

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 31/08/2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA- UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**USO DE SILÍCIO NO CONTROLE DA ESCALDADURA
DA FOLHA EM CANA-DE-AÇÚCAR**

Mayara Cristina Malvas Nicolau

Bióloga

**Jaboticabal, São Paulo
2023**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**USO DE SILÍCIO NO CONTROLE DA ESCALDADURA
DA FOLHA EM CANA-DE-AÇÚCAR**

Mayara Cristina Malvas Nicolau

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Priscila Lupino Gratão

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Produção Vegetal

Jaboticabal, São Paulo
2023

N639u Nicolau, Mayara
Uso de silício no controle da escaldadura da folha em
cana-de-açúcar / Mayara Nicolau. -- Jaboticabal, 2023
74 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientadora: Priscila Gratão

1. Fisiologia das plantas. 2. Estresse vegetal. 3. Metabolismo. I.
Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: USO DE SILÍCIO NO CONTROLE DA ESCALDADURA DA FOLHA EM CANA-DE-AÇÚCAR

AUTORA: MAYARA CRISTINA MALVAS NICOLAU

ORIENTADORA: PRISCILA LUPINO GRATÃO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. PRISCILA LUPINO GRATÃO (Participação Virtual)
Departamento de Biologia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente

Pesquisador Dr. RICARDO JARDIM DE PAULA (Participação Virtual)
ADAMA Brasil / Londrina/PR

RICARDO JARDIM DE PAULA
Data: 04/09/2023 14:56:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GILMAR DA SILVEIRA DE SOUSA JÚNIOR (Participação Virtual)
Instituto Municipal de Ensino Superior de Bebedouro / Bebedouro/SP

Documento assinado digitalmente
GILMAR DA SILVEIRA SOUSA JÚNIOR
Data: 04/09/2023 17:14:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pesquisador Dr. JUAN RICARDO ROCHA (Participação Virtual)
CENA USP / Piracicaba/SP

Documento assinado digitalmente
JUAN RICARDO ROCHA
Data: 31/08/2023 18:56:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. JÉSSICA PACHECO DE LIMA (Participação Virtual)
Biotrop Soluções Biológicas / Vinhedo/SP

Documento assinado digitalmente
JESSICA PACHECO DE LIMA
Data: 04/09/2023 18:12:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 31 de agosto de 2023

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Mayara Cristina Malvas Nicolau – nascida em 04 de Abril de 1995, na cidade de Pontal, Estado de São Paulo, filha de Mariluci Malvas Nicolau e Eziquiel Fonseca Nicolau. Graduou-se em Ciências Biológicas (bacharelado) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal (FCAV) no ano de 2016 e modalidade licenciatura em 2018. Foi bolsista PIBIC/REITORIA de iniciação científica na área de fisiologia animal (2014-2015) e bolsista Capes na área de fisiologia vegetal (2015-2017) onde desenvolveu projetos na área de Fisiologia Vegetal e Metabolismo oxidativo, defendendo o trabalho de conclusão de curso “Silício como atenuante do estresse salino na germinação da alface” sob orientação da Prof^a. Dr^a. Priscila Lupino Gratão. Realizou o mestrado entre 2018 e 2020, no Caunesp/UNESP sob orientação da Prof^a. Titular Lúcia Helena Sipaúba Tavares, onde desenvolveu o trabalho “Avaliação de antioxidantes no cultivo da microalga *Messastrum gracile* (Reinsch) T. S. Garcia”, ganhando em primeiro lugar na apresentação oral no “III Congresso Paulista de Ciências Biológicas- UNESP- São José do Rio Preto”. Doutorado pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal), pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP), Campus de Jaboticabal-SP, como bolsista CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) sob orientação da Prof^a. Dr^a. Priscila Lupino Gratão. Estagiou na empresa Núcleo de Pesquisas Aplicada- NPA Industria de Pesquisa e elaborou projetos para órgãos de fomento para empresa Conatus Ambiental

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar durante minha trajetória, por me abençoar nos momentos de fraqueza.

A minha orientadora Prof^a. Dr^a. Priscila Lupino Gratão pela escuta, pela preocupação, por me acalmar e não me deixar desistir, por acreditar sempre em mim, pelos ensinamentos e crescimento que eu tive e pela amizade construída. A toda minha família, meus tios, meu avô, meus pais, minha irmã e meus primos, por acompanharem todos os meus passos e sempre me ajudarem no que fosse preciso. Obrigada por acreditarem em mim, vocês foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

A todos os meus colegas do laboratório de Fisiologia Vegetal que já passaram ou ainda permanecem, que me ajudaram sempre que precisei, pelos ensinamentos no laboratório e amizades que ganhei. Em especial agradeço a técnica Soninha pelo auxílio durante cada protocolo, pela palavra amiga, pelo conforto do abraço, por sempre torcer por mim e pelos cuidados dentro e fora do laboratório.

Agradeço aos meus amigos de Pontal e os que tive a sorte de conhecer em Jaboticabal por toda a ajuda, por me entenderem em todos os momentos pelas palavras sempre precisas e tão calmas e acolhedoras nos momentos de desespero e tristeza. Por acreditarem em mim sempre e me mostrarem que as coisas acontecem no momento certo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Programa de Pós-graduação e o laboratório de fisiologia vegetal (FCAV) pelas análises de antioxidante. E a todos que contribuíram com este trabalho e minha formação, meus sinceros agradecimentos

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO	3
2. OBJETIVO	7
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1 Cana-de-açúcar	8
3.2 Deficiência hídrica na cana-de-açúcar	11
3.3 <i>Xanthomonas albilineans</i> e a doença escaudadura da folha	13
3.4 Silício	16
3.5 Estresse Oxidativo e o sistema de defesa antioxidante	18
4. MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1 Ensaio experimental	20
4.2 Condições de cultivo e delineamento experimental	20
4.2.1. Primeira etapa	21
4.2.2 Segunda etapa: transplântio das mudas para vasos com solo:	24
4.3 Preparação do inóculo	24
4.4 Inoculação e deficiência hídrica	25
4.5 Monitoramento dos sintomas, Extração de DNA e quantificação da bactéria nos tecidos vegetais (TaqMan)	26
4.6 Análises Fisiológicas	27
4.7 Análises Bioquímicas	28
5. RESULTADOS	31
6. DISCUSSÃO	46
6.1 Análises fisiológicas	46
6.2 Antioxidantes não enzimáticos	47
6.3 Antioxidantes enzimáticos	48
7. CONCLUSÃO	51
8. REFERÊNCIAS	53

RESUMO

USO DE SILÍCIO NO CONTROLE DA ESCALDADURA DA FOLHA EM CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas no mundo, representando grande importância para a economia brasileira. Entretanto, problemas fitossanitários fazem com que sua produção esteja estagnada desde 2010. A escaldadura das folhas, doença causada pela bactéria *Xanthomonas albilineans* acomete os canaviais reduzindo sua produtividade, sendo seus efeitos intensificados pela deficiência hídrica. Atualmente, não existem tratamentos para o controle dessa bacteriose, tornando imprescindível o desenvolvimento de novas estratégias para a redução de seus danos. Assim o uso de silício (Si) apresenta resultados alentadores à atenuação dos efeitos ocasionados por diversos estresses. Entretanto, pouco se conhece sobre o papel do Si como indutor de resistência a escaldadura das folhas. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da aplicação do Si no controle da escaldadura em cana-de-açúcar associada à deficiência hídrica. Foram utilizadas duas cultivares de cana-de-açúcar, uma suscetível (SP78-4467) e uma resistente a doença (SP80-3280), submetidas a dois estresses (*X. albilineans* e deficiência hídrica) e pré-tratadas com Si. Análises fisiológicas de massa seca e potencial hídrico foram mais expressivas na cultivar resistente pr-tratada com Si, assim como as análises bioquímicas da clorofila total, carotenoides e prolina. Já a cultivar suscetível demonstrou melhores respostas, quando tratadas com Si, na indução do sistema enzimático e no menor conteúdo de MDA. Os resultados demonstram que a aplicação exógena de Si atua na indução do sistema de defesa das plantas de cana-de-açúcar contra os efeitos do estresse ocasionado pela bactéria *X. albilineans* e pela deficiência hídrica.

Palavras-chave: sistema de defesa, cana-de-açúcar, patógeno, estresse, enzimas, antioxidantes.

ABSTRACT

USE OF SILICON TO CONTROL LEAF SCALT IN SUGARCANE

Sugarcane is one of the main crops in the world, representing great importance for the Brazilian economy. However, phytosanitary problems have caused its production to be stagnant since 2010. Leaf scald, a disease caused by the bacterium *Xanthomonas albilineans*, affects sugarcane fields, reducing productivity, and its effects are intensified by water deficit. Currently, there aren't treatments to control this bacteriosis, making it essential to develop new strategies to reduce its damage. Thus, the use of silicon (Si) presents encouraging results in attenuating the effects caused by different stresses. However, little is known about the role of Si as an inducer of leaf scald resistance. Thus, the present work aimed to evaluate the efficiency of Si application in the control of sugarcane scald associated with water deficit. Two sugarcane cultivars were used, one susceptible (SP78-4467) and one resistant to the disease (SP80-3280), subjected to two stresses (*X. albilineans* and water deficit) and Si priming. Physiological analyzes of dry mass and water potential were higher in the resistant cultivar with Si, as well as biochemical analyzes of total chlorophyll, carotenoids and proline. The susceptible cultivar, by the other hand, showed better responses when treated with Si, in relation to antioxidante enzymes responses and lowest MDA content. The findings demonstrate that the exogenous application of Si can act in the induction of the defense system of sugarcane plants against the effects of stress caused by the bacteria *X. albilineans* and water deficit.

Keywords: defense system, sugarcane, pathogen, stress, enzymes, antioxidants.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) pertencente à família das Poaceas, ocupa o terceiro lugar no mercado agrícola do Brasil, posicionando-a como uma das principais culturas do Brasil, sendo disseminada em todas as regiões do país (CONAB, 2019; Lacerda et al, 2019).

Apesar da grande produção de cana-de-açúcar no país, o rendimento da cultura encontra-se estagnado há mais de uma década, o que inclui os problemas fitossanitários. Neste contexto, a Escaldadura das folhas afeta substancialmente a cana-de-açúcar, com um grande potencial destrutivo, sobretudo em variedades suscetíveis, cujas perdas podem chegar a 100% (Saumtally e Dookun-Saumtally, 2004; FAO 2018). Esta doença é causada pela bactéria *Xanthomonas albilineans*, reportada no Brasil pela primeira vez em 1943, no estado de São Paulo, podendo se estabelecer no xilema, floema e tecidos não vasculares, como o parênquima e sua contaminação ocorre por meio de mudas infectadas, do vento e instrumentos de corte, como facões e colheitadeiras mecanizadas, que promovem ferimentos no colmo e disseminam a doença no canavial (Birch et al., 2001; Mensi et al., 2014; Casagrande et al., 1997).

De fato, a manifestação da doença pode ocorrer de forma variada, sendo latente (assintomática), identificada apenas por métodos de alta sensibilidade; crônica e aguda. Os sintomas da forma crônica são o de estrias brancas e finas longitudinais, que se estendem por todo limbo foliar e bainha (Ricaud et al., 2012). Entretanto, se durante a fase crônica ou fase de latência, a planta for submetida a uma condição ambiental desfavorável, a doença pode evoluir para a forma aguda com sintomas mais graves e aparentes, como a perda da dominância apical, aumento da brotação das gemas basais e sintomas de queima das folhas (Rott e Davis, 2000; Root et al., 2010). Além da redução da qualidade do caldo e má formação de soqueira, as folhas apresentam áreas esbranquiçadas (clorose), com aspecto seco e grande necrose, conferindo o aspecto de planta escaldada (Rott et al., 2010; Santos e Borém, 2013).

O clima e os microrganismos fitopatogênicos estão relacionados diretamente, e os impactos dessa interação sobre os problemas fitossanitários foram pouco explorados. Assim, qualquer fator ambiental que venha contribuir

com o aumento da incidência ou severidade da doença deve ser analisado tanto no contexto atual, quanto no futuro; em que o ambiente atua sobre a planta hospedeira, sobre o patógeno e sobre a interação hospedeiro-patógeno (AGRIOS, 1997).

Um vasto número de trabalhos tem demonstrado que tanto os estresses bióticos quanto os abióticos proporcionam a superprodução de espécies reativas de oxigênio (ERO) como o ânion superóxido (O_2^-), a hidroxila ($OH^\cdot$) e o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), podendo levar ao estresse oxidativo (Liu et al., 2015). Estas ERO podem acelerar a peroxidação lipídica, afetando assim a fluidez e permeabilidade da membrana devido a alterações na composição dos lipídeos (Manquián-Cerda et al., 2016). Consequentemente, estas respostas desencadeiam os mecanismos de resposta ao estresse, capazes de prevenir a oxidação descontrolada, aos quais incluem enzimas chaves como a superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1), glutathione redutase (GR, EC 1.6.4.2), catalase (CAT, 1.11.1.6), glutathione peroxidase (GSH-Px, EC 1.11.1.9), ascorbate peroxidase (APX, EC 1.11.1.11) e outras peroxidases, que agem contra o H_2O_2 (Gratão et al., 2015). Mecanismos não enzimáticos também podem operar nesta defesa, incluindo antioxidantes como o ascorbate (AsA) e a glutathione (GSH), assim como vitaminas, flavonoides, alcaloides, carotenoides e clorofilas. Assim, o complexo caminho bioquímico dentro da célula é desencadeado como uma indução do sistema antioxidante que têm o potencial de controlar cascatas descontroladas de oxidação nas células sob condições normais, ou quando estimuladas por alguma situação de estresse. Apesar de um sistema de defesa complexo, a resposta pode não ser efetiva e os sintomas e deficiências causados pelo patógeno podem acontecer (Hasan et al., 2016).

Atualmente, o plantio de cultivares resistente e de mudas sadias são as formas mais eficazes para manejo da doença, (Saumtally e Dookun-Saumtally, 2004; Ricaud et al., 2012). Entretanto a diversidade genética que *Xanthomonas albilineans* apresenta faz com que o patógeno consiga quebrar a resistência de algumas cultivares e com isso, limita o produtor na escolha das variedades que apresentam resistência à escaldadura em detrimento a outras, limitando o potencial de produtividade daquela área. E ainda, alterações fisiológicas na planta podem alterar os mecanismos de resistência de cultivares, podendo ocorrer a quebra da resistência da planta em função da maior pressão da

doença, modificando o controle genético, além da necessidade do preparo extensivo de áreas de viveiros para eliminar bactérias do solo e restos de cultura, e desinfecção de equipamentos e ferramentas utilizadas no seu manejo. Assim, a análise das alternativas de adaptação torna-se estratégico para a agricultura brasileira. Dessa forma, há necessidade de intensificar a investigação e o desenvolvimento de técnicas efetivas e soluções sustentáveis no controle de fitopatógenos (Zhang et al., 2020; Rott e Davis, 2000).

Poucos estudos se concentram em formas de minimizar os efeitos e sintomas dessa doença em canaviais já contaminados pela bactéria e também na maneira de atenuar os sintomas da associação entre o estresse provocado pela bactéria *X. albilineans* (biótico) com aquele da deficiência hídrica (abiótico) na cana-de-açúcar (Meng et al., 2020). Apesar das mudanças climáticas serem o maior desafio da humanidade, qualquer fator ambiental que venha contribuir com o aumento da incidência ou severidade da doença deve ser analisado no contexto atual.

A procura por estratégias de manejo que possam vir a induzir os mecanismos de respostas e reduzir os efeitos negativos nas plantas infectadas pela *X. albilineans* se tornam de suma importância reduzir os sintomas e prejuízos provocados por essa bactéria na cana-de-açúcar (Meng et al., 2020).

A suplementação das plantas com elementos minerais de forma isolada ou combinada é uma das estratégias que pode ser adotada, principalmente por estes terem uma rota conhecida no metabolismo das plantas e assim, minimizar a toxicidade gerada pelo estresse (Feng et al., 2013). O silício (Si), por exemplo, pode atenuar os efeitos provenientes de adversidades climáticas e biológicas atuando no aumento do conteúdo relativo de água, pigmentos fotossintéticos, e atividade de enzimas antioxidantes na cana-de-açúcar sob condições de deficiência hídrica. Isso é especialmente importante no caso da escaldadura, pois a fase de maior taxa de mortalidade da cultura é sua fase aguda, que pode ser intensificada em condições de deficiência hídrica. O Si também desempenha função de defesa, combinando atributos físicos e químicos, tais como a lignificação da parede celular e indução de várias proteínas de defesa (Lima Filho, 2006; Schultz, 2012; Verma et al., 2019).

Com isso, a busca por meios alternativos de controle torna-se importante, não somente para a escaldadura, mas para um grande número de doenças e pragas que acometem as culturas (Montes et al., 2015).

7. CONCLUSÃO

A aplicação exógena de Si atua na indução do sistema de defesa das plantas de cana-de-açúcar contra os efeitos do estresse ocasionado pela bactéria *X. albilineans* e pela deficiência hídrica, sendo que para a cultivar resistente (SP80-3280) as respostas foram mais efetivas para os antioxidantes não enzimáticos e análises fisiológicas (carotenoides, prolina, potencial hídrico, f_v/f_m), refletindo no aumento da massa seca. Já para a cultivar susceptível (SP78-4467), o Si atuou no sistema de defesa enzimático, ocasionando uma diminuição nos efeitos do estresse. Assim é possível concluir que o Si se mostra efetivo no controle da escaldadura, e do estresse ocasionado pela mesma, na cultivar suscetível de cana-de-açúcar.

8. REFERÊNCIAS

- Agarie, S., Agata, W., Kaufman, P.B., 1998. Involvement of silicon in the senescence of rice leaves. *Plant Production Science*, Tokyo, v. 1, n. 2, p.104-105. <https://doi.org/10.1626/pps.1.104>
- Agrios, G.N., 1997. *Plant Pathology*. 4a. ed. San Diego: Academic Press.
- Ahmad, P., Jaleel, C. A., Salem, M. A., Nabi, G., and Sharma, S., 2010. Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. *Crit. Rev. Biotechnol.* 30, 161–175. doi: 10.3109/07388550903524243
- Almeida, A.C.S., 2006. Desenvolvimento vegetativo e produção de cana-de-açúcar versus graus-dia e disponibilidade hídrica. TCC, Universidade Federal de Alagoas, 22p.
- Anderson, J.V., Davis, D.G., 2004. Abiotic stress alters transcript profiles and activity of glutathione S-transferase, glutathione peroxidase, and glutathione reductase in *Euphorbia esula*. *Physiol. Plant.*, 120, pp. 421-433, 10.1111/j.0031-9317.2004.00249.x
- Apel, K., Hirt, H., 2004. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 55 pp. 373-399. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>
- Asada, K., 1999. The water-water cycle in chloroplasts: Scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. *Annu. Rev. Plant Biol.* 50, 601–639. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.601>
- Avila, R.G., Magalhães, P.C., da Silva, E.M., de Souza, K.R.D., Campos, C.N., de Alvarenga, A.A., de Souza, T.C., 2021. Application of silicon to irrigated and water deficit sorghum plants increases yield via the regulation of primary, antioxidant, and osmoregulatory metabolism. *Agricultural Water Management* 255:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107004>
- Azevedo, R.A., Alas, R.M., Smith, R.J., Lea, P.J., 1998. Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. *Physiol. Plant.* 104, 280–292. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1998.1040217>
- Barbieri, V. 1993. Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) um modelo matemático fisiológico de estimativa.

- Piracicaba, 142 p. Tese (Doutorado em Agronomia, Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz," Universidade de São Paulo".
- Barbosa, M.R., Silva, M.M. de A., Willadino, L., Ulisses, C., Camara, T.R., 2014. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. *Cienc. Rural* 44, 453–460. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000300011>
- Barreiros, A.L.B.S., David, J.M., David, J.P., 2006. Estresse oxidativo: relação entre geração de espécies reativas e defesa do organismo. *Química Nova*, v. 29, n. 1, p. 113-123.
- Barreto, R.F., Schiavon Júnior, A.A., Maggio, M.A., Prado, R.M., 2017. Silicon alleviates ammonium toxicity in cauliflower and in broccoli. *Scientia Horticulturae*, v. 225, p.743–750.
- Basnayake, J., Jackson, P.A., Inman-Bamber, N.G., Lakshmanan, P., 2012. Sugarcane for water-limited environments. Genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress. *Journal of Experimental Botany* 63:6023–6033. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers251>
- Bates, L.S., Waldren, R.P., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil* 39, 205–207.
- Baxter, A., Mittler, R., Suzuki, N., 2014. ROS as key players in plant stress signalling. *J. Exp. Bot.* 65, 1229–1240. doi: 10.1093/jxb/ert375
- benthamiana to infection with two strains of pepper mild mottle virus *J. Exp. Bot.* 10.1093/jxb/ers212
- Besharat, S., Barão, L., Cruz, C., 2020. New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. *Journal of Environmental Management* 263:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110398>
- Bezerra, B.K.L., Lima, G.P.P., dos Reis, A.R., Silva, M. de A., de Camargo, M.S., 2019. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. *Acta Physiol. Plant.* 41, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>
- Birch, R.G., 2001. *Xanthomonas albilineans* and the antipathogenesis approach to disease control. *Mol. Plant Pathol.* 2, 1–11. <https://doi.org/10.1046/j.1364->

3703.2001.00046.

- Birchall, J.D., 1995. The essentiality of silicon in biology. *Chemical Society Reviews* 24:351–357. <https://doi.org/10.1039/CS9952400351>
- Blum, A., 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential – are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Aust. J. Agric. Res.* 56, 1159–1168.
- Bradford, M.M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* 72:248–254.
- Braga, N.C.C., Severiano, E.C., Santos, L.S., Neto, A.R., Rodrigues, T.M., Lima, J.D.P., 2019 Production of sugarcane seedlings pre-sprouted in comercial and alternative substrates with by-products of the sugarcane industry. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, v. 40, n. 1, p. 33-48. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n1p33>.
- Brumbley, S.M., Petrasovits, L.A., Murphy, R.M., Nagel, R.J., Candy, J.M., Hermann, S.R., 2004. Establishment of a functional genomics platform for *Leifsonia xyli* subsp. *xyli*. *Molecular plant-microbe interactions*, v. 17, n. 2, p, 175-183.
- Brumbley, S.M., Snyman, S.J., Gnanasambandam, A., Joyce, P., Hermann, S.R., Silva, J.A.G., McQualter, R.B., Wang, M., Egan, B.T., Paterson, A.H., Albert, H.H., Moore, P.H., 2009. Sugarcane. In *Compendium of Transgenic Crop Plants* (eds C. Kole and T.C. Hall). <https://doi.org/10.1002/9781405181099.k0701>
- Cakmak, I., Horst, W.J., 1991. Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). *Physiol. Plant.* 83, 463–468. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb00121>.
- Camargo, M.S., Bezerra, B.K.L., Holanda, L.A., Oliveira, A.L., Vitti, A.C., Silva, M.A., 2019. Silicon Fertilization Improves Physiological Responses in Sugarcane Cultivars Grown Under Water Deficit. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 19, 81–91. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>.
- Camargo, M.S., Bezerra, B.K.L., Vitti, A.C., Silva, M.A., Oliveira, A.L., 2017. Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. *J. soil Sci. plant Nutr.* 17, 99–111. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000008>
- Camargo, M.S., Coutinho, I.D., Lourenço, S.A., Soares, M.K.M., Colnago, L.A.,

- Appezzato-da-Glória, B., Cavaleiro, A.J., Amorim, L., 2020. Potential prophylactic role of silicon against brown rust (*Puccinia melanocephala*) in sugarcane. *Eur. J. Plant Pathol.* 157, 77–88. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-01982-2>
- Camargo, Mô.S. de, Amorim, L., Gomes Júnior, A.R., 2013. Silicon fertilisation decreases brown rust incidence in sugarcane. *Crop Prot.* 53, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.06.006>.
- Camargo, Mô.S. de, Korndörfer, G.H., Wyler, P., 2014. Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. *F. Crop. Res.* 167, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.07.009>
- Casagrande, A. A. Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157 p.
- Casagrande, A.A., 1996. Crescimento da cana-de-açúcar. *STAB* 14:7-8.
- Casagrande, M.V., Sanguino, A., Ferezini, E., 1997. Evolução, prejuízos e métodos de controle de quatro importantes doenças da cana-de-açúcar. *Seminário de Tecnologia Agronômica*, v. 7, p. 183-190.
- Cavalcante, V.S., Prado, R.M., Vasconcelos, R.V., Campos, C.N.S., 2016. Iron concentrations in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) cultivated in nutrient solution. *Agrociência*, v.50, p.867-875.
- Caverzan, A., 2008. Caracterização funcional dos genes de ascorbato peroxidase de arroz (*Oryza sativa* L.) nas interações entre estresse oxidativo e estresses abióticos. *Dissertação*.
- CONAB, 2019. Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar, v. 6 – Safra 2019/2020, n. 1 – Primeiro Levantamento.
- CONAB, 2020. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-deacucar>.
- Cruz de Carvalho, M. H., 2008. Drought stress and reactive oxygen species: production, scavenging and signaling. *Plant Signal. Behav.* 3, 156–165. doi: 10.4161/psb.3.3.5536
- D'Hont, A., Grivet, L., Feldmann, P., Glaszmann, J.C., Rao, S., Berding, N., 1996. Characterisation of the double genome structure of modern sugarcane cultivars

- (*Saccharum* spp.) by molecular cytogenetics. Molecular and General Genetics MGG. 250:405-413. doi: 10.1007/BF02174028
- Das, K., Roychoudhury, A., 2014. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. Front. Environ. Sci. 2:53. doi: 10.3389/fenvs.2014.00053
- Davis, M.J., Rott, P., Dean, J.L., 1994. Evaluation of selective media and immunoassays for detection of *Xanthomonas albilineans*, causal agent of sugarcane leaf scald disease. Plant Disease, v. 78, p. 78-82.
- De Dorlodot, S., Forster, B., Pages, L., Price, A., Tuberosa, R., and Draye, X., 2007. Root system architecture: opportunities and constraints for genetic improvement of crops. Trends Plant Sci. 12, 474–481.
- De Marco, E., Anjos, S.D.S., Peres, M.M., Matoso, E.S., Tatto, F.R., Boelter, J.H., Campos, A.D.S., 2017. Uso de substratos alternativos na produção de mudas de cana-de-açúcar. Revista da Jornada da Pós-graduação e Pesquisa Congrega URCAMP, Bagé, v. 1, p. 2677-2690.
- Debona, D., Rodrigues, F.A., Rios, J.A., Nascimento, K.J.T., Silva, L.C., 2014. The effect of silicon on antioxidant metabolism of wheat leaves infected by *Pyricularia oryzae*. Plant Pathol. 63, 581–589. <https://doi.org/10.1111/PPA.12119>
- Dinardo-Miranda, L.L., Vasconcelos, A.C.M., Landell, G.A., 2008 (Eds). Cana-de-Açúcar. Campinas: Instituto Agronômico, 882 p.
- Domiciano, G.P., Cacique, I.S., Freitas, C.C., Filippi, M.C.C., DaMatta, F.M., Do Vale, F.X.R., Rodrigues, F.Á., 2015. Alterations in gas exchange and oxidative metabolism in rice leaves infected by *Pyricularia oryzae* are attenuated by silicon. Phytopathology 105, 738–747. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-14-0280->
- FAO (2021) The agricultural production indices. Food and Agricultural. Organisation of the United Nations. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/%0A>>.
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2018. Disponível em: http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity.
- Farooq, M.A., Dietz, Karl-Josef., 2015. Silicon as versatile player in plant and human biology: overlooked and poorly understood. Frontiers in Plant Science, v.6, art.994. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00994>
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S.M.A., 2009. Plant drought

- stress: effects, mechanisms and management. *Agron Sustain Dev* 29:185–212
- Feng, R., Wei, C., Tu, S., 2013. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. *Environmental and Experimental Botany*, v. 87, p. 58-68.
- Ferreira, T.H.S., Tsunada, M.S., Bassi, D., Araújo, P., Mattiello, L., Guidelli, G.V., Righetto, G.L., Gonçalves, V.R., Lakshmanan, P., Menossi, M., 2017. Sugarcane Water Stress Tolerance Mechanisms and Its Implications on Developing Biotechnology Solutions. *Front. Plant Sci.* 8:1077. doi: 10.3389/fpls.2017.01077
- Garces, F.F., Gutierrez, A., Hoy, J.W., 2014. Detection and Quantification of *Xanthomonas albilineans* by qPCR and Potential Characterization of Sugarcane Resistance to Leaf Scald. *Plant Dis.*, v. 98, n. 1, p. 121-126.
- Garofalo, D., Packer, A., Ramos, N., Kondo, V., Matsuura, M.D.S., Cabral, O., 2020. Dinâmica na cultura da cana-de-açúcar no Brasil: 1990 a 2018. Jaguariúna: Embrapa: CNPMA, 41 p. (Embrapa: CNPMA. Documentos, 124).
- Gascho, G.J., Shih, S.F., 1983. Sugarcane. In: Teare ID, Peet MM (Eds.) *Crop Water Relations*. New York: John Wiley & Sons, p. 445-479.
- Ghasemi, A., Farzaneh, S., Moharramnejad, S., Sharifi, R.S., Youesf, A.F., Telesinski, A., Kalaji, H.M., Mojski, J., 2022. Impact of 24-epibrassinolide, spermine, and silicon on plant growth, antioxidant defense systems, and osmolyte accumulation of maize under water stress. *Sci Rep* 12, 14648 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18229-1>
- Gava, G.J.C., Trivelin, P.C., Oliveira, M.W., Penatti, C.P., 2001. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.36, n.11, p.1347-1354.
- Giannopolitis, C.N., Ries, S.K., 1977. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiol.* 59, 309–14. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>
- Gill, S.S., Tuteja, N., 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem.* 48, 909–930. doi: 10.1016/j.plaphy.2010.08.016
- Gomes, R.A., Gratão, P.L., Gaziola, S.A., Mazzafera, P., Lea, P.J., Azevedo, R.A., 2007. Selenium-induced oxidative stress in coffee cell suspension cultures. *Funct. Plant Biol.* 34, 449–456. <https://doi.org/10.1071/FP07010>
- Gomes-Junior, R.A., Gratão, P.L., Gaziola, S.A., Mazzafera, P., Lea, P.J., Azevedo,

- R.A., 2007. Selenium-induced oxidative stress in coffee cell suspension cultures. *Functional Plant Biology* 34:449–456. <https://doi.org/10.1071/FP07010>
- Gong, H., X. Zhu, K. Chen, S. Wang, and C. Zhang. 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Sci.* 169: 313– 321. doi:<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.02.023>
- Gratão, P.L., Monteiro, C.C., Carvalho, R.F., Tezotto, T., Piotto, F.A., Peres, L.E.P., Azevedo, R.A., 2012. Biochemical dissection of diageotropica and never ripe tomato mutants to Cdstressful conditions. *Plant Physiology and Biochemistry* 56:79–96. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.009>
- Gratão, P.L., Monteiro, C.C., Tezotto, T., Carvalho, R.F., Alves, L.R., Peters, L.P., Azevedo, R.A., 2015. Cadmium stress antioxidant responses and root-to-shoot communication in grafted tomato plants. *BioMetals (Oxford)*, v. 28, p. 803-816.
- Gratão, P.L., Polle, A., Lea, P.J., Azevedo, R.A., Gratão, P.L., Polle, A., Lea, P.J., Azevedo, R.A., 2005. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Funct. Plant Biol.* 32, 481–494. <https://doi.org/10.1071/FP05016>
- Gratão, P.L., Prasad, M.N.V., Cardoso, P.F., Lea, P. J., Azevedo, R.A., 2008. Phytoremediation: green technology for the clean up of toxic metals in the environment. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 17, n. 1, p. 53-64.
- Gutierrez, A., Garces, F.F., Hoy, J.W., 2016. Evaluation of Resistance to Leaf Scald by Quantitative PCR of *Xanthomonas albilineans* in Sugarcane. *Plant Disease*, v. 100, n. 7.
- Hakmaoui, A., Pérez-Bueno, M.L., García-Fontana, B., Camejo, D., Jiménez, A., Sevilla, F., Barón, M., 2012. Analysis of the antioxidant response of *Nicotiana benthamiana* to infection with two strains of Pepper mild mottle virus. *J Exp Bot*, 63(15):5487-96. doi: 10.1093/jxb/ers212
- Halliwell, B., Gutteridge, J., 2015. Free radicals in biology and medicine.
- Halliwell, B.; Gutteridge, J., 2007. Free Radicals in Biology and Medicine. Nova York: Oxford University Press, v. 1, n. 1, p. 1- 851.
- Han, Y., Li, P., Gong, S., Yang, L., Wen, L., Hou, M., 2016. Defense Responses in Rice Induced by Silicon Amendment against Infestation by the Leaf Folder *Cnaphalocrocis medinalis*. *PLoS One* 11, e0153918. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0153918>

- Hasan, M.K., Liu, C., Wang, F., Ahammed, G.J., Zhou, J., Xu, M.X., Xia, X.J., 2016. Glutathione-mediated regulation of nitric oxide, S-nitrosothiol and redox homeostasis confers cadmium tolerance by inducing transcription factors and stress response genes in tomato. *Chemosphere*, v. 161, p. 536-545.
- Hashimi, S.M., Wall, M.K., Smith, A.B., Maxwell, A., Birch, R.G., 2007. The phytotoxin albicidin is a novel inhibitor of DNA gyrase. *Antimicrob. Agents Chemother.* 51, 181–187. <https://doi.org/10.1128/AAC.00918-06>
- Hattori, T., Inanaga, S., Tanimoto, E., Lux, A., Luxova, M., Sugimoto, Y., 2003. Silicon induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. *Plant and Cell Physiology*, v.44, p.743–749. doi: 10.1093/pcp/pcg090
- Hidalgo-Santiago, L., Navarro-León, E., López-Moreno, F.J. Arjó, G., González, L.M., Ruiz, R.M. Blasco, B., 2021. The application of the silicon-based biostimulant Codasil® offset water deficit of lettuce plants, *Scientia Horticulturae*, v. 285, 110177, ISSN 0304-4238, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110177>.
- Hoagland, D.R., Arnon, D.L., 1950. The water culture methods for growing plants without soil. *Circular*, v.347, p.32.
- Hodges, D. M., DeLong, J. M., Forney, C. F., and Prange, R. K., 1999. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds. *Planta* 207, 604–611. doi: 10.1007/s004250050524
- Hong, D. kai, Talha, J., Yao, Y., Zou, Z. yuan, Fu, H. ying, Gao, S. ji, Xie, Y., Wang, J. da, 2021. Silicon enhancement for endorsement of *Xanthomonas albilineans* infection in sugarcane. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 220, 112380. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112380>
- Huang, H., Ullah, F., Zhou, D.X., Yi, M., Zhao, Y., 2019. Mechanisms of ROS regulation of plant development and stress responses. *Front. Plant Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00800>
- Ibrahim, M.F.M., El-Samad, G.A., Ashour, H., El-Sawy, A.M., Hikal, M., Elkelish, A., El-Gawad, H.A., El-Yazied, A.A., Hozzein, W.N., Farag, R., 2020. Regulation of agronomic traits, nutrient uptake, osmolytes and antioxidants of maize as influenced by exogenous potassium silicate under deficit irrigation and semiarid conditions. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081212>

- Inman-Bamber, N.G., 2004. Sugarcane water stress criteria for irrigation and dryin off. *Field Crops Research*, v.89, p.107-122.
- Inman-Bamber, N.G., Bonnett, G.D., Spillman, M.F., Hewitt, M.L., Jackson, J., 2008. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. *Australian Journal of Agricultural Research*, v.59, p.13-26.
- Inman-Bamber, N.G., Lakshmanan, P., Park, S., 2012. Sugarcane for water-limited environments: Theoretical assessment of suitable traits. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.134, p.95–104.
- Inman-Bamber, N.G., Smith, D.M., 2005. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crop. Res.*, v. 92, p. 185-202, 10.1016/j.fcr.2005.01.023
- Jain, R., Chandra, A., Venugopalan, V., Solomon, S., 2015. Physiological changes and expression of SOD and P5CS genes in response to water deficit in sugarcane. *Sugar Tech* 17:276–282. <https://doi.org/10.1007/s12355-014-0317-2>
- Jesus, H.I., Medeiros, M.L.S., Lopes, M.F.Q., Olibveira, B.S., Silvas, G.M., Mielezrski, F. 2019. Development and gas Exchange of pre-sprouted sugarcane seedlings in three diferente growing substrate media. *Journal of Experimental Agriculture International*, Hooghly, v. 32, n. 4, p. 1-7. <http://dx.doi.org/10.9734/jeai/2019/v32i430114>
- Kim, Y.H., Khan, A.L., Waqas, M., Lee, I.J., 2017. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A review. *Frontiers in Plant Science*, 8, 510. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00510>
- Korndörfer, G.H., Pereira, H.S., Nolla, A., 2004. Análise de silício no solo, planta e fertilizantes. Uberlândia: UFU, 50p.
- Kraska, J.E., Breitenbeck, G.A., 2010. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 41:2075–2085. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>
- Lacerda, A.R.S., Souza, A.R., Santos, T.M., Clemente, J.M., Duarte, A.R., Machado, M.G., 2019. Produtividade da cana-de-açúcar em resposta a adubação NPK em diferentes épocas. *Humanidades & Tecnologia em Revista*, v. 18.
- Landell, M.G.A., Campana, M.P., Figueiredo, P., Xavier, M.A., Anjos, I.A., Dinardo Miranda, L.L., Scarpari, M.S., Garcia, J.C., Bidóia, M.A.P., Silva D.N., Mendonça,

- J.R., Kanthack, R.A.D., Campos, M.F., Brancalião, S.R., Petri, R.H., Miguel, P.E.M., 2012. Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas. Campinas: IAC, 16p.
- Lichtenthaler, H.K., 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in enzymology*, v. 148, p. 350-382.
- Lichtenthaler, H.K., Buschmann, C., Knapp, M., 2005. How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio R Fd of leaves with the PAM fluorometer. *Photosynthetica*, v.43, p.379-393.
- Liu, S.L., Yang, R.J., Ma, M.D., Dan, F., Zhao, Y., Jiang, P., Wang, M.H., 2015. Effects of exogenous NO on the growth, mineral nutrient content, antioxidant system, and ATPase activities of *Trifolium repens* L. plants under cadmium stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 37, p. 1-16.
- Manquían-Cerda, K., Escudey, M., Zúñiga, G., Arancibia-Miranda, N., Molina, M., Cruces, E., 2016. Effect of cadmium on phenolic compounds, antioxidant enzyme activity and oxidative stress in blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) plantlets grown in vitro. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 133, p. 316-326.
- Manhães, C.M.C., Garcia, R.F., Francelino, F.M.A., Francelino, H.O., Coelho, F.C., 2015. Factors that affect sprouting and tillering of sugar cane. *Revista Vértices* 17:163–181. <https://doi.org/10.5935/1809-2667.20150011>
- Marchiori, P.E.R., Machado, E.C., Sales, C.R.G., Espinoza-Núñez, E., Magalhães Filho, J.R., Souza, G.M., Pires, R.C.M., Ribeiro, R.V., 2017. Physiological plasticity is important for maintaining sugarcane growth under water deficit. *Frontiers in Plant Science* 8:1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02148>
- Marschner, H., 1995. Mineral nutrition of higher plants.. 2.ed. San Diego: Academic Press, 889 p.
- Martins, A.P.C., Albrecht, L.P., Castaldo, J., Carneiro, R., Zucareli, V., 2015. Novas tecnologias no plantio de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). *Journal of Agronomic Sciences* 4: 301–317.
- Meng, J.Y., Ntambo, M.S., Rott, P.C., Fu, H.Y., Huang, M.T., Zhang, H.L., Gao, S.J., 2020a. Identification of differentially expressed proteins in sugarcane in response to infection by *xanthomonas albilineans* using iTRAQ quantitative proteomics.

- Microorganisms 8. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8010076>
- Mensi, I., Vernerey, M.S., Gargani, D., Nicole, M., Rott, P., 2014. Breaking dogmas: The plant vascular pathogen *Xanthomonas albilineans* is able to invade non-vascular tissues despite its reduced genome. *Open Biol.* 4. <https://doi.org/10.1098/rsob.130116>
- Miller, G., Suzuki, N., Ciftci-Yilmaz, S., and Mittler, R., 2010. Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. *Plant Cell Environ.* 33, 453–467. doi: 10.1111/j.1365-3040.2009.02041.x
- Ming, R., Moore, P.H., Wu, K.K., D'Hont, A., Glaszmann, J.C., Tew, T.L., Mirkov, T.E., da Silva, J., Jifon, J., Rai, M., Schnell, R.J., Brumbley, S.M., Lakshmanan, P., Comstock, J.C., Paterson, A.H., 2006. Sugarcane improvement through breeding and biotechnology. *Plant Breeding Reviews* 27, 15– 118. <https://doi.org/10.1002/9780470650349.ch2>
- Mitani, N., Yamaji, N., Ma, J.F., 2009. Identification of maize silicon influx transporters. *Plant Cell Physiol* 50:5–12. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn110>
- Mittler, R., 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, v.7, n.9. doi: 10.1016/s1360-1385(02)02312-9
- Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M., and Van Breusegem, F., 2004. Reactive oxygen gene network of plants. *Trends Plant Sci.* 9, 490–498. doi: 10.1016/j.tplants.2004.08.009
- Mittler, R., Vanderauwera, S., Suzuki, N., Miller, G., Tognetti, V. B., Vandepoele, K., et al., 2011. ROS signaling: the new wave? *Trends Plant Sci.* 16, 300–309. doi: 10.1016/j.tplants.2011.03.007
- Molinari, H.B.C., Marur, C.J., Daros, E., Campos, M.K.F., Carvalho, J.F.R.P., Bessalho Filho, J.C., Pereira, L.F.P., Vieira, L.G.E., 2007. Evaluation of the stress-inducible production of proline in transgenic sugarcane (*Saccharum* spp.): Osmotic adjustment, chlorophyll fluorescence and antioxidative stress. *Physiol. Plant.*, 130, 218–225.
- Montes, R.M., Montes, S.M.N.M., Raga, A., 2015. O uso do silício no manejo de pragas. *Documento Técnico*, v. 17, p. 1-13.
- Noctor, G.; Foyer, C.H., 1998. Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. *Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology*, v. 49, p. 249-

279.

- Ntambo, M.S., Meng, J.Y., Rott, P.C., Henry, R.J., Zhang, H.L., Gao, S.J., 2019. Comparative transcriptome profiling of resistant and susceptible sugarcane cultivars in response to infection by *xanthomonas albilineans*. *Int. J. Mol. Sci.* 20. <https://doi.org/10.3390/ijms20246138>
- Osmolovskaya, N., Shumilina, J., Kim, A., Didio, A., Grishina, T., Bilova, T., Keltsieva, O.A., Zhukov, V., Tikhonovich, I., Tarakhovskaya, E., et al., 2018. Methodology of Drought Stress Research: Experimental Setup and Physiological Characterization. *Int. J. Mol. Sci.*, 19, 4089. <https://doi.org/10.3390/ijms19124089>
- Pei, Z.F., Ming, D.F., Liu, D., Wan, G.L., Geng, X.X., Gong, H.J., Zhou, W.J., 2010. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *J Plant Growth Regul* 29:106–115. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9120-9>
- Peters, L.P., Carvalho, G., Vilhena, M.B., Creste, S., Azevedo, R.A., Monteiro-Vitorello, C.B., 2017. Functional analysis of oxidative burst in sugarcane smut-resistant and -susceptible genotypes. *Planta* 245, 749–764. <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2642-z>
- Pieretti, I., Pesic, A., Petras, D., Royer, M., Süssmuth, R.D., Cociancich, S., 2015. What makes *Xanthomonas albilineans* unique amongst xanthomonads? *Front. Plant Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00289>
- Pilon, C., Soratto, R.P., Broetto, F., Fernandes, A.M., 2014. Foliar or Soil Applications of Silicon Alleviate Water-Deficit Stress of Potato Plants. *Crop Ecology & Physiology*. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0176>
- Pinto, L.E.V., Spósito, T.H.N., Godinho, A.M.M., Martins, F.M., 2016. Produção de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar em função de diferentes substratos. *Colloquium Agrariae*, v. 12, p. 93-99. Número especial. <http://dx.doi.org/10.5747/ca.2016.v12.nesp.000177>
- Ramesh, P., 2000. 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* 185:83–89. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2000.00404.x>
- Resende, R.S., Rodrigues, F.Á., Cavatte, P.C., Martins, S.C.V., Moreira, W.R.,

- Chaves, A.R.M., DaMatta, F.M., 2012. Leaf gas exchange and oxidative stress in sorghum plants supplied with silicon and infected by *colletotrichum sublineolum*. *Phytopathology* 102, 892–898. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-12-0014-R>
- Ricaud, C., Egan, B.T., Gillaspie, A.G, Hughes, C.G., 2012. Diseases of sugarcane: major diseases. In: Ricaud, C.; Egan, B. T.; Gillaspie, A. G.; Hughes, C. G.; Eds., Elsevier, p. 39-58.
- Robertson, M.J., Wood, A.W., Muchow, R.C., 1996. Growth of sugarcane high input conditions in tropical Australia.I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. *Field CropsResearch*, Amsterdam, v.48, p.11-25. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00041-X](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00041-X)
- Rodrigues ,G.S.S.C., Ross, J.L.S., 2020. A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental. EDUFU. P. 268. [doi:10.14393/EDUFU/978-65-86084-00-9](https://doi.org/10.14393/EDUFU/978-65-86084-00-9).
- Rott, P., Davis, M.J., 2000. Leaf scald. In: Rott P, Bailey RA, Comstock JC, Croft BJ, Saumtally AS (eds) *A guide to sugarcane diseases*. La Librairie du Cirad, Montpellier, p. 38–44.
- Rott, P., Mohamed, I.S., Klett, P., Soupa, D., DE Saint-Albin, A., Feldmann, P., Letourmy, P., 1997. Resistance to leaf scald disease is associated with limited colonization of sugarcane and wild relatives by *Xanthomonas albilineans*. *Phytopathology*, v. 87, p. 1202-1213.
- Santos, F., Borém, A., 2013. *Cana-de-açúcar: do plantio a colheita*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 257 p.
- Saumtally, A.S., Dookun-Saumtally, A., 2004. Leaf scald of sugarcane: a disease of worldwide importance. Rao, GP; Saumtally, AS; Rott, P. *Sugarcane pathology: bacterial and nematode diseases*. New Hampshire: Science Publishers, v. 3, p. 65-76.
- Scholander, P.F., Hammel, H.T., Hemmingsen, E.A., Bradstreet, E.D., 1965. Sap pressure in vascular plants. *Sciencem*, v. 148, p. 339-346.
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., and Pessarakli, M., 2012. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *J. Bot.* 2012, 26. [doi: 10.1155/2012/217037](https://doi.org/10.1155/2012/217037)
- Shrivastava, A.K., Solomon, S., Rai, R.K., Singh, P., Chandra, A., Jain, R., Shukla,

- S.P., 2015. Physiological Interventions for Enhancing Sugarcane and Sugar Productivity. *Sugar Tech* 17:215-226. doi:10.1007/s12355-014-0321-6
- Szabados, L., Saviouré, A., 2010. Proline: a multifunctional amino acid. *Trends Plant Sci* 15:89–97. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009>
- Shulaev, V., Oliver, D.J., 2006. Metabolic and proteomic markers for oxidative stress. New tools for reactive oxygen species research. *Plant Physiol.* 141, 367–372. doi: 10.1104/pp.106.077925
- Stirbet, A., Govindjee, 2011. On the relation between the Kautsky effect (chlorophyll a fluorescence induction) and photosystem II: basics and applications. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, 104, pp. 236-257.
- Silveira, J.A.G., Silva, S.L.F., Silva, E.N., Viégas, R.A., 2010. Mecanismos biomoleculares envolvidos com a resistência ao estresse salino em plantas. *Ciência Rural* 45, 884–891.
- Singleton, V.L., Rossi, J.A.Jr., 1965. Colorimetry to total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *Am. J. Enol. Vinic.* 16, 144–158. doi:10.5344/ajev.1965.16.3.144
- Snyder, G.H., Matichenkov, V., Datnoff, L.E., 2007. Silicon. In: Barker, A. V.; Pilbem, D.J. *Handbook of plant nutrition*. Boca Raton: Taylor & Francis, p. 551-568.
- Snyder, G.H., Matichenkov, V. Datnoff, L.E. 2007. Silicon. In: Barker, A.V., Pilbem, D.J. *Handbook of plant nutrition*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2007. p. 551-568.
- Teodoro, P.E., Ribeiro, L.P., Oliveira, E.P., Corrêa, C.C.G., Torre, F.E., 2015. Acúmulo de massa seca na soja em resposta a aplicação foliar com silício sob condições de déficit hídrico. *Biosci. J.*, v. 31, n. 1, p. 161-170.
- Tsimogiannis, D., Oreopoulou, V., 2019. Classification of phenolic compounds in plants. In *Polyphenols in Plants* (pp. 263–284). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813768-0.00026-8>
- Taiz L., Zeiger, E., 2013 (Eds.) *Plant Physiology*. Massachusetts: Sinauer Associates, 782p.
- Tardiani, A., Perecin, D., Junior, R., Sanguino, A., Landell, M., Beriam, L., Nunes, D., Camargo, L., Creste, S., 2014. Molecular and Pathogenic Diversity Among Brazilian Isolates of *Xanthomonas albilineans* Assessed with SSR Marker Loci.

- Plant Disease. 98. 540-546. 10.1094/PDIS-07-13-0762-RE.
- Tardieu, F., 2012. Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: just design the right drought scenario. *J. Exp. Bot.* 63, 25–31.
- Tardieu, F., 2013. Plant response to environmental conditions: assessing potential production, water demand, and negative effects of water deficit. *Front. Physio.* 4:17. doi: 10.3389/fphys.2013.00017
- Tardieu, F., Bruckler, L., and Lafolie, F., 1992. Root clumping may affect the root water potential and the resistance to soil-root water transport. *Plant Soil* 140, 291–301.
- Teixeira, G.C.M., de Mello Prado, R., Rocha, A.M.S., 2021a. Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. *J. Agron. Crop Sci.* <https://doi.org/10.1111/JAC.12511>
- Teixeira, G.C.M., Mello Prado, R. de, Rocha, A.M.S., Silveira Sousa Junior, G. da, Gratão, P.L., 2021b. Beneficial Effect of Silicon Applied Through Fertigation Attenuates Damage Caused by Water Deficit in Sugarcane. *J. Plant Growth Regul.* 1–16. <https://doi.org/10.1007/S00344-021-10510-3/FIGURES/10>
- Teixeira, G.C.M., Prado, R. de M., Rocha, A.M.S., dos Santos, L.C.N., dos Santos Sarah, M.M., Gratão, P.L., Fernandes, C., 2020. Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 20, 849–859. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4>
- Teixeira, G.C.M., Prado, R.M., Rocha, A.M.S., 2021. Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. *Journal of Agronomy and Crop Science* 00, 1–10. <https://doi.org/10.1111/jac.12511>
- Teixeira, G.C.M., de Prado, R.M., Rocha, A.M.S. et al., 2022. Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. *Sci Rep* 12, 17487. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9>
- VanLoon, L.C., 1998. Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria. *Annu. Rev. Phytopathol.* 36, 453– 483. <http://doi.org/10.1146/annurev.phyto.36.1.453>
- Verbruggen, N., Hermans, C., 2008. Proline accumulation in plants: a review. *Amino Acids* 35, 753–759. doi: 10.1007/s00726-008-0061-6

- Verma, K.K., Liu, X., Wu, K., Singh, R.K., Song, Q.Q., Malviya, M.K., Song, X.P., Singh, P., Verma, C.L., Li, Y.-R., 2019. The Impact of Silicon on Photosynthetic and Biochemical Responses of Sugarcane under Different Soil Moisture Levels. *Silicon*.
- Verma, K.K., Song, X.P., Li, D.M., Singh, M., Rajput, V.D., Malviya, M.K., Minkina, T., Singh, R.K., Singh, P., Li, Y.R., 2020. Interactive role of silicon and plant–rhizobacteria mitigating abiotic stresses: a new approach for sustainable agriculture and climate change. *Plants*, 9, p. 1055, 10.3390/plants9091055
- Vilela, M., Moraes, J.C., Alves, E., Santos-Cividanes, T.M., Santos, F.A., 2014. Resistencia inducida a *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) vía aplicación de silicio. *Rev. Colomb. Entomol.* 40 (1): 44-48.
- Yang, L., Han, Y., Li, P., Li, F., Ali, S., Hou, M., 2017. Silicon amendment is involved in the induction of plant defense responses to a phloem feeder. *Sci. Reports*. 7, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04571-2>
- Yoshida, S., 1965. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. *Bulletin of the National Institute of Agricultural Sciences Series B* 15:1-58.
- Wahid, A., Close, T.J., 2007. Expression of dehydrins under heat stress and their relationship with water relations of sugarcane leaves. *Biol. Plant.*, 51, 104–109.
- Zhang, C.J.M., Moutinho-Pereira, C., Correia, J., Coutinho, A., Gonçalves, A. Guedes, J. Gomes-Laranjo., 2013. Foliar application of Sili-K® increases chestnut (*Castanea* spp.) growth and photosynthesis, simultaneously increasing susceptibility to water deficit. *Plant Soil*. 365: 211– 225. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1385-2>
- Zhang, H.L., Ntambo, M.S., Rott, P.C., Chen, G., Chen, L.L., Huang, M.T., Gao, S.J., 2020. Complete genome sequence reveals evolutionary and comparative genomic features of *xanthomonas albilineans* causing sugarcane leaf scald. *Microorganisms* 8. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020182>
- Zhao, D., Irey, M., Laborde, C., Hu, C.J., 2017. Identifying physiological and yield-related traits in sugarcane and energy cane. *Agronomy Journal* 109:927–937. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.10.0585>
- Zhao, D., Irey, M., Laborde, C., Hu, C.J., 2019. Physiological and yield characteristics of 18 sugarcane genotypes grown on a sand soil. *Crop Science* 59:2741–2751.

<https://doi.org/10.2135/cropsci2019.02.0107>

Zhu, Z., Wei, G., Li, J., Qian, Q., Yu, J., 2004. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). Plant Sci. 167, 527–533.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.04.020>