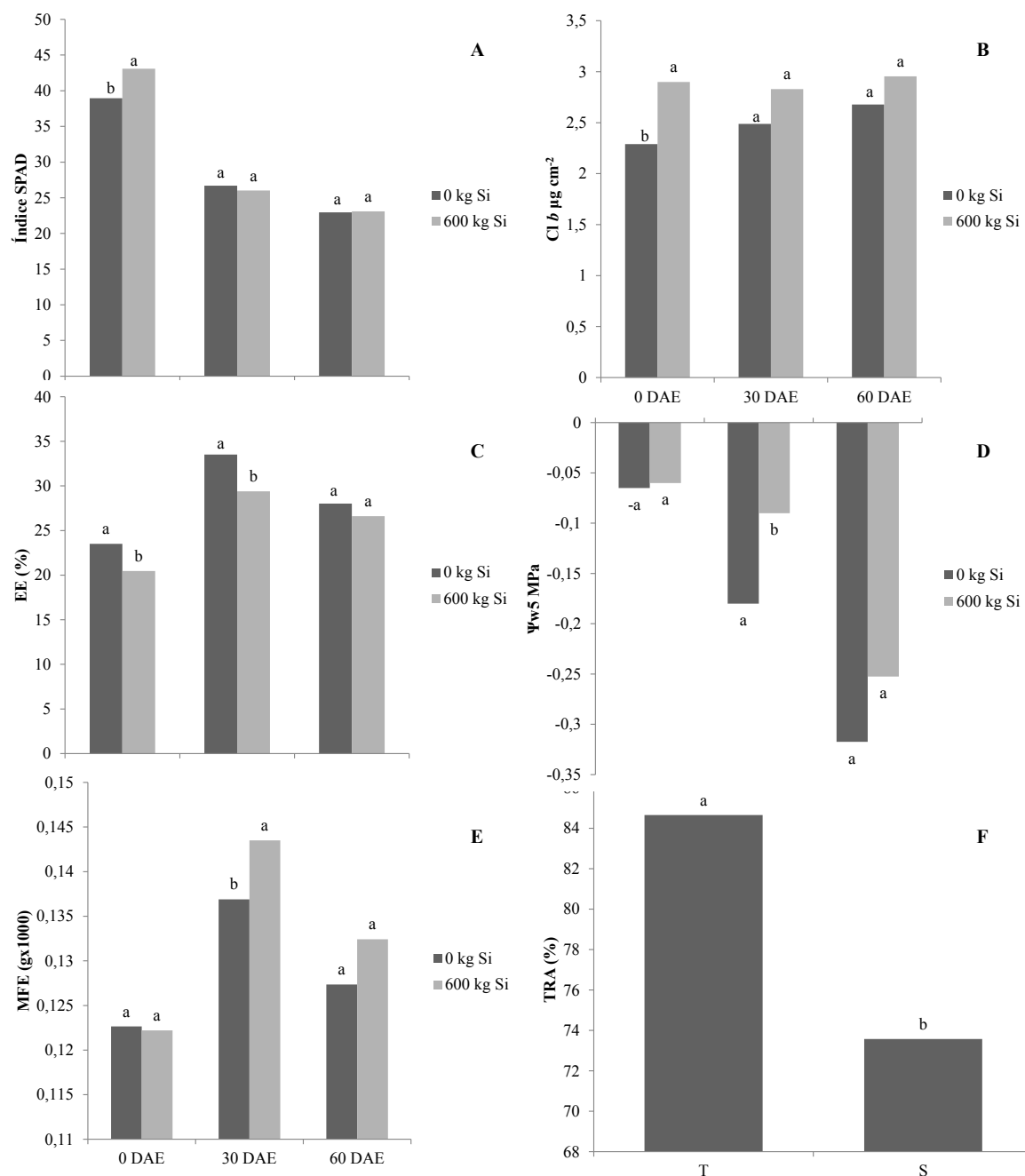


Figura 5 Efeito do silício no índice SPAD (A), conteúdo de clorofila b (B), extravasamento de eletrólitos (C), potencial de água na folha (D) e massa foliar específica (E) na fase de perfilhamento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 0, 30 e 60 dias após o estresse e da variedade no teor relativo de água (F) aos 60 dias após o estresse, Piracicaba – SP, 2014. Cl b= conteúdo de clorofila b; EE=extravasamento de eletrólitos; Ψw5=potencial de água na folha na antemanhã; MFE= massa foliar específica; T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (p<0,05).

Aos 30 DAE, a variedade RB855536 apresentou maior extravasamento de eletrólitos (Figura 6A). Foi observado efeito do regime hídrico e silício,

no potencial hídrico durante a antemanhã, tanto aos 30 como 60 DAE, na condição a 100%CC (Figura 6B).

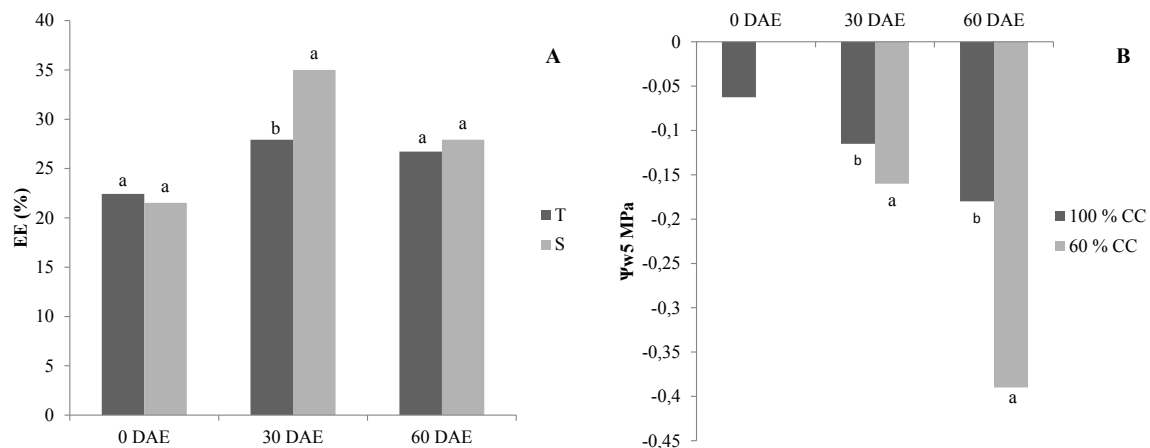


Figura 6 Efeito da variedade no extravasamento de eletrólitos (A) e do regime hídrico no potencial de água na folha (B) aos 0, 30 e 60 DAE na fase de perfilhamento de duas variedades cana-deaçúcar, Piracicaba – SP, 2014. EE= extravasamento de eletrólitos; Ψ_{w5} =potencial de água na folha na antemanhã; T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Após 60 DAE, houve efeito da interação entre regime hídrico e variedade, e foi observado menor extravasamento de eletrólitos na RB867515 a 100% CC, não se repetindo na condição de estresse. Corroborando com o maior conteúdo de clorofila *a* observado na RB867515 (Figura 7A e B). Também foi observado efeito na interação regime hídrico e silício, onde as plantas que receberam silício, na condição a 100%CC aos 60 DAE possuíam maior TRA (Figura 8)

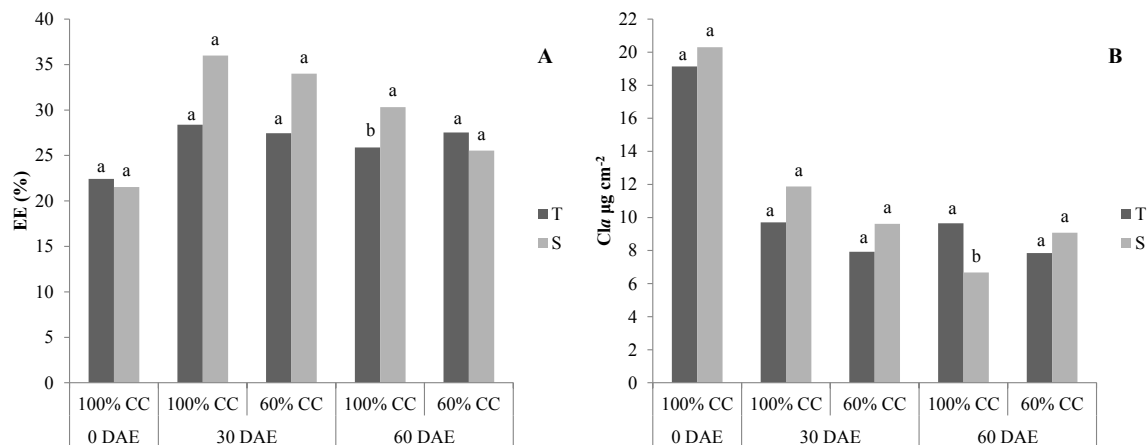


Figura 7 Efeito da interação regime hídrico e variedades para o extravasamento de eletrólitos (A) e conteúdo de clorofila *a* (B) na fase de perfilhamento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 0, 30 e 60 dias após o estresse, Piracicaba – SP, 2014. EE= extravasamento de eletrólitos; Cl *a*=conteúdo de clorofila *a*; T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p<0,05$).

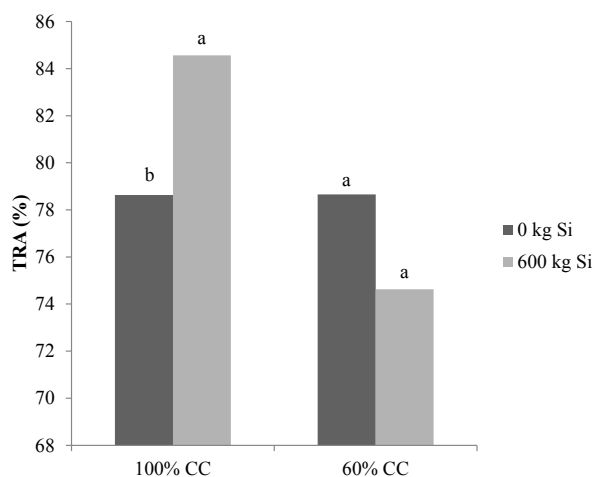


Figura 8 Efeito da interação regime hídrico e silício no teor relativo de água na fase de perfilhamento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 60 dias após o estresse, Piracicaba – SP, 2014. TRA= teor relativo de água; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p<0,05$).

6.8 Experimento 2: Déficit durante a fase de máximo desenvolvimento da cultura (seis meses após o transplântio)

6.8.1 Avaliações de atributos morfológicos

Neste segundo experimento, as plantas foram submetidas ao déficit hídrico na fase de máximo desenvolvimento, ou seja, após seis meses do transplântio para os vasos. As análises realizadas aos 0 DAE demonstraram que já apresentava efeito da variedade sobre o comprimento de plantas e número de perfilhos. Também ocorreu efeito do Si no comprimento de plantas e no número de folhas (Tabela 10).

Tabela 10. Comprimento de plantas, número de perfilhos, número de folhas totais e de folhas verdes de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por seis meses, Piracicaba – SP, 2014.

Silício (kg ha ⁻¹)	C. Plantas (cm)	NP	NF	NFV
Variedade RB867515				
0	96,31	2,25	15,31	5,06
600	101,44	2,81	16,50	5,31
Variedade RB855536				
0	83,50	3,44	15,69	5,00
600	93,88	3,63	17,25	5,25
Prob>F				
Bloco	0,561	0,815	0,102	0,449
Variedade (V)	0,010*	0,001*	0,322	0,831
Si	0,045*	0,124	0,020*	0,398
V x Si	0,484	0,434	0,739	0,987

C. Plantas=comprimento de plantas; NP=número de perfilhos; NF=número de folhas totais; NFV=número de folhas verdes. *Significativos a 5% pelo teste F.

Aos 30 DAE, houve efeito negativo do regime hídrico no número de perfilhos, de folhas totais e folhas verdes. A variedade afetou no número de perfilhos, folhas totais e folhas verdes e o uso do Si proporcionou incremento no comprimento de plantas e no número de folhas totais. Também foi observada interação entre variedade e silício para o número de perfilhos e número de folhas (Tabela 11).

Tabela 11. Comprimento de plantas, número de perfilhos, número de folhas totais e de folhas verdes de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por seis meses, seguidos por 30 dias com e sem déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.

Silício (kg ha ⁻¹)	C. Plantas (cm)	NP	NF	NFV
Variedade RB867515 sem déficit hídrico				
0	103,88	1,50	19,13	0,63
600	100,00	2,63	18,50	0,88
Variedade RB867515 com déficit hídrico				
0	96,67	1,17	17,17	0,33
600	115,00	0,75	17,75	0,25
Variedade RB855536 sem déficit hídrico				
0	86,00	3,13	18,38	1,13
600	94,13	2,63	20,88	1,63
Variedade RB855536 com déficit hídrico				
0	86,75	2,63	17,50	0,13
600	103,75	1,75	19,75	1,13
Prob>F				
Bloco	0,829	0,102	0,105	0,892
Regime hídrico (RH)	0,279	0,002*	0,014*	0,006*
Variedade (V)	0,009*	0,005*	0,035*	0,027*
Si	0,022*	0,512	0,014*	0,045
RH x V	0,897	0,414	0,693	0,479
RH x Si	0,067	0,068	0,593	0,837
V x Si	0,529	0,048*	0,013*	0,113
RH x Si x V	0,394	0,255	0,419	0,314

C. Plantas=comprimento de plantas; NP=número de perfilhos; NF=número de folhas totais; NFV=número de folhas verdes. *Significativos a 5% pelo teste F.

Aos 60 DAE, foi observado efeito do regime hídrico no número de perfilhos e de folhas verdes. Houve efeito da variedade para todos os atributos morfológicos estudados e efeito do Si no número de folhas totais e folhas verdes. A interação variedade e silício demonstrou efeito para número de perfilhos e de folhas totais (Tabela 12).

Tabela 12. Comprimento de planta, número de perfilhos, número de folhas totais e de folhas verdes de duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem silício por seis meses, seguidos por 60 dias com e sem déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.

Silício (kg ha ⁻¹)	C. Plantas (cm)	NP	NF	NFV
Variedade RB867515 sem déficit hídrico				
0	108,38	1,13	15,75	1,75
600	97,77	2,50	17,25	2,88
Variedade RB867515 com déficit hídrico				
0	99,83	1,17	15,17	1,17
600	115,88	0,75	16,00	1,75
Variedade RB855536 sem déficit hídrico				
0	90,63	3,00	16,75	2,88
600	97,50	2,25	17,38	2,75
Variedade RB855536 com déficit hídrico				
0	88,25	2,63	17,00	1,75
600	106,13	1,88	18,25	2,25
Prob>F				
Bloco	0,309	0,089	0,891	0,231
Regime hídrico (RH)	0,309	0,039*	0,729	0,003*
Variedade (V)	0,016*	0,001*	0,017*	0,048*
Si	0,057	0,634	0,048*	0,048*
RH x V	0,833	0,404	0,156	0,935
RH x Si	0,021*	0,125	0,983	0,935
V x Si	0,216	0,014*	0,042*	0,196
RH x Si x V	0,314	0,125	0,528	0,258

C. Plantas=comprimento de plantas; NP=número de perfilhos; NF=número de folhas totais; NFV=número de folhas verdes. *Significativos a 5% pelo teste F.

Durante a fase de máximo desenvolvimento, em todos os períodos de análises foi observado efeito de variedade, onde as plantas da RB857515 sempre apresentaram maior comprimento de plantas (Figura 9A) e em contrapartida as da RB855536 apresentaram maior número de perfilhos (Figura 9B). Aos 30 e 60 DAE as plantas da RB855536 apresentaram maior número de folhas e folhas verdes que as da RB867515 (Figura 9C e D).

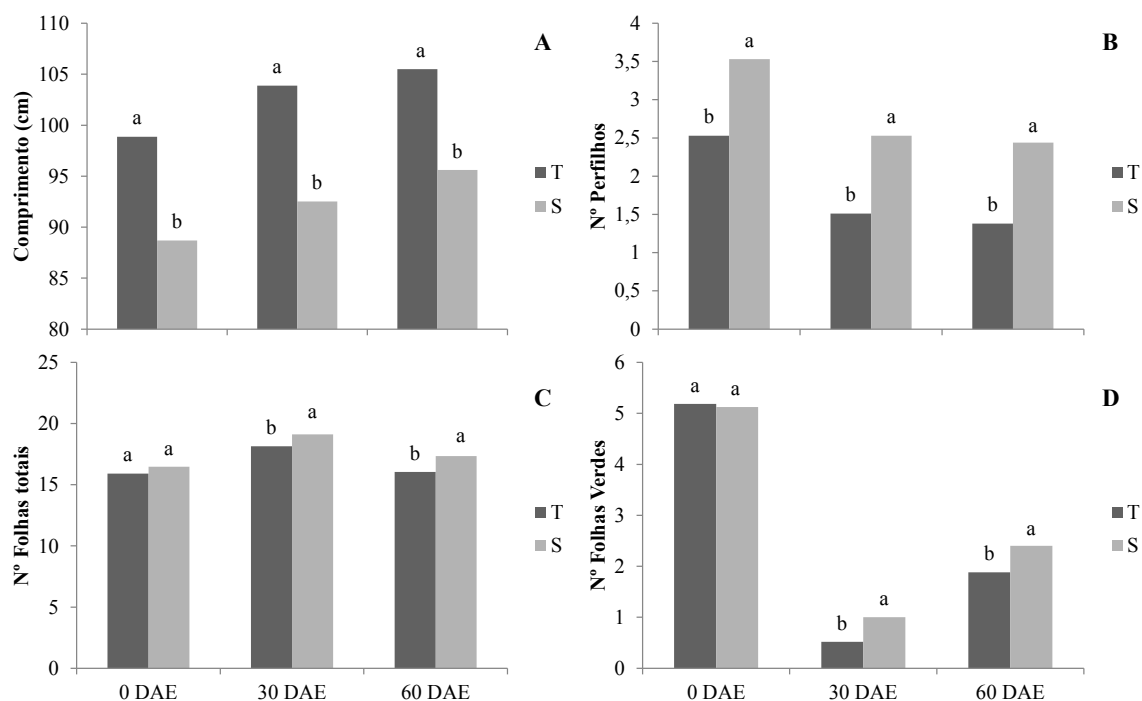


Figura 9 Efeito da variedade no comprimento de plantas (A), número de perfilhos (B), número de folhas totais (C) e número de folhas verdes (D) aos 0, 30 e 60 DAE na fase de máximo desenvolvimento de duas variedades cana-de-açúcar, Piracicaba – SP, 2014. T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

A aplicação de Si proporcionou maior comprimento de plantas e número de folhas totais em todos os períodos de avaliação (Figura 9A e B) e no maior número de folhas verdes aos 60 DAE (Figura 9C). O efeito do regime hídrico foi significativo para o número de folhas totais apenas aos 30 DAE apresentando melhor desempenho nas plantas a 100% CC (Figura 9D). Os atributos morfológicos número de perfilhos e número de folhas verdes foram afetados negativamente tanto aos 30 quanto aos 60 DAE (Figura 9E e F).

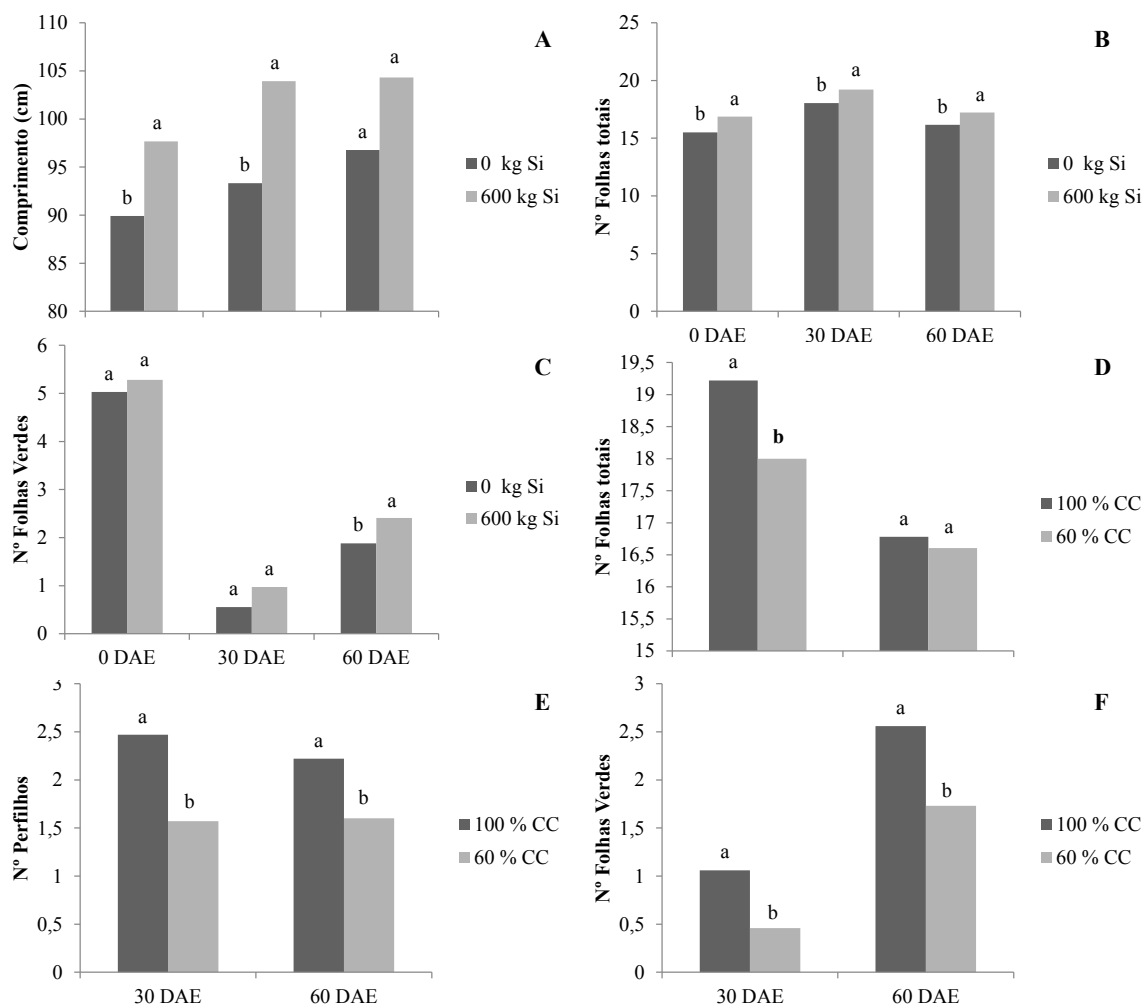


Figura 10 Efeito do silício no comprimento de plantas (A), número de folhas totais (B) e número de folhas verdes (C) aos 0, 30 e 60 DAE, e do regime hídrico no número de folhas totais (D), número de perfilhos (E) e número de folhas verdes (F) aos 30 e 60 DAE na fase máximo desenvolvimento de duas variedades cana-de-açúcar, Piracicaba – SP, 2014. T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; CC= capacidade de campo; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

No efeito da interação variedade e silício, foi observado que a aplicação de Si proporcionou aumento no número de perfilhos da variedade RB867515 aos 30 DAE, efeito contrário foi observado no número de perfilhos da RB855536 aos 60 DAE (Figura 9A). Já para o número de folhas, foi observado incremento neste atributo morfológico nas plantas da variedade RB855536 tanto aos 30 como aos 60 DAE (Figura 9B).

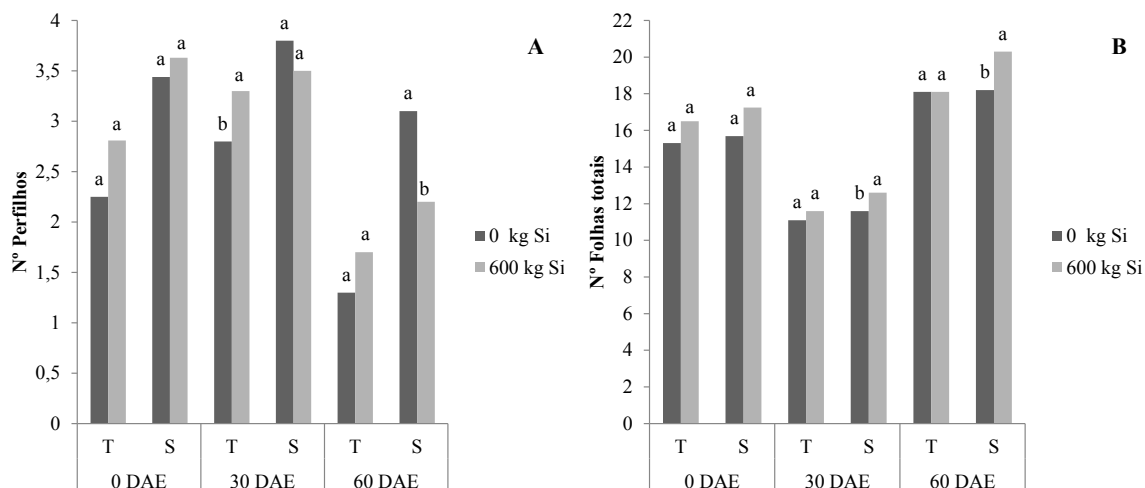


Figura 11 Efeito da interação variedade e silício para número de perfilhos (A) e de folhas totais (B) na fase de máximo desenvolvimento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 0, 30 e 60 DAE, Piracicaba – SP, 2014. T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Aos 60 DAE houve efeito da interação regime hídrico e silício, proporcionando mesmo na condição a 60% CC plantas de maior comprimento, quando comparadas as plantas sem o fornecimento do elemento em mesma condição hídrica (Figura 12).

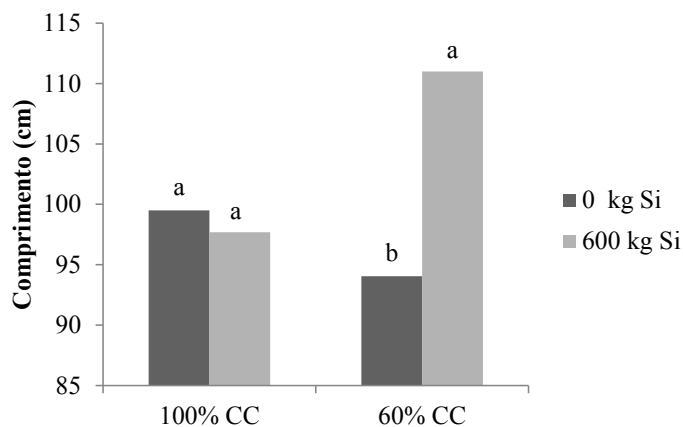


Figura 12 Efeito da interação regime hídrico e silício para comprimento de plantas na fase de máximo desenvolvimento de duas variedades de cana-de-açúcar, aos 60 DAE, Piracicaba – SP, 2014. CC= capacidade de campo. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

6.8.2 Avaliações de atributos fisiológicos

Antes do início do déficit hídrico durante a fase de máximo desenvolvimento das plantas, foi observado apenas efeito da variedade no teor relativo de água, (Tabela 13).

Tabela 13. Valores para índice SPAD, teores de clorofila *a* e clorofila *b*, potencial de água medido às 5 e 12 horas, extravasamento de eletrólitos e massa foliar específica de plantas de cana-de-açúcar de duas variedades, seis meses após o transplântio, Piracicaba – SP, 2014.

Silício (kg ha ⁻¹)	SPAD	Cl _a (µg cm ⁻²)	Cl _b	TRA (%)	Ψ _{w5} (MPa)	Ψ _{w12}	EE (%)	MFE (gx1000)
RB867515								
0	22,65	7,82	2,41	82,50	-0,17	-0,91	28,96	0,1360
600	22,35	8,29	2,41	86,38	-0,17	-1,11	27,69	0,1396
RB855536								
0	23,03	7,78	3,29	79,68	-0,16	-0,97	29,35	0,1314
600	22,79	7,32	3,38	80,42	-0,13	-1,06	27,95	0,1329
Prob>F								
Bloco	0,947	0,967	0,715	0,100	0,102	0,487	0,996	0,527
Variedade (V)	0,738	0,562	0,126	0,031*	0,339	0,965	0,811	0,146
Si	0,825	0,988	0,868	0,241	0,630	0,166	0,329	0,507
V x Si	0,979	0,595	0,985	0,421	0,564	0,591	0,959	0,789

Cl_a=clorofila *a*; *Cl_b*=clorofila *b*; Ψ_{w5}=potencial de água às 5 horas (antemanhã); Ψ_{w12}=potencial de água às 12 horas; EE=extravasamento de eletrólitos (%); MFE=massa foliar específica. *Significativos a 5% pelo teste F.

Aos 30 DAE, foi observado efeito positivo da aplicação de Si, assim como do regime hídrico a 100% CC sobre o atributo fisiológico TRA. A restrição hídrica afetou no potencial de água da folha medido às 5 horas da antemanhã. Além disso, houve efeito da variedade sobre o extravasamento de eletrólitos. Não ocorrendo interações (Tabela 14).

Tabela 14. Valores para índice SPAD, teores de clorofila *a* e clorofila *b*, potencial de água medido às 5 e 12 horas, extravasamento de eletrólitos e massa foliar específica de plantas de cana-de-açúcar de duas variedades cultivadas por seis meses, seguidos por 30 dias de déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.

Silício (kg ha ⁻¹)	SPAD	Cl _a (µg cm ⁻²)	Cl _b	TRA (%)	Ψ _{w5} (MPa)	Ψ _{w12}	EE (%)	MFE (gx1000)
Variedade RB867515 sem déficit hídrico								
0	24,60	10,20	2,77	70,48	-0,10	-1,43	29,12	0,1579
600	25,53	9,90	2,32	68,73	-0,11	-1,27	26,24	0,1497
Variedade RB867515 com déficit hídrico								
0	27,60	9,72	2,79	66,40	-0,09	-1,24	30,60	0,1589
600	25,50	11,67	2,86	75,11	-0,08	-1,34	28,99	0,1620
Variedade RB855536 sem déficit hídrico								
0	29,47	9,36	3,30	42,86	-0,71	-1,59	25,42	0,1467
600	30,13	9,79	3,15	71,12	-0,24	-1,45	25,54	0,1518
Variedade RB855536 com déficit hídrico								
0	28,48	10,84	3,18	67,76	-0,16	-1,19	30,10	0,1446
600	24,53	11,17	2,98	69,92	-0,31	-1,52	28,72	0,1171
Prob>F								
Bloco	0,998	0,426	0,415	0,931	0,525	0,368	0,134	0,135
Regime hídrico (RH)	0,127	0,923	0,075	0,048*	0,003*	0,183	0,230	0,104
Variedade (V)	0,546	0,241	0,792	0,076	0,130	0,226	0,008*	0,567
Si	0,458	0,490	0,476	0,013*	0,323	0,720	0,183	0,502
RH x V	0,119	0,654	0,413	0,139	0,189	0,542	0,394	0,228
RH x Si	0,722	0,799	0,978	0,107	0,338	0,489	0,448	0,671
V x Si	0,209	0,539	0,639	0,275	0,077	0,050	0,959	0,601
RH x V x Si	0,792	0,503	0,590	0,115	0,057	0,561	0,515	0,289

Cl_a=clorofila *a*; Cl_b=clorofila *b*; Ψ_{w5}=potencial de água às 5 horas (antemanhã); Ψ_{w12}=potencial de água às 12 horas; EE=extravasamento de eletrólitos (%); MFE=massa foliar específica. *Significativos a 5% pelo teste F.

Após 60 dias de déficit hídrico, houve efeito do regime hídrico sobre o potencial de água na folha na antemanhã. Foi observado efeito da variedade sobre as variáveis índice SPAD, conteúdo de clorofila *a* e *b* e extravasamento de eletrólitos (Tabela 15).

Tabela 15. Valores para índice SPAD, teores de clorofila *a* e clorofila *b*, potencial de água medido as 5 e 12 horas, extravasamento de eletrólitos e massa foliar específica de plantas de cana-de-açúcar de duas variedades cultivadas por seis meses, seguidos por 60 dias de déficit hídrico, Piracicaba – SP, 2014.

Silício (kg ha ⁻¹)	SPAD	Cl _a (µg cm ⁻²)	Cl _b	TRA (%)	Ψ _{w5} (MPa)	Ψ _{w12}	EE (%)	MFE (gx1000)
Variedade RB867515 sem déficit hídrico								
0	33,20	13,59	4,23	82,88	-0,14	-1,35	28,61	0,1345
600	34,65	13,22	3,96	82,86	-0,09	-1,07	30,21	0,1406
Variedade RB867515 sob déficit hídrico								
0	30,68	10,00	3,27	79,56	-0,25	-1,10	26,70	0,0845
600	25,40	11,06	3,73	75,65	-0,29	-1,63	27,46	0,1110
Variedade RB855536 sem déficit hídrico								
0	37,05	15,72	5,03	76,81	-0,09	-1,42	32,57	0,1284
600	33,03	11,86	3,82	81,36	-0,09	-1,00	32,18	0,1284
Variedade RB855536 sob déficit hídrico								
0	37,15	16,97	5,69	84,83	-0,22	-1,71	35,44	0,1202
600	36,68	14,41	4,34	80,63	-0,19	-1,13	34,09	0,1222
Prob>F								
Bloco	0,9733	0,5088	0,6807	0,9137	0,0745	0,3127	0,4101	0,0951
Regime hídrico (RH)	0,119	0,706	0,927	0,5735	0,0001*	0,2744	0,9896	0,6105
Variedade (V)	0,0005*	0,0378*	0,0307*	0,6428	0,0912	0,8854	0,0152*	0,4720
Si	0,1070	0,2660	0,2231	0,5355	0,6506	0,2619	0,4410	0,5956
RH x V	0,0547	0,0770	0,1387	0,0646	0,3808	0,8735	0,2569	0,7994
RH x Si	0,5287	0,5946	0,6358	0,0362	0,5519	0,3220	0,8277	0,1855
V x Si	0,8930	0,1703	0,1409	0,4580	0,8762	0,0667	0,6204	0,5115
RH x Si x V	0,5498	0,9796	0,6817	0,4018	0,2305	0,1524	0,9891	0,1080

Cl_a=clorofila *a*; Cl_b=clorofila *b*; Ψ_{w5}=potencial de água às 5 horas (antemanhã); Ψ_{w12}=potencial de água às 12 horas; EE=extravasamento de eletrólitos (%); MFE=massa foliar específica. *Significativos a 5% pelo teste F.

As plantas da variedade RB867515 apresentaram maior TRA antes da imposição do estresse (Figura 13A). Aos 60 DAE a RB855536 apresentou maior índice SPAD, Cl *a*, o EE também foi superior para esta variedade aos 30 e 60 DAE (Figura 13B, C e D).

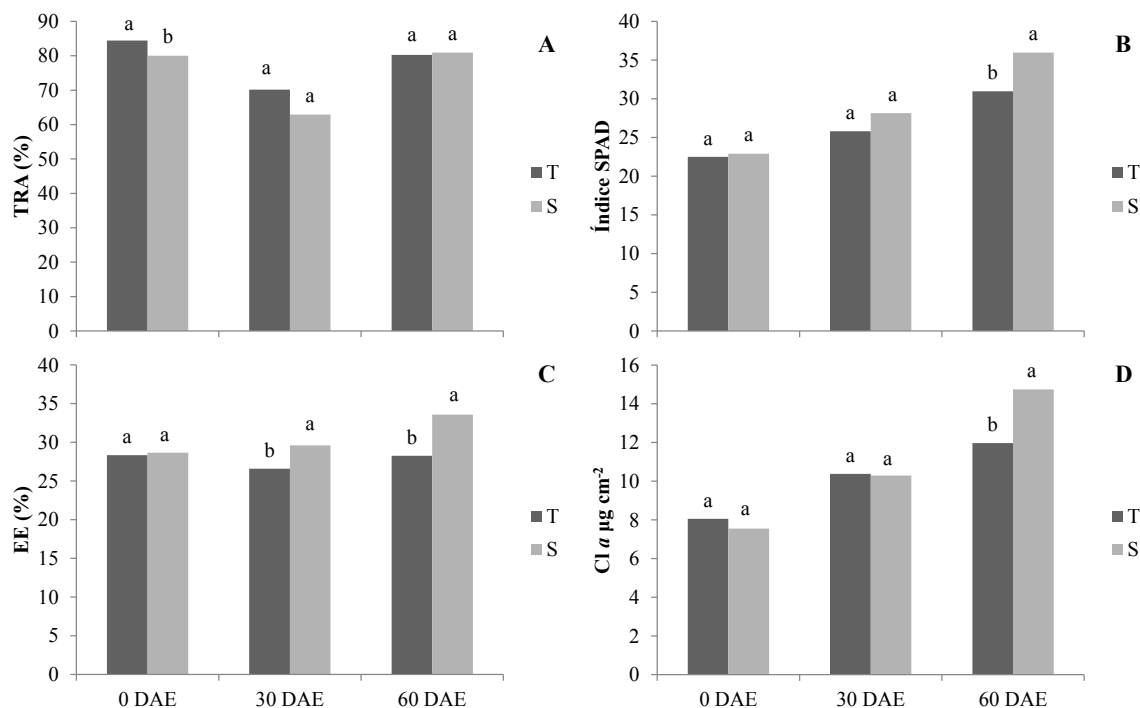


Figura 13 Efeito da variedade no teor relativo de água (A), índice SPAD (B), extravasamento de eletrólitos (C) e conteúdo de clorofila *a* (D) na fase de máximo desenvolvimento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 0, 30 e 60 DAE, Piracicaba – SP, 2014. TRA= teor relativo de água; EE=extravasamento de eletrólitos; Cl *a*= conteúdo de clorofila *a*; T=tolerante-RB867515; S=sensível-RB855536; DAE= dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Durante ambos os períodos de estresse na fase de máximo desenvolvimento foi observado efeito positivo de regime hídrico no potencial de água na folha na condição a 100% CC avaliada na antemãhã, corroborando com o resultado apresentado pelas plantas no maior TRA aos 30 DAE a 100% CC (Figura 14A e B). Aos 60 DAE variedade RB855536 apresentou maior conteúdo de clorofila *b* (Figura 14C). As plantas supridas com Si apresentaram maior TRA aos 30 DAE (Figura 14D).

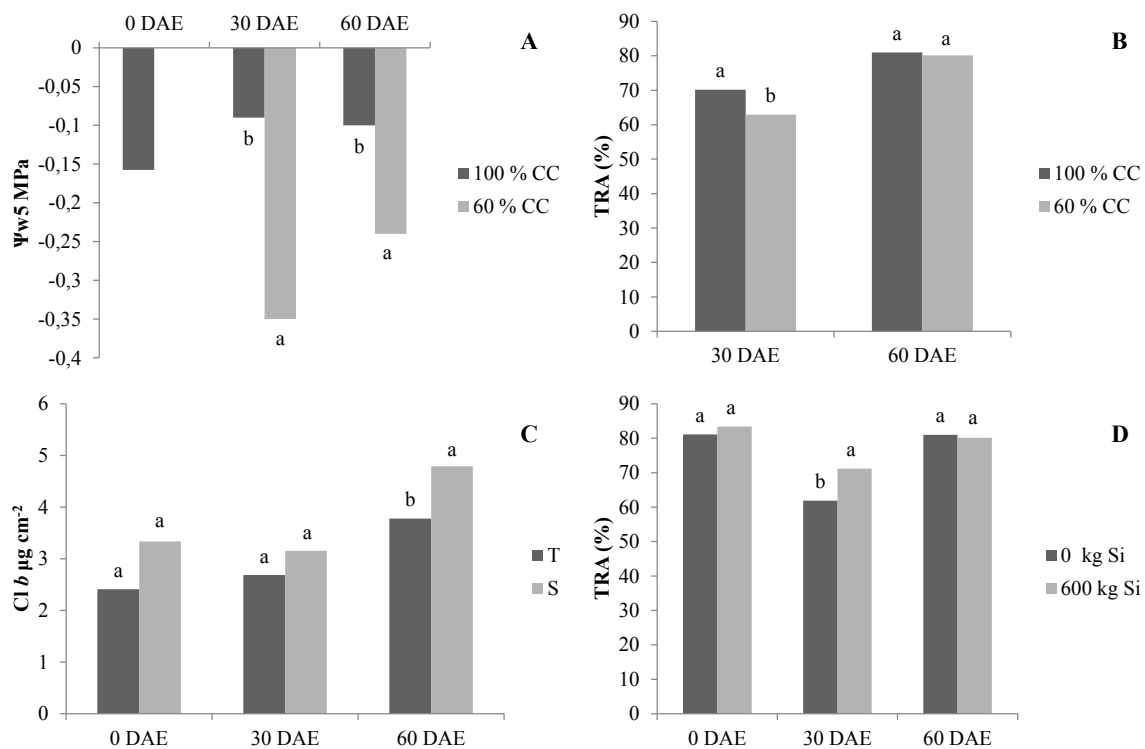


Figura 14 Efeito do regime hídrico no potencial de água na folha na antemã (A) e teor relativo de água (B), de variedade no conteúdo de clorofila *b* (C) e de silício no teor relativo de água (D) na fase de máximo desenvolvimento de duas variedades cana-de-açúcar, aos 0, 30 e 60 DAE, Piracicaba – SP, 2014. Ψ_{w5} = potencial de água na folha às 5h da manhã; Cl *b* = conteúdo de clorofila *b*; TRA = teor relativo de água; T = tolerante-RB867515; S = sensível-RB855536; CC = capacidade de campo; DAE = dias após o estresse. Colunas (média de quatro repetições) encimadas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

7 DISCUSSÃO

7.1 Atributos morfológicos

O rápido crescimento na fase inicial é uma ótima característica para variedades de cana-de-açúcar e está ligado às características morfológicas da planta relacionadas à interceptação de radiação, como perfilhamento e número de folhas Terauchi e Matsuoka (2000). Neste trabalho, antes da imposição do déficit hídrico, tanto aos três (Tabela 4) e seis meses (Tabela 10) após o transplântio foi observado efeito significativo relacionado tanto à variedade como à aplicação de Si, evidenciando as características inerentes às variedades. Uma vez que a RB867515 possui um rápido desenvolvimento e médio perfilhamento, investindo em comprimento de plantas e a RB855536 apresenta melhor entouceiramento e assim maior taxa de perfilhamento.

Aos três meses de idade a cana-de-açúcar está na fase de perfilhamento e esta característica é dependente da variedade, podendo apresentar soqueiras densas, médias ou pouco perfilhadas (CASAGRANDE, 1991). A variedade RB855536 apresentou maior eficiência no perfilhamento nas duas fases avaliadas (Figura 3B e 8B). A capacidade de perfilhamento das variedades de cana-de-açúcar é um dos fatores determinantes na produção de colmos industrializáveis, característica relacionada ao rápido crescimento vegetativo (CASTRO, 2000).

A adubação com Si aumentou significativamente o número de folhas das plantas da RB855536 e no número de perfilhos das RB867515 durante a fase de perfilhamento (Figura 4A e B), assim como na fase de grande desenvolvimento para RB867515 (Figura 9A). Resultados semelhantes foram obtidos por Madeiros et al. (2008), que utilizando doses de silicato (0, 1, 2, 3 e 4 t ha⁻¹) constataram incremento no comprimento das plantas, diâmetro de colmo e número de perfilhos na variedade RB92579

quando comparada à planta sem adubação com silicato. Elawad et al. (1982), estudando diferentes silicatos aplicados na cultura da cana-de-açúcar observaram, independentemente da fonte, efeito positivo sobre o comprimento de plantas, diâmetro do colmo e número de colmos.

Na fase de máximo desenvolvimento, antes do estresse (Tabela 10), que é um período de intenso crescimento, a RB867515 demonstrou maior comprimento de plantas e RB855536 apresentou maior número de perfilhos (Figura 9A e B), concordando com as características descritas por RIDESA (2010) sobre essas variedades. O uso do Si proporcionou incremento de 5,06% e 11,05% no comprimento de plantas e de 7,21% e 9,04% no número de folhas para as variedades RB867515 e RB855536, respectivamente (Figura 10A e B). Resultados semelhantes foram observados em cana-de-açúcar por Gascho (1978) e Prado (2003) para comprimento de plantas, e por Prado e Fernandes (2000a; 2001) para perfilhamento.

O perfilhamento e a área foliar estão diretamente relacionados à produtividade. Diversas variáveis influenciam o índice de área foliar, dentre elas o número de folhas (OLIVEIRA, 2007). O uso de silício, por sua vez favoreceu ambas as variedades, potencializando a produção de folhas e perfilhos das plantas (Figura 4C e D), indicando que o uso de silício pode ter impacto direto sobre a produtividade, mesmo em condições normais de regime hídrico. Considerando os resultados observados nesse estudo, para plantas nas fases de perfilhamento e máximo desenvolvimento, sem restrição hídrica, fica evidente que as duas variedades analisadas utilizam estratégias distintas para o desenvolvimento e assim alcançar suas produções. Pois, fornecidas mesmas condições para o desenvolvimento, ambas investiram distintamente a energia de seus fotoassimilados (Tabelas 4 e 10).

Na fase de perfilhamento, aos 30 DAE, o menor regime hídrico influenciou o comprimento de planta em ambas as variedades (Figura 3E). Essa modificação morfológica apresenta-se como uma das principais durante a aclimação da cana-de-açúcar ao passar por condição de restrito regime hídrico, sendo este um efeito causado pela redução da divisão e alongamento celular da planta (SILVA et al., 2008). Entretanto, mesmo as plantas da RB855536 apresentarem maior número de perfilhos, o maior número de folhas (Figura 3B e C), também apresentado por essa variedade, deve ter atuado negativamente conferindo maior evapotranspiração e, assim, requerimento hídrico, resultando em plantas menores (Figura 3A).

Na fase de máximo desenvolvimento, aos 30 DAE, a restrição hídrica influenciou negativamente em todas as variáveis morfológicas, exceto comprimento de planta (Figura 9D, E e F). Isso mostra o efeito do déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar devido à sua duração e intensidade. Essa resposta era esperada devido à estreita relação entre as variáveis número de perfilhos, folhas totais, e verdes e a expansão e alongamento celular. Conforme Inmam-Bamber e Smith (2005), alguns destes efeitos atuam como estratégias que visam reduzir os efeitos deletérios da restrição hídrica por meio da diminuição da área foliar, constituindo, portanto, mecanismos de tolerância à seca.

Quanto à resposta varietal encontrada aos 30 e 60 DAE durante a a fase de perfilhamento, a RB867515 apresentou plantas de maior comprimento (Figura 3A). A variedade RB855536, por sua vez, apresentou maior incremento na parte aérea, expresso em número de perfilhos e folhas totais (Figura 3B e C), demonstrando a maior número de folhas verdes mesmo aos 60 DAE (Figura 3D). Em condições de déficit hídrico, Ramesh e Mahadevaswamy (2000) observaram que variedades que expressaram menor perfilhamento desenvolvem colmos de maior comprimento, maior diâmetro e maior acúmulo de matéria seca, correlacionando-se positivamente com as variedades mais produtivas, concordando com os resultados observados na variedade RB867515.

O uso do Si aos 60 DAE, na fase de máximo desenvolvimento (Tabela 12), atuou proporcionando longevidade às folhas em ambas as variedades, mesmo no quesito de folhas senescentes, expresso pelas folhas totais e na duração efetiva da área foliar (folhas verdes) (Figura 9B e C), conferindo assim incremento no tempo de área foliar efetiva. A longevidade das folhas é uma característica bastante relacionada à produção, pois sendo a cana-de-açúcar uma planta de metabolismo fotossintético C4, demonstra-se altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química. Todavia, esta alta atividade fotossintética não se correlaciona diretamente com a elevada produtividade de biomassa, mas sim, com a alta taxa de fotossíntese por unidade de superfície de terreno, que é influenciada pelo índice de área foliar (RODRIGUES, 1995). Sendo assim, uma vez que a longevidade da área fotossinteticamente ativa de uma planta é reduzida ou prolongada, altera-se a eficiência do ganho e conversão de energia, ocasionando em perda ou ganho produtivo no final do ciclo, fato este também observado em arroz por Agarie et al. (1998a, b), e Prado e Fernandes (2000b) em cana-de-açúcar com uso de fontes de silício.

O efeito da interação regime hídrico e Si, 60 dias após a restrição hídrica, na fase de máximo desenvolvimento (Tabela 12) apresentou resultados favoráveis proporcionando incremento no comprimento de planta em condição de déficit hídrico (Figura 12). As plantas de ambas as variedades, nutridas com silício, apresentaram menor efeito do déficit. Este efeito pode ser explicado pela maior conversão de energia e alocação de biomassa no colmo, sendo esta resposta um possível resultado da maior eficiência no uso da água e menores perdas por evapotranspiração, fatores observados por Yoshida et al. (1962) e Agarie et al. (1998b) em arroz .

Na interação variedade e Si (Tabela 12) ocorrida tanto aos 30 quanto aos 60 DAE houve efeito no perfilhamento da RB867515, conferindo incremento de 15,15% após 30 dias do déficit, e de 7,93% e 10,34% no número de folhas para a variedade RB855536 (Figura 9A e B), aos 30 e 60 DAE. Mesmo considerando que cada variedade de cana-de-açúcar possui distinta eficiência da absorção de nutrientes e tolerância ao déficit hídrico, o uso do silício apresentou-se eficientemente para o desenvolvimento morfológico de ambas as variedades estudadas, incluindo-se em condições de restrição hídrica.

7.2 Atributos fisiológicos

Na fase de perfilhamento, antes do início do déficit hídrico (Tabela 7), o uso do silício demonstrou efeito favorável, tendo proporcionado incremento no índice SPAD e no teor de clorofila *b* (Figura 5A e B). Resultados semelhantes também foram observados por Ávila (2010) quanto ao índice SPAD, na cultura do arroz, e por Emrich (2011) e Locarno (2011) em tomateiro e roseira, respectivamente, no aumento de clorofila *b*. Estas variáveis são fortemente influenciadas por condições ambientais como temperatura, água e nutrição. O uso do Si pode estar ligado a este efeito por conferir às plantas melhor ângulo de abertura foliar, resultando na diminuição do autossombreamento e desta forma maior assimilação de luz (KORNDÖRFER et al., 1999), o que proporcionará aumento da fotossintética líquida, mediante incremento nos teores de clorofila (GONÇALVES, 2008).

A proporção média das clorofilas *a:b* é de 3:1. Mesmo em menor quantidade, clorofila *b* demonstra papel importante auxiliando a clorofila *a* na absorção de comprimentos de ondas curtas da radiação solar e transferência dessa energia para a

demanda fotossintética (RAVEN, 1983). É possível que o incremento na produção da clorofila *b* seja uma resultante do aumento da proporção do complexo coletor clorofila *a/b*-proteína, em relação ao complexo P-700-clorofila-*a*-proteína (THORNER, 1975), ou segundo Mitchell (1979) resultado de um maior desenvolvimento de “grana” em cloroplastos, que é onde se encontra o complexo *a/b*-proteína.

Inúmeros são os fatores nocivos ao desempenho e à produtividade das plantas. O dano em membranas em nível foliar pode ser considerado um dos primeiros sinais do déficit hídrico, podendo este ser minimizado por vários fatores, porém Bajji et al. (2001) atribuem o estado nutricional da planta como um dos primeiros. Mesmo não sendo considerado um nutriente essencial para a vida das plantas (EPSTEIN, 2009), antes do início do déficit hídrico foi observado efeito benéfico da adubação silicatada no extravasamento de eletrólitos, durante a fase de perfilhamento das plantas (Figura 5C). Esta característica é bastante importante por conferir maior integridade às estruturas das membranas e assim menor dano, pois as plantas não supridas com o elemento apresentaram 12,93% de aumento da taxa de extravasamento de eletrólitos.

Antes do início do déficit hídrico, durante a fase de máximo desenvolvimento (Figura 13A), a variedade RB867515 apresentou maior teor relativo de água quando comparada com a RB855536, demonstrando sua maior capacidade na retenção de água em seu tecido vegetal. Essa característica é tomada como um bom indicativo de tolerância ao déficit hídrico (COLOM; VAZZANA, 2003).

Após 30 dias de déficit hídrico durante a fase de perfilhamento, pode-se constatar a importância na escolha da variedade para um determinado ambiente de cultivo. Pois, mesmo a variedade RB855536 apresentando maior desenvolvimento da parte aérea das plantas (Figura 3C e D), essa apresentou maior extravasamento de eletrólitos (Figura 6A), uma característica potencialmente negativa, cerca de 20% a mais que a RB867515. A membrana celular é uma das primeiras a ser afetada por variados estresses de plantas, sendo que a manutenção da sua integridade e estabilidade sob condições de déficit hídrico é um dos principais componentes da tolerância à seca em plantas (BAJJI et al., 2001). A maior integridade de membranas tem sido recomendada como o principal critério para a identificação de variedades tolerantes para várias culturas (STEVANOVIC et al., 1997).

O Si, após 30 dias de déficit (Tabela 8), conferiu maior tolerância ao déficit hídrico às plantas durante a fase de perfilhamento, expresso no maior Ψ_w foliar

na antemanhã (Figura 5D), indicativo este da melhor recuperação pelas plantas aos danos impostos pelo déficit no dia anterior. Esse efeito se encontra unido ao menor extravasamento de eletrólitos (Figura 5C), também observado nestas plantas, característica que pode ser explicada pela maior deposição do silício e conseqüente aumento da rigidez e menor permeabilidade à água, estando estas características ligadas às relações hídricas da célula (YOSHIDA et al., 1962), conforme mostrado por Agarie (1998b) em arroz adubado com silício. Desta forma, as plantas nutridas com silício apresentaram melhor status hídrico e desempenho fisiológico, observado na recuperação do Ψ_w foliar na antemanhã e maior integridade de membranas, fatores estes observados nas plantas que apresentaram maior alocação de biomassa, ou seja, expressa na maior MFE (Figura 5E), demonstrando incremento de 5% em comparação às plantas sem o fornecimento deste elemento.

Aos 60 DAE durante a fase de perfilhamento, as plantas da variedade RB867515 apresentaram TRA 13% superior em relação a RB855536 (Figura 5F), demonstrando maior capacidade de manutenção do TRA e melhor hidratação do tecido vegetal, possivelmente isto esteja unido ao fato destas plantas apresentarem menor número de folhas (Figura 3B) e com isso, menor taxa evapotranspiratória

Durante a fase de máximo desenvolvimento das plantas, ambas as variedades foram afetadas pela indução do déficit hídrico por 30 dias, demonstrando decréscimo de 10,35% no teor relativo de água e acentuada depressão no Ψ_w foliar na antemanhã. (Figura 14A e B). Uma das causas para este efeito deve ser o período em que ocorreu a restrição hídrica, por ser um período de grande crescimento da cana-de-açúcar, e assim, grande requerimento hídrico, justificando dessa forma a redução da parte aérea das plantas também observada neste período (Figura 9D). Essa resposta pode ser uma estratégia para diminuir a superfície transpirante e o gasto metabólico para a manutenção dos tecidos (INMAN-BAMBER, 2004).

A degradação das membranas altera todo o desenvolvimento celular devido à dispersão dos íons do simplasto no apoplasto, alterando assim, o potencial osmótico e o conteúdo de água foliar (BAJJI et al., 2001; STEVANOVIC et al., 1997). A variedade RB855536 em ambos os períodos, isto é, durante as fases de perfilhamento e máximo desenvolvimento (Figura 6A e 12C) apresentou maior taxa de extravasamento. Em compensação, o silício proporcionou as plantas durante a fase de máximo desenvolvimento, aos 30 DAE melhor status hídrico, proporcionando maior TRA (Figura 14B), cerca de 13% em relação ao tratamento controle (sem Si), conferindo menor dano

por dessecação do tecido foliar, uma vez que a prevenção do déficit hídrico necessita de uma fina regulação da perda de água, a fim de manter adequada absorção de CO₂. Para o mesmo, a capacidade de economizar água exige uma ótima regulação estomática, características estas maximizadas mediante deposição e acúmulo deste elemento nas células da epiderme (YOSHIDA et al., 1962).

O maior Ψ_w foliar na antemanhã (Figura 6B), aos 30 e 60 DAE durante a fase de perfilhamento é uma prova do grau de restrição em que as plantas foram submetidas. Fator esse expresso evidentemente no maior número de folhas verdes (Figura 4A). A variedade RB867515 apresentou TRA 13% superior em relação a RB855536, demonstrando maior capacidade de manutenção do TRA e melhor hidratação do tecido vegetal, possivelmente por apresentar menor número de folhas (Figura 3B) e com isso, menor taxa evapotranspiratória.

Houve efeito na interação regime hídrico e variedade, durante a fase de perfilhamento após 60 dias de restrição hídrica, onde a variedade RB867515 apresentou em ótimo requerimento hídrico apresentou menor extravasamento de eletrólitos e maior conteúdo de Cl *a* (Figura 7A e B). Na condição de déficit, ambas as variedades mostraram efeito negativo, evidenciando-se o efeito do déficit submetido. A mesma tendência foi observada para na interação regime hídrico e silício (Figura 8), destacando-se as plantas em melhor disponibilidade hídrica, obtendo incremento de 7% no TRA para as plantas favorecidas com o elemento silício, benefício esse não observado na condição de déficit hídrico.

Os resultados observados após 60 dias de déficit hídrico, durante fase de máximo desenvolvimento (Tabela 15), evidenciaram que a duração do déficit hídrico resultou na fotodegradação dos pigmentos fotossintéticos Cl *a* e *b* (Figura 13D e 13C). Isso pode ser tomado como reflexo de uma severa condição de déficit, expresso pelo Ψ_w foliar na antemanhã (Figura 14A), alcançando potenciais menores que -0,22 MPa, apresentando maior efeito no índice SPAD das plantas da variedade RB867515 (Figura 13B). Por outro lado, a variedade RB855536 apresentou maior extravasamento de eletrólitos, cerca de 15% maior que na variedade RB867515 (Figura 13C).

As variedades não responderam da mesma forma, uma vez que apresentaram alocação de fotoassimilados em drenos distintos. Uma vez que a RB855536 apresentou maior taxa de perfilhos e número de folhas, enquanto que a RB867515 caracterizou-se por investir prioritariamente em comprimento de plantas. De maneira geral,

o uso do silício proporcionou melhor desempenho às plantas tanto em condições de ótimo regime hídrico quanto em condições de déficit, conferindo incremento aos atributos morfológicos comprimento de plantas, número de perfilhos, número de folhas e número de folhas verdes, ligados diretamente à produção da cana-de-açúcar. Como observado neste estudo.

Fisiologicamente as plantas de ambas as variedades responderam eficientemente, ressaltando-se as respostas obtidas na fase de perfilhamento, com maior efeito tanto na condição de déficit quanto ao uso da adubação silicatada. Isso provavelmente está relacionado ao intenso crescimento que ocorre dos 60 aos 150 dias após plantio (RAMESH, 2000; MACHADO et al., 2009) e à expressiva demanda hídrica para viabilizar o mecanismo fotossintético (PIRES et al., 2008).

8 CONCLUSÕES

O uso do silício favorece o desenvolvimento da cana-de-açúcar na fase de perfilhamento e na de máximo desenvolvimento, tanto em condições de ótimo quanto em restrito fornecimento hídrico.

O uso do silício promove maior tolerância às plantas de cana-de-açúcar ao estresse hídrico, modificando tanto variáveis morfológicas quanto fisiológicas.

Fisiologicamente, as plantas de cana-de-açúcar respondem de forma distinta ao uso do silício, quando comparado o seu efeito nas fases de perfilhamento e máximo desenvolvimento, para ambas as variedades.

O uso do silício é uma ótima ferramenta para o cultivo da cana-de-açúcar em áreas propensas a longos períodos de veranicos.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No panorama atual do setor sucroalcooleiro, tendo em vista o aumento crescente da demanda energética mundial e os entraves enfrentados pela cultura em nível ambiental, o uso do silício é uma alternativa bastante favorável. Uma vez que, no presente trabalho, o uso da adubação silicatada auxiliou tanto na tentativa de incrementar ganho na produtividade, expresso nas variáveis morfológicas, quanto minimizar os efeitos deletérios do déficit hídrico, expresso nas variáveis fisiológicas. Em condições de restrição hídrica, o fato de que a variedade sensível tenha apresentado melhor status hídrico, quando fornecido o silicato, expresso no potencial hídrico foliar e no conteúdo relativo de água, demonstra que o uso de adubos silicatados é uma alternativa importante no cultivo da cana-de-açúcar em novas áreas de expansão, sujeitas ao déficit hídrico, sugerindo que novos trabalhos, agora em condições de campo, devem ser realizados.

10 REFERÊNCIAS

- AYRES, A. S. Calcium silicate slag as a growth stimulant for sugarcane on low-silicon soils. **Soil Science**, Philadelphia, v. 101, n. 3, p. 216- 227, 1966.
- AUDE, M. I. S. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 2, n. 23, p. 241-248. 1993.
- AGARIE, S., AGATA, W.; KAUFMAN, P. B. Involvement of Silicon in the Senescence of Rice Leaves. **Plant Production Science**, Sendai, v. 1, n. 2, p. 104-105, 1998a.
- AGARIE, S. et al. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.) monitored by electrolyte leakage. **Plant Production Science**, Sendai, v. 1, n. 2, p. 96-103, 1998b.
- ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. **Environmental and Experimental Botany**, Paris, v. 59, 2. , p. 206-216, 2007.
- ÁVILA, F. W. et al. Interação entre silício e nitrogênio em arroz cultivado sob solução nutritiva. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 2 p. 184-190, 2010.
- BALASTRA, M. L. F. et al. Effects of silica level on some properties of *Oriza sativa* straw and hult. **Canadian Journal Botany**, Guelph, v. 67, p. 2356-63, 1989.
- BRAY, E. A. Plant responses to water deficit. **Trends in Plant Science**, Maryland Heights, v. 2, 2 , p. 48-54, 1997.
- BAJJI, M., KINET, J. M., LUTTS, S. The use of the electrolyte leakage method for assessing cell membrane stability as a water stress tolerance test in durum wheat. **Plant Growth Regulation**, Dordrecht, p. 1-10, 2001.
- BERTHELSEN, S. et al. Effect of Ca-silicate amendments on soil chemical properties under a sugarcane cropping system. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 2. **Proceedings...** Tsuruoka: Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, 2002. p. 57.

BITTENCOURT, M. F. et al. Efeito do silicato de cálcio sobre a produção e qualidade da cana-de-açúcar – Usina Equipav. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29. **Anais...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD-ROM.

BIDÓIA, M. A. P. et al. Efeito da deficiência hídrica no acúmulo de prolina livre em cana-de-açúcar em diferentes períodos de desenvolvimento. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 24, p. 42-45, 2006.

BARBOSA, T. B. et al. Potencial de água e regulação osmótica em variedades de cana-de-açúcar submetidas a dois regimes hídricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FISILOGIA VEGETAL, 12. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Fisiologia Vegetal, 2009.

BRASSIOLI, F. B.; PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Avaliação agronômica da escória de siderurgia na cana-de-açúcar durante cinco ciclos de produção. **Bragantia**, Campinas, n. 68, 381-387, 2009.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157p.

CASTRO, P. R. C. Aplicações da fisiologia vegetal no sistema de produção da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FISILOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, 2000, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: STAB, 2000. p.1-9.

CARVALHO, J. C. **Análise de crescimento e produção de grãos da cultura do arroz irrigado por aspersão em função da aplicação de escórias de siderurgia como fonte de silício**. 2000. 119 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

COLOM, M. R.; VAZZANA, C. Photosynthesis and PSII functionality of drought-resistant and drought sensitive weeping lovegrass plants. **Environmental and Experimental Botany**, Paris, v. 49, n. 2, p. 135-144, 2003.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira da cana-de-açúcar**. – v. 1 – **Safra 2014/15, n. 3**. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_12_19_09_02_49_boletim_cana_portugues_-_3o_lev_-_2014-15.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2015.

DEREN, C. W.; GLAZ, B.; SNYDER, G. H. Leaf-tissue silicon content of sugarcane genotypes grown on Everglades Histosols. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 16, 11. , p. 2273-2280, 1993.

DEREN, C. W. et al. Silicon concentration, disease response, and yield components of rice genotypes grown on flooded organic histosols. **Crop Science**, Madison, v. 34, p. 733-37, 1994.

ELAWAD, S. H., STREET, J. J.; GASCHO, G. J. Response of sugarcane to silicate source: and rate. I. Growth and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, n. 3, p. 481-484, 1982.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 641-664, 1999.

EMRICH, E. B. et al. Cultivo do tomateiro em substratos orgânicos sob aplicação foliar de silicato de potássio em ambiente protegido. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. , p. 56-61, 2011.

FOX, R. L.; SILVA, J. A.; YOUNGE, O. R.; PLUCKNETT, D. L.; SHERMAN, G. D. Soil and plant silicon and silicate response by sugarcane. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 31, 6. , p. 775-779, 1967.

FARIA, R. J. **Influência do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico do solo**. 2000. 47 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

GASCHO, G. J. Response of sugarcane to calcium silicate slag. I. Mechanisms of response in Florida. **Proceedings Soil and Crop Science Society of Florida**, Gainesville, v. 37, p. 55-58, 1978.

GONÇALVES, M. V. et al. Produtividade de batata cv. Atlantic sob diferentes doses de silicato de potássio via foliar. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 26, n. 2, p. 694-698, 2008.

GAVA, G. J. C. et al. Interação entre água e nitrogênio na produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). In: CRUSCIOL, C. A. (Org.). **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: FEPAF, 2010. v. 1, p. 49-66.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v 89. , n 1. , p. 107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N. G., SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 185-202, 2005.

JAMAUX, I.; STEINMETZ, A.; BELHASSEN, E. Looking for molecular and physiological markers of osmotic adjustment in sunflower. **New Phytologist**, Oxford, v. 137, p. 117-127, 1997.

KRAMER, P. J. **Plant and soil water relationship: modern synthesis**. New York: McGraw Hill, 1969. 538 p.

KORNDÖRFER, G. H.; COLOMBO, C. A.; RODRIGUES, L. L. Effect of thermosphosphate as silicon source for sugarcane. In: INTER-AMERICAN SUGAR CANE SEMINAR. **Anais...** Miami, Florida, 1998. p. 9-11.

KORNDÖRFER, G. H. COELHO, N. M.; SNYDER, G. H.; MIZUTANI, C. T.; Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vicosa, v. 23, p. 101-106, 1999.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 21, n. 2, 2002.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CORRÊA, G. F. Disponibilidade de silício em solos: efeito do pH, Si e extratores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003, CD-ROM.

KINGSTON, G. Impact of calcium silicate amendments on sugarcane yield and soil properties in Queensland Australia. In: PROCEEDINGS OF THE 3TH SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, Uberlandia, p. 107. 2005.

LOPES, A. S. **Solos sob cerrado**: características, propriedades e manejo. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1984. 162 p.

LIANG, Y. C. et al. Silicon availability and response of rice and wheat to silicon in calcareous soils. **Communication Soil Science Plant Analysis**, New York, v. 25, p. 2285-2297, 1994.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2004. 531 p.

LOCARNO, M.; FOCHI, C. G.; PAIVA, P. D. O. Influência da adubação silicatada na teor de clorofila em folhas de roseira. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 2, p. 287-290, 2011.

MCKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soil solutions. I. The form and concentration of dissolved silica in aqueous extracts of some soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 43, n. 1, p. 70-82, 1963.

MITCHELL, R. L. **Crop Growth and Culture**. Ames: The Iowa State University Press, 1979. 349 p.

MATYCHENKOV, V. V.; AMMOSOVA, Y. M. Effect of amorphous silica on soil properties of a sod-podzolic soil. **Eurasian soil science**, Moscow, v. 28, p. 87-99, 1996.

MADEIROS L. B. et al. Influência da escória siderúrgica sobre a produtividade e crescimento da cana-de-açúcar irrigada. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 5, n. 3, p. 192-202, 2008.

MACHADO, R. S. et al. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agroperuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, n. 12, p. 1575-1582, 2009.

MANZATTO, C. V. et al. (Org.). **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**: expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p. (Documentos, 110).

MCCRAY, J. M., AND S. JI. Calibration of sugarcane response to calcium silicate on Florida Histosols. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 35, 8. , p. 1192-1209, 2012.

MARQUES, T. A.; PINTO, L. E. V. Energia da biomassa de cana-de-açúcar sob influência de hidrogel, cobertura vegetal e profundidade de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 680-685, 2013.

OLIVEIRA, R. A. et al. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 2, p. 71-76, 2007.

OLIVEIRA, J. F. N. C. **Caracterização fisiológica e perfil de expressão gênica de cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) contrastantes para o déficit hídrico**. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2012.

PORRA, R. J.; THOMPSON, W. A.; KRIEDEMANN, P. E. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. **Biochimica et Biophysica Acta**, Amsterdam, v. 975, p. 384-394, 1989.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Eficiência da escória de siderurgia em Areia Quartzosa na nutrição e na produção de matéria seca de cana-de-açúcar cultivada em vaso. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 18, 4. , p. 36-39, 2000a.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Escória de siderurgia e calcário na taxa de folhas senescentes na cultura da cana-de-açúcar. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 75, n. 3, p. 311-321, 2000b.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Eficiência da escória de siderurgia em Latossolo Vermelho na nutrição e na produção de matéria seca de cana-de-açúcar cultivada em vaso. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 19, 4. , p. 26-29, 2001.

PRADO, F. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 287-296, 2003.

PIRES, R. C. M.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. Irrigação e drenagem. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 631-670.

PINCELLI, R. P.; SILVA, M. A. Alterações morfológicas foliares em cultivares de cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica. **Bioscience Journal, Uberlândia**, v. 28, n. 4, p. 546-556, 2012.

QUEIROZ, R. J. B. et al. Biochemical and physiological responses of sugarcane cultivars to soil water deficiencies. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 4, p. 469-476, 2011.

ROSS, L.; NABABSING, P.; WONG YOU CHEONG, Y. Residual effect of calcium silicate applied to sugarcane soils. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 15., 1974, Durban. **Proceedings...** v. 15, n. 2, p. 539-542, 1974.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society**, v. 58, n. 1, p. 179-207, 1983.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 1995. 75 p.

ROBERTSON, M. J. et al. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 64, p. 211-227, 1999.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 185, p. 249-258, 2000.

RAMESH, P. Effect of Different Levels of Drought during the Formative Phase on Growth Parameters and its Relationship with Dry Matter Accumulation in Sugarcane, **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 185, 2. , p. 83-89, 2000.

REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO - RIDESA. **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar**. Curitiba, 2010. 136 p.

REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO – RIDESA. **Censo Varietal 2011**. Revista Censo Varietal. Disponível em: <http://pmgca.dbv.cca.ufscar.br/downloads>.

SCHULZE, E. D. Carbon dioxide and water vapor exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. **Annual Review of Plant Physiology**, California, v. 37, p. 247-274, 1986.

STEVANOVIC, B.; SINZAR, J.; GLISIC, O. Electrolyte leakage differences between poikilohydrous and homoiohydrous species of Gesneriaceae. **Biologia Plantarum**, Dordrecht, v. 40, n. 2, p. 299-303, 1997.

SPIRONELLO, A. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: IAC/Fundação IAC, 1997. 285 p.

SCOTTI CAMPOS, P.; THU PHAM THI, A. Effect of abscisic acid pretreatment on membrane leakage and lipid composition of *Vigna unguiculata* leaf discs subjected to osmotic stress. **Plant Science**, Maryland Heights, v. 130, p. 11-18, 1997.

SAVANT, N. K. et al. Silicon Nutrition and Sugarcane Production: a review. **Journal of Plant Nutrition**. New York, v. 12, n. 22, p. 1853-1903, 1999.

SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, p. 91-97, 2006.

SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. v. 2, 1279 p.

- SILVA, M. A. et al. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 655-661. 2008.
- SILVA, T. G. F. et al. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 64-71, 2012.
- TANAKA, A.; PARK, Y. D. Significance of the absorption and distribution of silica in the growth of rice plant. **Soil Science Plant Nutrition**, Singapore, v. 12, p. 23-8, 1966.
- THORNER, J. P. Chlorophyll-proteins: light-harvesting and reaction center components of plants. **Annual Review of Plant Physiology**, California, v. 26, p. 127-58, 1975.
- TOPP, G. C. et al. Soil water desorption curves. In: CARTER, M. R. (Org.). **Soil sampling and methods of analysis**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. p. 569-579.
- TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T. et al. **Science of rice plant physiology**. Tokio: Nobunkyo, 1995. v. 2, chap. 5, p. 420-433.
- TERAUCHI, T.; MATSUOKA, M. Ideal characteristics for the early growth of sugarcane. **Japanese Journal of Crop Science**, Tokyo, v. 69, n. 3, p. 286-292. 2000.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. SANTARÉM, E. R. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.
- RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres; Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343 p.
- RAIJ, B. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997, 285 p.
- YOSHIDA, S.; OHNISHI, Y.; KITAGISHI, K. Chemical forms, mobility and deposition of silicon in rice plant. **Soil Science Plant Nutrition**, Singapore, v. 8, p. 15-21, 1962.
- YOSHIDA, S.; NAVESER, S. A.; RAMIREZ, E. A. Effects of silica and nitrogen supply on some leaf characters of rice plant. **Plant Soil**, Amsterdam, v. 31, p. 48-56, 1969.