

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar sob teores contrastantes de silício no solo e predição do elemento por espectroscopia no infravermelho próximo

Pedro Henrique Silva Ferreira
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

PEDRO HENRIQUE SILVA FERREIRA

Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar sob teores contrastantes de silício no solo e predição do elemento por espectroscopia no infravermelho próximo

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Marcio H. Pereira Barbosa

Coorientador: Edson Marcio Mattiello

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

F383d
2025
Ferreira, Pedro Henrique Silva, 1991-
Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar sob teores
contrastantes de silício no solo e predição do elemento por
espectroscopia no infravermelho próximo / Pedro Henrique Silva
Ferreira. – Viçosa, MG, 2025.

1 tese eletrônica (57 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Márcio Henrique Pereira Barbosa.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Agronomia, 2025.

Referências bibliográficas: f.37-39.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.471>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Cana-de-açúcar - Melhoramento genético.
2. Cana-de-açúcar - Efeito do silício. 3. Produtividade agrícola.
4. Análise de regressão. 5. Espectroscopia de infravermelho.
I. Barbosa, Márcio Henrique Pereira, 1966-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Agronomia. Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia. III. Título.

CDD 22. ed. 633.612

PEDRO HENRIQUE SILVA FERREIRA

Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar sob teores contrastantes de silício no solo e predição do elemento por espectroscopia no infravermelho próximo

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 7 de julho de 2025.

Assentimento:

Pedro Henrique Silva Ferreira
Autor

Marcio Henrique Pereira Barbosa
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 21/07/2025 às 17:00:24 e pelo orientador em 22/07/2025 às 09:10:56. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **GXOX.UJAD.UQM8** e clique no botão 'Validar documento'.

Dedico esta tese aos meus sobrinhos, Emanuele, Lucas e Francisco,
cujas vidas iluminam a minha com alegria, leveza e inspiração.
Que este trabalho represente, para vocês, o valor da dedicação e do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre guiar meus passos e iluminar meus caminhos.

Aos meus pais, João Batista Ferreira e Clélia Rosa da Silva Ferreira, pelo amor, ensinamentos, incentivos, orações e por sempre acreditarem em mim.

À minha esposa, Rebeca Lourenço de Oliveira, pelo amor, carinho e apoio incondicional.

À minha avó Olinda Rosa da Silva, à minha irmã Angélica Paiva Silva Ferreira e ao meu avô Francisco Paula Ferreira, pelo carinho e orações.

A todos os meus familiares e amigos, pelo apoio, incentivo e orações.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela excelência em todos os âmbitos e pela oportunidade de realização deste curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao orientador, Márcio Henrique Pereira Barbosa, pelos ensinamentos, orientação, confiança, motivação e pela oportunidade de trabalhar no Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar da UFV (PMGCA/UFV).

A todos os colaboradores do Centro de Pesquisa e Melhoramento de Cana-de-Açúcar (CECA/PMGCA/UFV), pelo apoio fundamental e profissionalismo na execução das atividades.

A todos os colegas do PMGCA/UFV, pelo apoio e companheirismo. Em especial, agradeço ao Hudson, João Victor, Thiago, Renan, Augusto, Felipe, Milene, Danival e Bruno.

Aos doutores Cristian Mauricio Vega Cuichán e Wilson J. Cardoso, pelo suporte fundamental nas análises químicas de silício e na espectroscopia NIR.

Aos membros da banca de qualificação e de defesa da tese, pelas contribuições e conselhos.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pela concessão de horário especial para servidor estudante.

Aos colegas da UFRRJ Campus Campos dos Goytacazes, pelo apoio e incentivo.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução deste trabalho.

Por último, mas com igual importância, agradeço a mim mesmo por acreditar nas minhas ideias, confiar no meu caminho e nunca desistir.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível

Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

FERREIRA, Pedro Henrique Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2025. **Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar sob teores contrastantes de silício no solo e predição do elemento por espectroscopia no infravermelho próximo.** Orientador: Marcio Henrique Pereira Barbosa. Coorientador: Edson Marcio Mattiello.

O silício (Si) é reconhecido como um elemento benéfico para as plantas, especialmente sob condições de estresse biótico e abiótico. Na cana-de-açúcar, o Si tem se mostrado eficaz na mitigação desses estresses, além de contribuir para o aumento da produtividade. Evidências indicam ampla variabilidade genética entre genótipos de cana-de-açúcar quanto à capacidade de absorção e utilização do Si presente no solo, o que viabiliza a seleção de materiais mais eficientes. O primeiro capítulo deste trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho agrônomo de 50 genótipos de cana-de-açúcar cultivados em solo com teores contrastantes de Si. Também buscou-se identificar genótipos eficientes e responsivos ao Si, além daqueles com maior teor do elemento na parte aérea. A maior disponibilidade de Si no solo promoveu aumentos de 28,6% no número de colmos por planta e de 32,7% na produção de matéria seca da parte aérea. Foram identificados três genótipos simultaneamente eficientes e responsivos, bem como dois materiais com elevado teor de Si na parte aérea. O segundo capítulo teve como objetivo desenvolver e validar modelos de regressão multivariada para predição do teor de Si em diferentes partes da cana-de-açúcar, utilizando espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). A técnica, associada à regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) e ao método de seleção dos preditores ordenados (OPS), apresentou desempenho preditivo satisfatório, com coeficientes de correlação da predição (R_p) de 0,92 para folha TVD (*Top Visible Dewlap*), 0,96 para folhas totais, 0,97 para colmos e 0,92 para parte aérea. Os resultados obtidos neste trabalho fornecem importantes informações para futuras pesquisas sobre o Si no contexto do programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar. A utilização da espectroscopia NIR otimiza o processo de seleção de genótipos, tornando-o mais rápido, econômico e eficiente.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; melhoramento vegetal; NIR; regressão multivariada; elemento benéfico

ABSTRACT

FERREIRA, Pedro Henrique Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2025. **Performance of sugarcane genotypes under contrasting soil silicon contents and prediction of the element by near-infrared spectroscopy.** Adviser: Marcio Henrique Pereira Barbosa. Co-adviser: Edson Marcio Mattiello.

Silicon (Si) is recognized as a beneficial element for plants, particularly under biotic and abiotic stress conditions. In sugarcane, Si has proven effective in mitigating these stresses and contributes to increased productivity. Evidence indicates considerable genetic variability among sugarcane genotypes in terms of their capacity to absorb and utilize Si from the soil, enabling the selection of more efficient materials. The first chapter of this study aimed to evaluate the agronomic performance of 50 sugarcane genotypes grown in soils with contrasting Si levels. Additionally, the study sought to identify genotypes that are both efficient and responsive to Si, as well as those exhibiting higher Si accumulation in the aerial parts. Greater Si availability in the soil promoted increases of 28.6% in the number of stalks per plant and 32.7% in aboveground dry matter production. Three genotypes were identified as both efficient and responsive, and two others showed high Si content in the aerial parts. The second chapter aimed to develop and validate multivariate regression models for predicting Si content in different sugarcane tissues using near-infrared (NIR) spectroscopy. The technique, combined with partial least squares (PLS) regression and ordered predictor selection (OPS), demonstrated satisfactory predictive performance, with prediction correlation coefficients (R_p) of 0.92 for the top visible dewlap (TVD) leaf, 0.96 for total leaves, 0.97 for stalks, and 0.92 for the whole aboveground plant. The findings of this study provide valuable insights for future research on Si within the context of sugarcane breeding programs. The application of NIR spectroscopy streamlines genotype selection, making the process faster, more cost-effective, and efficient.

Keywords: *Saccharum* spp.; plant breeding; NIR; multivariate regression; beneficial element

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	9
REFERÊNCIAS.....	11
CAPÍTULO 1 – DESEMPENHO DE GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB TEORES CONTRASTANTES DE SILÍCIO NO SOLO.....	13
RESUMO.....	13
1 INTRODUÇÃO	14
2 MATERIAL E MÉTODOS	15
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4 CONCLUSÕES	34
REFERÊNCIAS.....	35
CAPÍTULO 2 – PREDIÇÃO DO TEOR DE SILÍCIO EM CANA-DE-AÇÚCAR POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO	40
RESUMO.....	40
1 INTRODUÇÃO	41
2 MATERIAL E MÉTODOS	42
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
REFERÊNCIAS.....	54
APÊNDICE.....	57

INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das culturas agrícolas mais importantes para a economia brasileira. De acordo com o FAOSTAT (FAO, 2023), o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Na safra 2024/25, foram colhidas 677 milhões de toneladas em uma área de aproximadamente 8,77 milhões de hectares, com produtividade média de 77,2 t ha⁻¹ (Conab, 2025). Esses números evidenciam a capacidade de adaptação da cultura a diversas condições climáticas e edáficas.

Apesar disso, fatores adversos podem comprometer o potencial produtivo da cultura. Na mesma safra, o estado do Amazonas obteve a maior produtividade (91,3 t ha⁻¹), enquanto estados como Sergipe e Rio de Janeiro registraram valores inferiores a 48 t ha⁻¹ (Conab, 2025). Essa variabilidade pode ser explicada, em parte, pela ocorrência de estresses bióticos e abióticos que limitam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Entre os principais fatores associados à redução de produtividade estão estresse hídrico, deficiências e desequilíbrios nutricionais, salinidade, acidez do solo, acamamento e ataques de pragas e doenças (Dias; Sentelhas, 2018; Lobell; Cassaman; Field, 2009).

Na literatura, diversos estudos reconhecem o silício (Si) como um elemento benéfico para as plantas, especialmente sob condições de estresse. Embora não essencial, o Si está associado à mitigação de diversos estresses bióticos e abióticos, como toxicidade por metais, salinidade, estresse hídrico e térmico, além de conferir maior resistência a patógenos e insetos (Ma; Yamaji, 2006; Guntzer *et al.*, 2012; Meena *et al.*, 2021). Os efeitos do Si foram reportados em diferentes culturas, como arroz, milho, trigo, tomate e soja (Meena *et al.*, 2013; Liang *et al.*, 2015; Bakhat *et al.*, 2018; Zargar *et al.*, 2019).

Na cana-de-açúcar, o Si tem demonstrado efeitos positivos sobre a tolerância ao estresse hídrico e salino, bem como na redução da incidência de doenças, como carvão, escaldadura e ferrugem marrom e danos causados por pragas como a broca-do-colmo e a cigarrinha-das-raízes (Ashraf *et al.*, 2010; Bezerra *et al.*, 2019; Camargo *et al.*, 2020; Deng *et al.*, 2020; Hong *et al.*, 2021; Korndorfer; Grisoto; Vendramim, 2011; Oliva *et al.*, 2021). Além disso, o Si contribui para o aumento da produtividade e melhoria da qualidade da matéria-prima (Dutra *et al.*, 2023; Frazão *et al.*, 2020).

Estudos indicam a existência de variabilidade genética entre genótipos de cana-de-açúcar quanto à capacidade de absorção e utilização do Si presente no solo (Camargo *et al.*, 2010; Deren; Flaz; Snyder, 1993). Essa variabilidade representa uma oportunidade para o desenvolvimento de genótipos mais eficientes por meio de melhoramento genético. Contudo, há escassez de informações sobre a variabilidade presente no germoplasma dos programas

brasileiros de melhoramento, o que limita estratégias de seleção com base na eficiência de utilização de Si.

Para avaliação em larga escala de genótipos quanto à absorção e utilização de Si, é necessário dispor de metodologias rápidas, precisas e ambientalmente seguras. Os métodos químicos convencionais, embora acurados, requerem uso de reagentes perigosos, infraestrutura laboratorial especializada e possuem baixo rendimento operacional. Nesse contexto, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) surge como uma ferramenta promissora. A técnica é rápida, não utiliza reagentes e pode minimizar etapas de preparo de amostras. Entretanto, estudos sobre a aplicação da técnica para predição do teor de Si na cana-de-açúcar ainda são incipientes.

Diante do exposto, assume-se as hipóteses: *i)* existe variabilidade genética entre os genótipos de cana-de-açúcar quanto à absorção e utilização de Si; e *ii)* modelos de regressão multivariada podem prever com exatidão o teor de Si em diferentes partes da planta a partir de dados NIR. Assim, este trabalho teve como objetivos: *i)* avaliar o desempenho agrônomo de 50 genótipos cultivados em solo com teores contrastantes de Si; *ii)* identificar genótipos simultaneamente eficientes, responsivos e com alto teor de Si na parte aérea; *iii)* desenvolver e validar modelos de regressão utilizando dados NIR para a predição do teor de Si em diferentes partes da cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

- ASHRAF, M.; RAHMATULLAH; AFZAL, M.; AHMED, R.; MUJEEB, F.; SARWAR, A.; ALI, L. Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant and Soil**, v. 326, p. 381-391, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0019-9>
- BAKHAT, H. F.; BIBI, N.; ZIA, Z.; ABBAS, S.; HAMMAD, H. M.; FAHAD, S.; ASHRAF, M. R.; SHAH, G. M.; RABBANI, F.; SAEED, S. Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review. **Crop Protection**, v. 104, p. 21-34, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.008>
- BEZERRA, B. K. L.; LIMA, G. P. P.; REIS, A. R.; SILVA, M. D. A.; CAMARGO, M. S. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, p. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>
- CAMARGO, M. S.; COUTINHO, I. D.; LOURENÇO, S. A.; SOARES, M. K. M.; COLNAGO, L. A.; APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CAVALHEIRO, A. J.; AMORIM, L. Potential prophylactic role of silicon against brown rust (*Puccinia melanocephala*) in sugarcane. **European Journal of Plant Pathology**, v. 157, p. 77-88, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-01982-2>
- CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; FOLTRAN, D. E.; HENRIQUE, C. M.; ROSSETTO, R. Absorção de silício, produtividade e incidência de *Diatraea saccharalis* em cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 69, n. 4, p. 937-944, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000400020>
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar – Safra 2024/25 - Quarto levantamento, Brasília, DF, v.12, n.4, abril 2025.
- DENG, Q.; WU, J.; CHEN, J.; SHEN, W. Physiological mechanisms of improved smut resistance in sugarcane through application of silicon. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.568130>
- DEREN, C. W.; GLAZ, B.; SNYDER, G. H. Leaf-tissue silicon content of sugarcane genotypes grown on everglades histosols. **Journal of Plant Nutrition**, v. 16, n. 11, p. 2273-2280, 1993. <https://doi.org/10.1080/01904169309364685>
- DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil—A multi-model approach for determining magnitudes and causes. **Science of the total environment**, v. 637, p. 1127-1136, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.017>
- DUTRA, A. F.; LEITE, M. R. L.; MELO, C. C. F.; AMARAL, D. S.; SILVA, J. L. F.; PRADO, R. M.; PICCOLO, M. C.; MIRANDA, R. S.; SILVA JUNIOR, G. B.; SOUSA, T. K. S. A.; MENDES, L. W.; ARAUJO, A. S. F.; ZUFFO, A. M.; ALCANTARA NETO, F. Soil and foliar Si fertilization alters elemental stoichiometry and increases yield of sugarcane cultivars. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 16040, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43351-z>

FAO. (2023). FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>

FRAZAO, J. J.; PRADO, R. M.; SOUZA JUNIOR, J. P.; ROSSATTO, D. R. Silicon changes C: N: P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 12492, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69310-6>

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, n. 1, p. 201-213, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8>

HONG, D. K.; TALHA, J.; YAO, Y.; ZOU, Z. Y.; FU, H. Y.; GAO, S. J.; XIE, Y.; WANG, J. Silicon enhancement for endorsement of *Xanthomonas albilineans* infection in sugarcane. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 220, p. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112380>

KORNDORFER, A. P.; GRISOTO, E.; VENDRAMIM, J. D. Induction of insect plant resistance to the spittlebug *Mahanarva fimbriolata* Stål (Hemiptera: Cercopidae) in sugarcane by silicon application. **Neotropical Entomology**, v. 40, n. 3, p. 387-392, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2011000300013>

LIANG, Y.; NIKOLIC, M.; BELANGER, R.; GONG, H.; SONG, A. Effect of Silicon on Crop Growth, Yield and Quality. In: **Silicon in Agriculture: From Theory to Practice**. Dordrecht: Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2>

LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. **Annual review of environment and resources**, v. 34, n. 1, p. 179-204, 2009. <https://doi.org/10.1146/annurev.envIRON.041008.093740>

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, n. 8, p. 392-397, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>

MEENA, V. D.; DOTANIYA, M. L.; COUMAR, V.; RAJENDIRAN, S.; AJAY; KUNDU, S.; SUBBA RAO, A. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. **Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences**, v. 84, n. 3, p. 505-518, 2013. <https://doi.org/10.1007/s40011-013-0270-y>

MEENA, V.; DOTANIYA, M. L.; SAHA, J. K.; PATRA, A. K. Silicon potential to mitigate plant heavy metals stress for sustainable agriculture: a review. **Silicon**, p. 1-16, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01200-6>

OLIVA, K. M. E.; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M.; OLIVEIRA, E. C. A.; NASCIMENTO, C. W. A. Amorphous silica-based fertilizer increases stalks and sugar yield and resistance to stalk borer in sugarcane grown under field conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 3, p. 2518-2529, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00543-8>

ZARGAR, S. M.; MAHAJAN, R.; BHAT, J. A.; NAZIR, M.; DESHMUKH, R. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. **3 Biotech**, v. 9, n. 3, p. 73, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1613-z>

CAPÍTULO 1 – DESEMPENHO DE GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB TEORES CONTRASTANTES DE SILÍCIO NO SOLO

RESUMO

O silício (Si) é reconhecido como um elemento benéfico para as plantas, especialmente sob condições de estresse biótico e abiótico. Na cultura da cana-de-açúcar, o Si tem se mostrado eficaz na atenuação de diversos estresses ambientais, além de contribuir no aumento da produtividade. Estudos indicam ampla variabilidade genética quanto à capacidade de absorção e utilização do Si entre os genótipos de cana-de-açúcar, o que viabiliza a seleção de genótipos mais eficientes. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de 50 genótipos de cana-de-açúcar cultivados em solo com teores contrastantes de Si, com ênfase na caracterização morfoagronômica e na quantificação do teor do elemento na parte aérea. Adicionalmente, buscou-se identificar genótipos simultaneamente eficientes e responsivos à adubação silicatada. Foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação. No primeiro, os genótipos foram cultivados em solo com baixo teor de Si. No segundo, realizou-se adubação com silicato de potássio, na dose de 300 mg dm^{-3} de Si. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Cada unidade experimental foi composta por um vaso de 18 dm^3 , contendo uma planta. Aos 120 dias após o plantio, foram avaliadas as seguintes variáveis: altura de planta, diâmetro do colmo, número de colmos por planta, massa de matéria seca da parte aérea, teor de Si na parte aérea e eficiência de utilização de Si. Adicionalmente, os genótipos foram classificados quanto à eficiência de produção de massa de matéria seca e a resposta à aplicação de Si. O desempenho agrônomo dos genótipos de cana-de-açúcar foi significativamente influenciado pelos teores contrastantes de Si no solo. A maior disponibilidade de Si proporcionou aumentos de 28,6% no número de colmos, 32,7% na massa de matéria seca da parte aérea e 48,7% no teor de Si na parte aérea. Foram identificados três genótipos simultaneamente eficientes e responsivos ao Si, enquanto dois apresentaram elevado teor do elemento na parte aérea. Os resultados obtidos fornecem informações relevantes para futuras pesquisas com Si no âmbito do programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Melhoramento vegetal; Elemento benéfico; Eficiência; Seleção de plantas.

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) destaca-se como uma das culturas agrícolas mais relevantes para a economia brasileira. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2025), na safra 2024/25 foram colhidas 677 milhões de toneladas, com produtividade média de 77,2 t ha⁻¹, em uma área aproximada de 8,77 milhões de hectares. Tais números refletem a ampla adaptabilidade da cultura a diferentes condições edafoclimáticas.

Ao longo do ciclo produtivo, no entanto, a cana-de-açúcar está sujeita a diversos fatores de estresse que comprometem seu crescimento, desenvolvimento e produtividade. Nessa perspectiva, diversos estudos apontam o silício (Si) como um elemento benéfico às plantas (Epstein, 2009), especialmente por seu papel na mitigação de estresses bióticos e abióticos (Debona *et al.*, 2017; Meena *et al.*, 2021; Zargar *et al.*, 2019).

Embora o Si seja o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre (Richmond; Sussman, 2003), sua disponibilidade na solução do solo é frequentemente limitada em regiões tropicais e subtropicais, devido ao alto grau de intemperismo dos solos, especialmente Latossolos e Argissolos (Haynes, 2017). Na solução do solo, o Si está presente predominantemente na forma de ácido monossilícico (H₄SiO₄), sendo absorvido passivamente pelas raízes junto com a água. Após a absorção, é transportado via xilema e depositado nos tecidos da parte aérea, sobretudo na epiderme de folhas e colmos, na forma de sílica amorfa hidratada (SiO₂.nH₂O), formando uma camada dupla de sílica-cutícula (Ma; Yamaji, 2006).

Essa deposição atua como barreira física à penetração de patógenos e à ação de insetos, além de induzir respostas bioquímicas associadas à defesa vegetal, como a síntese de compostos fenólicos, lignina e enzimas antioxidantes (Bakhat *et al.*, 2018). O elemento também promove melhorias na arquitetura da planta, tornando as folhas mais eretas e retardando a senescência, o que favorece a interceptação da luz solar, amplia a capacidade fotossintética e, conseqüentemente, contribui para o aumento da produtividade (Guntzer *et al.*, 2012). O Si ainda confere maior tolerância ao estresse hídrico, ao regular a taxa de transpiração e reduzir a abertura dos estômatos (Haynes, 2017).

A cana-de-açúcar é reconhecida como uma planta acumuladora de Si (Savant *et al.*, 1999;), com capacidade de absorção estimada entre 200 e 700 kg ha⁻¹ (Majumdar; Prakash, 2020). As concentrações do elemento são geralmente maiores nas folhas, seguidas pelos colmos e raízes (Camargo; Keeping, 2021). Na cultura, o Si tem se mostrado eficaz na atenuação da toxicidade por alumínio (Sousa Junior *et al.*, 2022, 2024), estresses salino (Ashraf *et al.*, 2009, 2010) e hídrico (Bezerra *et al.*, 2019; Camargo *et al.*, 2019; Verma *et al.*, 2019). Também atua na redução da severidade de doenças, como o carvão (*Sporisorium scitamineum*) (Deng *et al.*,

2020), escaldadura das folhas (*Xanthomonas albilineans*) (Hong *et al.*, 2021) e ferrugem marrom (*Puccinia melanocephala*) (Camargo; Amorim; Gomes Júnior, 2013; Camargo *et al.*, 2020; Ramouthar; Caldwell; McFarlane, 2016), bem como na redução dos danos provocados por pragas, como a broca-do-colmo (*Diatraea saccharalis*) (Oliva *et al.*, 2021; Sousa *et al.*; 2024) e a cigarrinha-das-raízes (*Mahanarva fimbriolata*) (Korndorfer; Grisoto; Vendramim, 2011). Adicionalmente, o elemento tem sido associado a incrementos na produtividade e na qualidade da matéria-prima (Dutra *et al.*, 2023; Frazão *et al.*, 2020).

Grande parte das pesquisas relacionadas ao Si em cana-de-açúcar concentra-se nos efeitos da adubação silicatada sobre estresses ambientais e produtividade. No entanto, tais estudos geralmente avaliam um número limitado de genótipos. Evidências apontam ampla variabilidade genética quanto à capacidade de absorção e utilização do Si entre os genótipos de cana-de-açúcar (Camargo *et al.*, 2010; Deren; Flaz; Snyder, 1993). Essas pesquisas indicam o potencial para seleção de genótipos mais eficientes por meio do melhoramento genético.

A adoção de genótipos eficientes no aproveitamento de Si pode contribuir substancialmente para estratégias de manejo integrado de pragas e doenças, além de viabilizar a produção em ambientes restritivos, sem perdas significativas de produtividade. Assim, torna-se essencial que programas de melhoramento considerem a avaliação da interação entre genótipos e disponibilidade de Si no solo. Nesse sentido, a condução de estudos em ambientes contrastantes possibilita tanto a identificação de genótipos superiores quanto a avaliação dos efeitos do elemento sobre variáveis agronômicas.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de 50 genótipos de cana-de-açúcar cultivados em solo com teores contrastantes de Si, com ênfase na caracterização da resposta morfoagronômica e na quantificação do teor do elemento na parte aérea. Adicionalmente, buscou-se identificar genótipos simultaneamente eficientes e responsivos à adubação silicatada.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Experimento preliminar

Com o objetivo de avaliar o acúmulo de Si na parte aérea da cana-de-açúcar (colmos e folhas) ao longo do tempo, um estudo preliminar foi realizado em casa de vegetação. O experimento foi instalado em delineamento de blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas e quatro repetições. As parcelas foram constituídas por duas variedades de cana-de-açúcar (RB867515 e RB966928) e as subparcelas, por épocas de amostragem das plantas,

realizando-se em 12 coletas com intervalos de 30 dias. A unidade experimental foi composta por dois vasos de 18 dm³, contendo uma planta em cada um.

As plantas foram cultivadas em duas condições de disponibilidade de Si no solo: i) alta disponibilidade, onde foi realizada uma adubação com silicato de cálcio e magnésio na dose de 300 mg dm⁻³; e ii) baixa disponibilidade, em que não foi realizada adubação silicatada (0 mg dm⁻³). Em cada época de amostragem, as plantas foram cortadas próximo ao solo e separadas as folhas e colmos. Essas partes foram trituradas em forrageira elétrica. O material triturado foi seco em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C, até atingir peso constante. Em seguida, realizou-se a pesagem para determinação da massa de matéria seca das folhas e colmos. Por fim, amostras das folhas e colmos secos foram moídas e utilizadas para determinação do teor de Si, conforme a metodologia de Elliott e Snyder (1991).

Com base nesses dados, foi calculado o acúmulo de Si – produto entre massa de matéria seca e teor de Si – nas folhas e colmos. Os dados foram analisados por meio de regressão, sendo ajustadas equações para os valores médios de cada variedade e parte da planta. Os resultados mostraram que, independentemente do teor de Si no solo, o acúmulo do elemento nas folhas e colmos das duas variedades avaliadas ao longo do tempo apresentou ajuste ao modelo linear crescente. Os coeficientes de determinação foram superiores a 0,90. Esses resultados indicam que a absorção e o acúmulo de Si pelas variedades foram contínuos durante todo o período do experimento (Apêndice A). A constância no acúmulo de Si pelas plantas sugere que uma avaliação precoce pode refletir com exatidão o comportamento das plantas ao longo do ciclo de avaliação. Desse modo, os resultados do experimento preliminar auxiliaram na definição da época de avaliação das plantas no experimento principal.

2.2 Experimento principal

2.2.1 Características do solo

O solo utilizado foi coletado em uma área sem uso agrícola da Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão em Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar da Universidade Federal de Viçosa, localizada em Oratórios-MG (latitude 20°24'15,6"S, longitude 42°48'42,3"W e 494 m de altitude). O solo foi seco, peneirado e uma amostra foi retirada para realização da análise química. Com base nos resultados da análise e nas exigências nutricionais da cultura, foram aplicados: 2,0 g dm⁻³ de calcário, 100 mg dm⁻³ de N, 200 mg dm⁻³ de P, 20 mg dm⁻³ de S, 1,0 mg dm⁻³ de B, 1,5 mg dm⁻³ de Cu, 0,15 mg dm⁻³ de Mo e 4,0 mg dm⁻³ de Zn. Os resultados das análises química e física do solo, após ter sido adubado, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Características química e física do solo.

Características químicas e físicas do solo.										
pH	Si	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	(t)	(T)
----- mg dm ⁻³ -----				----- cmol _c dm ⁻³ -----						
6,6	6,7	15,6	20,0	5,3	0,5	0,0	2,6	5,8	5,8	8,4
V	m	MO	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	
----- % -----		dag kg ⁻¹	mg L ⁻¹	----- mg dm ⁻³ -----						
68,8	0,0	2,3	18,2	14,7	49,5	29,6	8,6	0,4	19,9	
Areia grossa		Areia fina		Silte		Argila		Classe textural		Ds
----- kg kg ⁻¹ -----										g cm ⁻³
0,21		0,11		0,04		0,64		Muito Argiloso		1,07

Fonte: elaborado pelo próprio autor. pH em água; Si - CaCl₂ 10 mmol L⁻¹; P - K - Fe - Zn - Mn - Cu - Extrator: Mehlich 1; Ca²⁺ - Mg²⁺ - Al³⁺ - Extrator: KCl 1 mol L⁻¹; H + Al - Extrator: Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0; B - Extrator: água quente; S - Extrator: Fosfato monocalcico em ácido acético; Mat. Org. (MO) = C.Org x 1,724 - Walkley-Black; SB = Soma de Bases Trocáveis; CTC (t) - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T) - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V = Índice de Saturação de Bases; m = Índice de Saturação de Alumínio, P-rem = Fósforo Remanescente, e Ds = Densidade do solo.

2.2.2 Material vegetal

Foram utilizados 50 genótipos de cana-de-açúcar pertencentes ao banco de germoplasma do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar da Universidade Federal de Viçosa (PMGCA/UFV) (Tabela 2). Este grupo inclui variedades comerciais, variedades recém-lançadas, clones em fase de avaliação experimental e genótipos com características de interesse para o PMGCA/UFV (Barbosa *et al.*, 2012; Oliveira; Barbosa; Daros, 2021).

Tabela 2 – Genótipos de cana-de-açúcar avaliados.

Nº de identificação	Genótipos	Nº de identificação	Genótipos
1	IM76228	26	RB057249
2	RB047201	27	RB966928
3	RB975201	28	RB867515
4	CV7870	29	RB987917
5	RB991532	30	RB975033
6	RB147531	31	RB047016
7	RB077210	32	RB07818
8	RB047212	33	CTC9001
9	RB855536	34	RB985476
10	CTC11	35	RB92579
11	RB036088	36	RB987935
12	RB975952	37	RB015935
13	CTC15	38	RB056380
14	RB047055	39	CTC4
15	RB147529	40	SP801816
16	RB147590	41	CTC9005
17	RB127825	42	SP813250
18	CTC20	43	RB855453
19	RB036066	44	RB98710
20	RB01494	45	CTC9006
21	CTC9003	46	CTC9008
22	RB056351	47	CTC2994
23	RB034045	48	CTC9004
24	SP803280	49	CTC9007
25	CTC14	50	CTC9009

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

2.2.3 Procedimentos experimentais

Dois experimentos foram conduzidos em casa de vegetação do PMGCA-UFV, situada no Campo Experimental Diogo Alves de Melo, vinculado ao Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG (latitude 20°45'59,8"S, longitude 42°52'09,4"W e 658 m de altitude).

Os 50 genótipos de cana-de-açúcar foram avaliados em duas condições: baixo Si e alto Si. Em cada experimento foi utilizado o delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. A unidade experimental foi constituída por um vaso de 18 dm³ (30 cm de altura, 25,5 cm de base menor e 30 cm de base maior), contendo uma planta.

No primeiro experimento, denominado baixo Si, o solo apresentava teor de Si de 6,7 mg dm⁻³, conforme detalhado na Tabela 1. O segundo experimento, denominado alto Si, foi

realizado uma adubação com silicato de potássio (12 % de Si e 12 % K₂O), na dose de 300 mg dm⁻³ (equivalente a 600 kg ha⁻¹). O solo desse experimento foi analisado e apresentou teor de 29,1 mg dm⁻³. Para equilibrar o teor de K entre os experimentos, no experimento baixo Si foi aplicado cloreto de potássio.

De acordo com Berthelsen *et al.* (2002) *apud* Marafon e Endres (2011, p. 14), os solos cultivados com cana-de-açúcar podem ser classificados quanto ao teor de Si nas seguintes categorias: muito baixo (0-5 mg dm⁻³), baixo (5-10 mg dm⁻³), limitante (10-20 mg dm⁻³) e adequado (> 20 mg dm⁻³). Assim, o solo utilizado e a dose aplicada possibilitaram a formação de ambientes contrastantes em relação ao teor de Si no solo.

As mudas de cana-de-açúcar foram produzidas por meio da divisão do colmo em gemas individualizadas. No momento do plantio, as mudas mais vigorosas e homogêneas foram selecionadas e, em seguida, transplantadas nos vasos. Durante a condução dos experimentos, a umidade do solo foi mantida próxima à capacidade de campo por meio de irrigação diária.

2.2.4 Variáveis avaliadas

As plantas foram avaliadas aos 120 dias após o plantio, sendo esse período determinado com base nos resultados do experimento preliminar e no intenso perfilhamento das plantas. As variáveis avaliadas foram: altura de planta (*aP*, cm), medida no colmo principal, da base até a inserção da folha +1 (primeira folha completamente aberta do ápice para a base da planta, na qual a aurícula é visível, também conhecida como folha TVD – *Top Visible Dewlap*); diâmetro do colmo (*dC*, mm), aferido na base do colmo principal (a 5 cm do solo), utilizando-se um paquímetro digital; e número de colmos por planta (*nCP*), obtido por meio da contagem de todos os colmos presentes na planta.

Após as medições, as plantas foram cortadas na base do colmo. A parte aérea de cada planta foi triturada em forrageira elétrica. O material triturado foi seco em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C, até atingir peso constante. Em seguida, realizou-se a pesagem para determinação da massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*, g planta⁻¹). Por fim, amostras da parte aérea seca foram moídas em moinho de facas Willey, equipado com peneira de 20 mesh, e utilizadas para a determinação do teor de Si na parte aérea (*tSi_PA*, g kg⁻¹), conforme a metodologia descrita por Elliott e Snyder (1991).

Para avaliar a eficiência dos genótipos, foram utilizados os métodos propostos por Siddiqi e Glass (1981) e Fageria e Kluthcouski (1980).

A eficiência de utilização de Si (EU_{Si} , $g^2 g^{-1}$), índice que indica a capacidade da planta em converter o elemento absorvido em massa de matéria seca, foi determinada conforme a equação descrita por Siddiqi e Glass (1981):

$$EU_{Si} = \frac{mMS_{PA}^2}{cSi_{PA}}$$

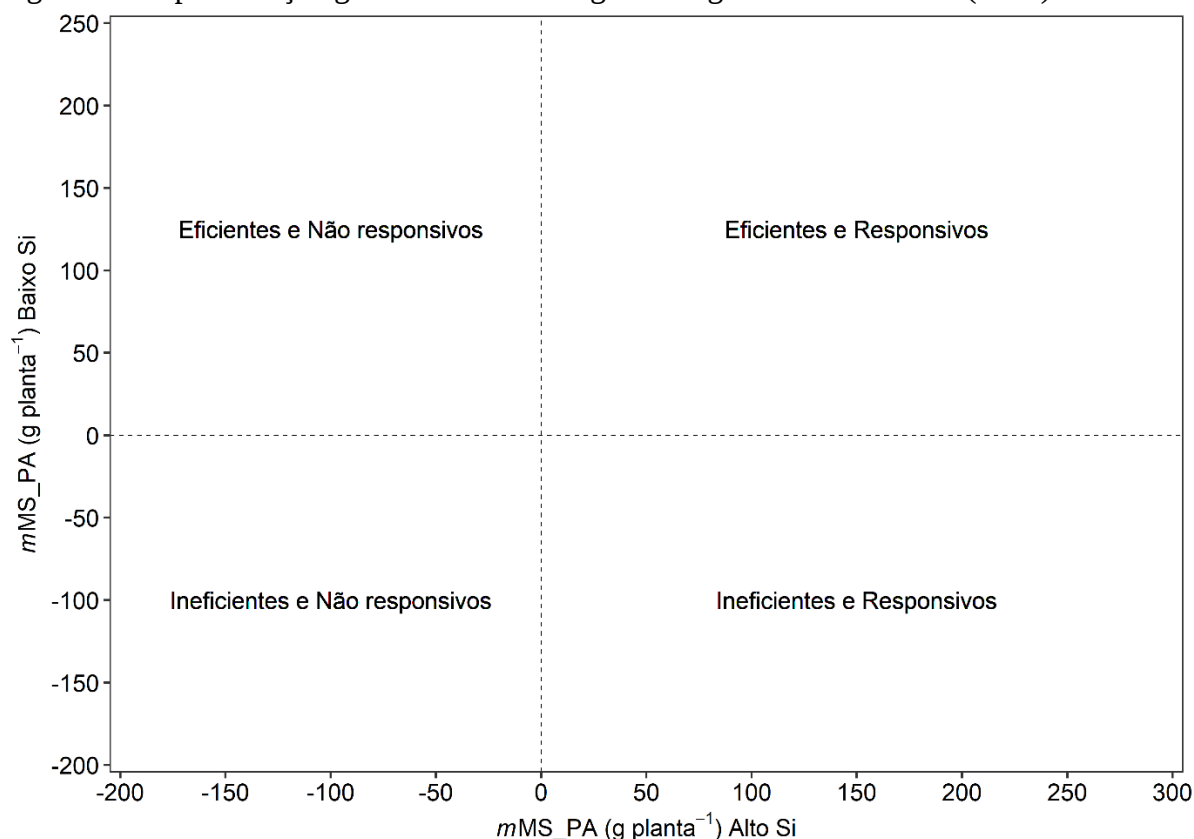
em que EU_{Si} é o índice de eficiência de utilização do Si pelos genótipos de cana-de-açúcar, em $g^2 g^{-1}$; mMS_{PA} é a massa de matéria seca da parte aérea, em $g planta^{-1}$; e cSi_{PA} é o conteúdo de Si da parte aérea, em $g planta^{-1}$, obtido pelo produto do teor de Si na parte aérea pela massa de matéria seca da parte aérea ($tSi_{PA} \times mMS_{PA}$).

Segundo Siddiqi e Glass (1981), o maior peso atribuído à produção de massa de matéria seca da parte aérea na avaliação da EU_{Si} visa evitar a seleção de genótipos que, embora apresentem alta eficiência no uso do nutriente, possuam baixo rendimento produtivo.

O método proposto por Fageria e Kluthcouski (1980) fundamenta-se na representação gráfica dos genótipos em um plano cartesiano. O objetivo é classificá-los quanto à eficiência de produção de massa de matéria seca e a resposta à aplicação de Si. Os quadrantes foram definidos com base nos desvios das médias da massa de matéria seca da parte aérea (mMS_{PA}) em baixo e alto teor de Si no solo (Figura 1). Por esse critério, os genótipos foram categorizados em quatro grupos:

- i) Eficientes e responsivos: genótipos que apresentam alta produção de massa de matéria seca em baixo teor de Si no solo e respondem positivamente à adubação com Si, com aumento na produção de massa de matéria seca.
- ii) Eficientes e não responsivos: genótipos que, embora apresentem alta produção de massa de matéria seca com baixo teor de Si no solo, não apresentam resposta significativa à adubação com Si.
- iii) Ineficientes e responsivos: genótipos com baixa produção de massa de matéria seca em baixo Si, mas que apresentam resposta à adubação com Si, com incremento da produção.
- iv) Ineficientes e não responsivos: genótipos com baixa produção de massa de matéria seca em solo com baixo teor de Si e que não apresentam resposta à adubação com o elemento.

Figura 1 – Representação gráfica da metodologia de Fageria e Kluthcouski (1980).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

2.2.5 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade dos erros (Shapiro-Wilk) e de homogeneidade das variâncias (Bartlett). Em seguida, foi realizada a análise de variância para cada experimento (baixo e alto Si), utilizando o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ij} = \mu + G_i + B_j + e_{ij}$$

em que Y_{ij} é o valor observado do i -ésimo genótipo no j -ésimo bloco; μ é a média geral; G_i é o efeito do i -ésimo genótipo, considerado como fixo; B_j é o efeito do j -ésimo bloco; e_{ij} é o erro aleatório.

A análise de variância conjunta dos experimentos foi realizada obedecendo o critério de homogeneidade das variâncias residuais. Segundo Cruz; Regazzi; Carneiro (2011) as variâncias podem ser consideradas homogêneas quando a razão entre o maior e o menor quadrado médio residual for inferior a 7,0. Para isso considerou-se o modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + A_j + GA_{ij} + B/A_{jk} + e_{ijk}$$

em que Y_{ijk} é o valor observado do i -ésimo genótipo, no j -ésimo ambiente e k -ésimo bloco; μ é a média geral; G_i é o efeito do i -ésimo genótipo de cana-de-açúcar, considerado como fixo; A_j é o efeito do j -ésimo ambiente (teor de Si no solo), considerado como fixo; GA_{ij} é o efeito da interação do i -ésimo genótipo com o j -ésimo ambiente; B/A_{jk} é o efeito do k -ésimo bloco dentro do j -ésimo ambiente; e_{ijk} é o erro aleatório.

As médias dos genótipos foram comparadas pelo método de agrupamento de Scott-Knott (Scott e Knott, 1974), a 5 % de probabilidade. Todas as análises foram realizadas com auxílio dos softwares Genes (Cruz, 2016) e R (R Core Team, 2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises de variância individuais e conjunta (Tabela 3) revelaram diferenças estatisticamente significativas entre os genótipos para todas as variáveis avaliadas. Esses resultados indicam existência de variabilidade genética suficiente para a seleção de genótipos mais eficientes na absorção e utilização do Si.

Quanto ao efeito de ambientes (baixo e alto Si) (Tabela 3), observaram-se diferenças significativas número de colmos por planta (nCP), massa de matéria seca da parte aérea (mMS_PA) e teor de Si na parte aérea (tSi_PA). Esses resultados demonstram que os teores contrastantes de Si no solo influenciaram o desempenho dos genótipos. Para altura de planta (aP), diâmetro do colmo (dC) e eficiência de utilização de Si (EU_Si) não foram observadas diferenças significativas entre os genótipos. Desse modo, essas variáveis são menos impactadas pelas variações no teor de Si no solo.

A interação entre genótipos e ambientes ($G \times A$) foi significativa para a maioria das variáveis (Tabela 3). Esse resultado indica uma resposta diferencial dos genótipos em relação aos teores de Si no solo. Portanto, possivelmente houve uma alteração no ordenamento dos genótipos de cana-de-açúcar entre os ambientes baixo e alto Si. Para dC a interação $G \times A$ foi não significativa, indicando um comportamento coincidente dos genótipos entre os ambientes.

Independentemente do teor de Si no solo, as médias gerais de aP e dC foram similares. Com a maior disponibilidade de Si no solo, foram observados incrementos de 28,6 % no nCP , 32,7 % na mMS_PA e 48,7 % no tSi_PA . Esses resultados indicam resposta positiva dos genótipos ao Si, associado a melhorias no crescimento das plantas e na produção de biomassa. Para EU_Si foi observado uma redução na média no ambiente com alto Si. Esse fato ocorre, pois, com o suprimento adequado, as plantas não precisam ativar mecanismos para absorver e utilizar o nutriente de forma mais eficiente (Fageria, 1992).

Tabela 3 – Resumo da análise de variância individual e conjunta para altura de planta (*aP*), diâmetro do colmo (*dC*), número de colmos por planta (*nCP*), massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*), teor de Si na parte aérea (*tSi_PA*) e eficiência de utilização de Si (*EU_Si*), avaliadas em 50 genótipos de cana-de-açúcar sob ambientes contrastantes quanto à disponibilidade de Si no solo.

FV	GL	<i>aP</i> (cm)	<i>dC</i> (mm)	<i>nCP</i> -	<i>mMS_PA</i> (g planta ⁻¹)	<i>tSi_PA</i> (g kg ⁻¹)	<i>EU_Si</i> (g ² g ⁻¹)
Baixo teor de Si no solo							
Blocos	3	168,4	6,5	5,4	14962,3	44,3	3496,8
Genótipos	49	1230,6**	29,9**	8,1**	25896,4**	3,7**	855,0**
Resíduo	147	72,2	2,4	1,9	4572,6	1,6	183,6
CV%	-	6,3	7,1	18,8	16,1	16,0	23,8
Média	-	134,0	21,6	7,0	420,7	7,8	56,8
Alto teor de Si no solo							
Blocos	3	259,8	2,9	15,8	158608,2	13,4	2579,1
Genótipos	49	644,4**	36,1**	12,0**	42056,4**	10,0**	677,3**
Resíduo	147	106,8	2,6	2,2	5164,7	3,1	105,2
CV%	-	7,7	7,3	17,7	12,9	15,1	20,3
Média	-	134,1	21,8	9,0	558,2	11,6	50,7
Análise de variância conjunta dos experimentos							
Blocos/Ambientes	6	214,1	4,7	10,6	86785,3	28,9	3037,9
Genótipos (G)	49	1486,0**	62,9**	16,7**	50435,8**	10,2**	1197,8**
Ambientes (A)	1	3,1 ^{ns}	3,0 ^{ns}	111,0*	1891463,8**	1408,1**	3892,5 ^{ns}
GxA	49	389,0**	3,2 ^{ns}	3,4**	17517,1**	3,4**	334,5**
Resíduo	294	89,5	2,5	2,1	4868,6	2,3	144,4
CV%	-	7,1	7,2	18,2	14,3	15,7	22,4
Média	-	134,0	21,7	8,0	489,5	9,7	53,7

Fonte: elaborado pelo próprio autor. ^{ns}, não significativo; ** e * significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$ de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

O potencial produtivo da cana-de-açúcar pode ser indiretamente mensurado através das variáveis *aP*, *nCP* e *dC* (Espósito *et al.*, 2012). Portanto, torna-se fundamental a avaliação dessas variáveis para uma melhor compreensão do efeito do Si sobre o desempenho da cultura.

Em relação a *aP*, observou-se a formação de cinco grupos distintos em ambos os teores de Si no solo (Tabela 4). Na condição de baixo teor, a altura das plantas variou de 99 a 163 cm. Os genótipos IM76228, SP803280, CTC14, RB966928, RB056380, SP801816, SP813250,

CTC9008 e CTC9007 foram significativamente superiores aos demais, com valores superiores a 153 cm. Para o ambiente com alto teor de Si, as médias variaram de 101 a 162 cm. Os genótipos RB147529, RB01494, SP803280, CTC14, RB966928, SP801816, CTC9005, CTC9008 e CTC9004 destacaram-se com as maiores alturas, acima de 148 cm.

Observou-se variação expressiva no desempenho dos genótipos entre os ambientes com baixo e alto teor de Si no solo. Embora tenham apresentado maior altura sob baixo teor de Si no solo, os genótipos IM76228, RB056380, SP813250 e CTC9007 apresentaram redução nessa variável quando submetidos a alto teor de Si. Por outro lado, os genótipos RB147529, RB01494, CTC9005 e CTC9004 responderam positivamente à maior disponibilidade de Si no solo, com aumento na altura, quando comparado a baixo Si.

Quanto ao *nCP*, houve a formação de três grupos no ambiente com baixo teor de Si no solo (Tabela 4). As médias variaram de 4 a 11 colmos por planta. Os genótipos RB147531, CTC11, RB057249, RB966928, RB92579, CTC9005, RB98710, CTC9006, CTC9004 e CTC9009 apresentaram os melhores desempenhos, com valores superiores a 9 colmos por planta. Sob alto teor de Si no solo, observou-se a formação de quatro grupos e as médias oscilaram de 5 a 12 colmos por planta. O grupo com maiores médias incluiu os genótipos RB147531, RB966928, RB92579, RB015935, CTC9005, RB98710, CTC9006 e CTC9009, com valores superiores a 11 colmos por planta. Independente do teor de Si no solo, os genótipos RB147531, RB966928, RB92579, CTC9005, RB98710, CTC9006 e CTC9009 destacaram-se pelos maiores números de colmos.

Para o *dC* a interação entre genótipos e ambientes foi não significativa. Dessa forma, a comparação entre os genótipos foi realizada com base na média dos dois ambientes (Tabela 4). As médias variaram de 17,0 a 26,2 mm. Observou-se a formação de sete grupos, sendo que os genótipos RB991532, RB147531, RB077210, RB855536, RB036088, RB127825, RB01494, RB056351, RB92579, RB987935 e RB855453 apresentaram os maiores diâmetros, com valores superiores a 24,0 mm.

Tabela 4 – Médias altura de planta (*aP*), número de colmos por planta (*nCP*) e diâmetro do colmo (*dC*) avaliadas em 50 genótipos de cana-de-açúcar sob ambientes contrastantes quanto à disponibilidade de Si no solo.

Genótipos	(continua)									
	<i>aP</i> (cm)				<i>nCP</i>				<i>dC</i> (mm)	
	Baixo Si		Alto Si		Baixo Si		Alto Si			
IM76228	157	Aa	126	Bc	7	Bc	9	Ab	10,7	g
RB047201	116	Ae	128	Ac	8	Ab	9	Ab	20,0	d
RB975201	127	Ad	130	Ac	8	Ab	9	Ab	20,2	d
CV7870	135	Ac	142	Ab	6	Ac	7	Ac	21,6	d
RB991532	132	Ac	143	Ab	7	Bc	10	Ab	25,1	a
RB147531	113	Ae	133	Ac	9	Aa	11	Aa	24,1	a
RB077210	109	Ae	119	Ad	8	Ab	7	Ac	24,7	a
RB047212	133	Ac	119	Bd	6	Ac	5	Ad	20,8	d
RB855536	99	Be	124	Ac	7	Ac	7	Ac	24,5	a
CTC11	111	Ae	124	Ac	10	Aa	9	Ab	19,1	e
RB036088	138	Ac	142	Ab	7	Ac	8	Ac	25,3	a
RB975952	113	Be	134	Ab	7	Ac	7	Ac	18,9	e
CTC15	114	Ae	119	Ad	8	Ab	8	Ac	21,1	d
RB047055	113	Be	138	Ab	6	Bc	10	Ab	17,0	f
RB147529	146	Ab	150	Aa	6	Ac	8	Ac	21,5	d
RB147590	127	Ad	125	Ac	7	Ac	8	Ac	22,7	c
RB127825	149	Ab	130	Bc	6	Ac	6	Ad	25,9	a
CTC20	148	Ab	140	Ab	8	Ab	9	Ab	20,7	d
RB036066	149	Ab	136	Ab	8	Ab	7	Ac	21,8	c
RB01494	146	Ab	152	Aa	7	Ac	9	Ab	26,2	a
CTC9003	115	Ae	117	Ad	6	Ac	8	Ac	20,4	d
RB056351	110	Ae	109	Ae	8	Ab	8	Ac	24,2	a
RB034045	126	Ad	116	Ad	7	Bc	10	Ab	23,5	b
SP803280	158	Aa	154	Aa	8	Ab	7	Ac	22,5	c
CTC14	161	Aa	149	Aa	5	Ac	7	Ac	22,1	c
RB057249	121	Bd	140	Ab	11	Aa	10	Ab	21,3	d
RB966928	163	Aa	156	Aa	10	Aa	12	Aa	21,9	c
RB867515	142	Ab	128	Ac	7	Ac	8	Ac	23,8	b
RB987917	119	Ad	130	Ac	8	Ab	9	Ac	23,7	b

Tabela 4 – Médias altura de planta (*aP*), número de colmos por planta (*nCP*) e diâmetro do colmo (*dC*) avaliadas em 50 genótipos de cana-de-açúcar sob ambientes contrastantes quanto à disponibilidade de Si no solo.

Genótipos	(conclusão)									
	<i>aP</i> (cm)				<i>nCP</i>				<i>dC</i> (mm)	
	Baixo Si		Alto Si		Baixo Si		Alto Si			
RB975033	141	Ab	141	Ab	6	Bc	9	Ab	22,3	c
RB047016	142	Ab	128	Bc	4	Ac	5	Ad	21,0	d
RB07818	128	Ad	136	Ab	7	Ac	9	Ac	21,2	d
CTC9001	138	Ac	134	Ab	7	Ac	7	Ac	21,8	c
RB985476	109	Be	127	Ac	6	Ac	7	Ac	23,7	b
RB92579	144	Ab	140	Ab	9	Aa	11	Aa	25,3	a
RB987935	133	Ac	142	Ab	6	Bc	10	Ab	25,8	a
RB015935	112	Be	128	Ac	8	Bb	12	Aa	20,0	d
RB056380	154	Aa	140	Bb	7	Ac	7	Ac	22,7	c
CTC4	145	Ab	140	Ab	8	Ab	9	Ab	21,0	d
SP801816	161	Aa	154	Aa	8	Ab	8	Ac	21,4	d
CTC9005	128	Bd	148	Aa	9	Aa	11	Aa	17,7	f
SP813250	157	Aa	123	Bc	8	Ab	8	Ac	22,7	c
RB855453	133	Ac	131	Ac	5	Ac	6	Ad	25,8	a
RB98710	109	Ae	101	Ae	9	Aa	11	Aa	22,4	c
CTC9006	145	Ab	140	Ab	10	Aa	11	Aa	19,5	e
CTC9008	153	Aa	151	Aa	7	Bc	10	Ab	18,7	e
CTC2994	149	Ab	131	Bc	8	Ab	8	Ac	18,3	e
CTC9004	143	Bb	162	Aa	9	Aa	10	Ab	20,3	d
CTC9007	163	Aa	141	Bb	6	Ac	8	Ac	19,3	e
CTC9009	126	Ad	119	Ad	10	Aa	11	Aa	19,0	e

Fonte: elaborado pelo próprio autor. Médias seguidas pela mesma letra minúscula, em cada coluna, e mesma letra maiúscula, em cada linha, pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o método de agrupamento de Scott-Knott ($p < 0,05$).

De acordo com Liang *et al.* (2015), as respostas das plantas diante da disponibilidade de Si no solo ocorrem mais intensamente sob condições de estresses abióticos e/ou bióticos. No presente estudo, no entanto, os genótipos de cana-de-açúcar não foram submetidos a tais condições de estresse. Ainda assim, foram observadas variações significativas nos componentes

de produção da cana-de-açúcar, indicando que o Si pode exercer efeitos positivos mesmo em ambientes favoráveis.

O comportamento diferencial dos genótipos pode estar relacionada à deposição do Si na epiderme das folhas, o que contribui para uma maior rigidez foliar, tornando-as mais eretas e retardando a senescência. Esse mecanismo fisiológico favorece uma maior interceptação de luz solar, aumentando as taxas fotossintéticas. Além disso, reduz a perda por transpiração, o que pode resultar em melhor desempenho das plantas, mesmo na ausência de estresse (Ramalingam *et al.*, 2025).

Em condição de estresse hídrico, Teixeira *et al.* (2020) relataram aumentos expressivos na altura, no diâmetro e no número de colmos em plantas submetidas à adubação com Si. Esses efeitos foram atribuídos à elevação dos teores de clorofila e água, à redução dos níveis de prolina e à melhoria da eficiência fotossintética. De forma semelhante, Ashraf *et al.* (2009) observaram aumento no crescimento de genótipos cultivados sob estresse salino, com base na hipótese de que o Si, precipitado como sílica amorfa nas paredes celulares das raízes, limitou a absorção e o transporte de sódio para a parte aérea.

Com relação a *mMS_PA*, as médias dos genótipos variaram de 236,0 a 630,5 g planta⁻¹, em baixo teor de Si no solo, e de 377,8 a 815,8 g planta⁻¹, em alto teor (Tabela 5). Para o ambiente com baixo teor de Si no solo, observou-se a formação de quatro grupos. Os genótipos CTC9006, RB966928 e RB036066 foram significativamente superiores aos demais, com valores acima de 557,8 g planta⁻¹. Em contraste, o grupo com as menores médias, composto por 15 genótipos, apresentou valores inferiores a 364,8 g planta⁻¹. Já sob alto teor de Si no solo, os genótipos foram reunidos em cinco grupos distintos. Os genótipos RB147531, RB92579 e CTC9004 foram os mais produtivos, com médias acima de 759,9 g planta⁻¹. O grupo com os menores valores de massa de matéria seca foi formado por nove genótipos, com médias inferiores a 456,2 g planta⁻¹.

A maioria dos genótipos apresentou aumento significativo na produção de massa matéria seca da parte aérea com a maior da disponibilidade de Si no solo (Tabela 5). Esses resultados evidenciam a capacidade de resposta da cana-de-açúcar ao elemento. Os genótipos RB147531, RB855536, RB036088, RB034045, RB975033, RB047016, CTC9001, RB92579, RB987935, CT022994, CTC9004 e CTC9007 apresentaram aumentos superiores a 50% na massa de matéria seca da parte aérea sob alto Si.

Tabela 5 – Médias da massa de matéria seca da parte aérea (*mMS_PA*), teor de silício na parte aérea (*tSi_PA*) e eficiência de utilização de Si (*EU_Si*) avaliadas em 50 genótipos de cana-de-açúcar cultivadas em solo com teores contrastantes de Si.

Genótipos	(continua)											
	<i>mMS_PA</i> (g planta ⁻¹)				<i>tSi_PA</i> (g kg ⁻¹)				<i>EU_Si</i> (g ² g ⁻¹)			
	Baixo Si		Alto Si		Baixo Si		Alto Si		Baixo Si		Alto Si	
IM76228	410,9	Bc	611,8	Ac	7,4	Bc	10,2	Ad	57,2	Ac	61,0	Aa
RB047201	424,6	Bc	547,1	Ad	7,1	Bc	10,7	Ad	61,2	Ab	51,7	Ab
RB975201	402,1	Ac	442,6	Ae	8,3	Bb	11,7	Ac	49,1	Ac	39,0	Ac
CV7870	418,1	Bc	522,4	Ad	8,0	Bb	11,4	Ac	52,9	Ac	46,9	Ab
RB991532	414,5	Ac	510,9	Ad	7,5	Bc	11,3	Ac	57,5	Ac	45,8	Ab
RB147531	439,0	Bb	815,9	Aa	7,8	Bc	11,9	Ac	60,3	Ab	69,8	Aa
RB077210	396,5	Bc	529,3	Ad	7,7	Bc	10,7	Ad	55,1	Ac	50,6	Ab
RB047212	357,0	Ad	388,8	Ae	7,0	Bc	11,9	Ac	51,1	Ac	33,2	Bc
RB855536	316,1	Bd	494,1	Ad	8,6	Bb	14,6	Aa	38,9	Ad	36,0	Ac
CTC11	497,5	Bb	602,7	Ac	6,6	Bc	9,2	Ad	75,8	Aa	66,5	Aa
RB036088	398,4	Bc	599,9	Ac	9,8	Ba	13,0	Ab	42,3	Ad	46,5	Ab
RB975952	286,6	Bd	398,3	Ae	8,3	Ab	10,2	Ad	36,9	Ad	40,5	Ac
CTC15	434,3	Ab	520,3	Ad	7,1	Bc	9,9	Ad	62,8	Ab	55,1	Ab
RB047055	351,8	Bd	506,9	Ad	8,6	Bb	11,2	Ac	42,9	Ad	47,2	Ab
RB147529	352,3	Ad	443,6	Ae	10,0	Ba	16,7	Aa	36,4	Ad	26,7	Ac
RB147590	490,8	Ab	587,6	Ac	7,7	Bc	11,8	Ac	67,5	Ab	50,2	Bb
RB127825	432,8	Ab	492,0	Ad	7,7	Bc	11,3	Ac	59,6	Ab	44,1	Ab
CTC20	472,4	Bb	676,5	Ab	7,6	Ac	9,2	Ad	66,0	Ab	73,5	Aa
RB036066	557,8	Aa	429,6	Be	6,9	Bc	10,2	Ad	81,8	Aa	44,9	Bb
RB01494	509,3	Bb	689,0	Ab	8,7	Bb	13,8	Ab	60,3	Ab	52,3	Ab
CTC9003	453,7	Bb	623,3	Ac	8,3	Ab	10,2	Ad	55,8	Ac	61,1	Aa
RB056351	287,7	Ad	377,8	Ae	9,1	Bb	14,6	Aa	31,7	Ad	26,0	Ac
RB034045	316,4	Bd	522,3	Ad	7,2	Bc	13,3	Ab	44,5	Ad	39,7	Ac
SP803280	482,1	Ab	453,5	Ae	8,3	Bb	12,6	Ab	59,6	Ab	36,6	Bc
CTC14	416,5	Ac	513,9	Ad	7,0	Bc	10,9	Ac	61,4	Ab	48,9	Ab
RB057249	505,2	Bb	631,2	Ac	6,6	Bc	11,8	Ac	79,1	Aa	54,7	Bb
RB966928	580,1	Ba	717,5	Ab	8,0	Ab	8,9	Ad	75,5	Aa	82,8	Aa
RB867515	333,1	Bd	498,2	Ad	8,1	Bb	11,3	Ac	41,2	Ad	45,2	Ab
RB987917	401,2	Ac	497,7	Ad	8,4	Bb	11,8	Ac	47,4	Ac	43,0	Ab

Tabela 5 – Médias da massa de matéria seca da parte aérea (mMS_PA), teor de silício na parte aérea (tSi_PA) e eficiência de utilização de Si (EU_Si) avaliadas em 50 genótipos de cana-de-açúcar cultivadas em solo com teores contrastantes de Si.

Genótipos	(conclusão)											
	mMS_PA (g planta ⁻¹)				tSi_PA (g kg ⁻¹)				EU_Si (g ² g ⁻¹)			
	Baixo Si		Alto Si		Baixo Si		Alto Si		Baixo Si		Alto Si	
RB975033	364,8	Bd	598,7	Ac	8,4	Bb	12,8	Ab	43,6	Ad	50,0	Ab
RB047016	236,0	Bd	387,3	Ae	11,0	Ba	15,0	Aa	22,5	Ad	25,9	Ac
RB07818	331,0	Bd	456,2	Ae	7,2	Bc	11,8	Ac	47,5	Ac	39,7	Ac
CTC9001	351,2	Bd	558,8	Ad	7,1	Bc	11,8	Ac	51,0	Ac	47,4	Ab
RB985476	402,3	Ac	499,5	Ad	8,1	Bb	12,4	Ab	56,2	Ac	41,1	Ac
RB92579	425,5	Bc	768,8	Aa	6,5	Bc	12,0	Ac	67,8	Ab	64,2	Aa
RB987935	358,8	Bd	573,4	Ac	7,4	Bc	11,9	Ac	49,8	Ac	48,7	Ab
RB015935	503,0	Bb	606,8	Ac	7,5	Bc	11,6	Ac	67,2	Ab	54,1	Ab
RB056380	463,0	Ab	485,9	Ad	8,7	Bb	11,5	Ac	56,0	Ac	43,0	Ab
CTC4	390,3	Ac	481,9	Ad	6,8	Bc	12,8	Ab	59,3	Ab	39,3	Bc
SP801816	522,3	Ab	573,3	Ac	6,2	Bc	10,1	Ad	85,9	Aa	56,5	Bb
CTC9005	466,7	Bb	681,7	Ab	7,4	Bc	9,8	Ad	66,0	Ab	70,2	Aa
SP813250	432,9	Ab	509,7	Ad	7,6	Bc	10,3	Ad	57,7	Ac	50,7	Ab
RB855453	364,8	Bd	535,7	Ad	8,9	Bb	12,1	Ac	42,2	Ad	44,5	Ab
RB98710	523,3	Ab	554,2	Ad	6,0	Bc	11,2	Ac	86,8	Aa	50,3	Bb
CTC9006	630,5	Aa	647,8	Ac	7,2	Bc	10,4	Ad	91,3	Aa	64,8	Ba
CTC9008	491,0	Bb	616,2	Ac	7,7	Bc	12,0	Ac	67,7	Ab	52,9	Ab
CTC2994	417,4	Bc	638,4	Ac	8,2	Bb	12,8	Ab	52,7	Ac	50,5	Ab
CTC9004	446,7	Bb	759,9	Aa	8,5	Ab	9,9	Ad	53,9	Bc	77,7	Aa
CTC9007	296,7	Bd	622,1	Ac	8,3	Bb	10,5	Ad	38,0	Bd	62,3	Aa
CTC9009	478,1	Bb	710,9	Ab	7,3	Ac	9,5	Ad	65,9	Ab	75,7	Aa

Fonte: elaborado pelo próprio autor. Médias seguidas pela mesma letra minúscula, em cada coluna, e mesma letra maiúscula, em cada linha, pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o método de agrupamento de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Por outro lado, o genótipo RB036066 apresentou comportamento distinto, com maior massa de matéria seca sob baixo teor de Si. Resultado semelhante ao encontrado por Dutra *et al.* (2023). Esses autores observaram que o genótipo RB036066 apresentou maior eficiência de uso de P no ambiente sem adubação de Si. Entretanto, a aplicação do elemento reduziu a eficiência de uso de N, comprometendo a produtividade. Os resultados indicam que o genótipo RB036066 apresenta resposta negativa à maior disponibilidade de Si no solo.

Quanto ao tSi_{PA} , no ambiente com baixo teor de Si no solo, os genótipos apresentaram valores médios de 6,0 a 11,0 g kg⁻¹, com a formação de três grupos (Tabela 5). O grupo de maiores teores foi formado pelos genótipos RB047016, RB147529 e RB036088, com valores acima de 9,8 g kg⁻¹. No ambiente com alto teor de Si no solo, as médias variaram entre 8,9 e 16,7 g kg⁻¹ e houve a formação de quatro agrupamentos. Os maiores teores de Si foram observados nos genótipos RB147529, RB047016, RB056351 e RB855536, com valores superiores a 14,6 g kg⁻¹. Ressalta-se que todos os genótipos apresentaram aumento no teor de Si na parte aérea quando cultivados sob alto Si.

Na literatura diversos trabalhos indicam que plantas com alto teor de Si na parte aérea sofrem menos danos relacionados a doenças e pragas. Nesse sentido, Camargo, Amorim e Gomes Júnior (2013), observaram uma significativa redução na incidência de ferrugem marrom (*Puccinia melanocephala*) em função do teor de Si nas folhas. Segundo os autores, o Si atua tanto na formação de uma barreira física quanto na ativação de mecanismos de resistência, com produção de compostos fenólicos e aumento da atividade de enzimas que degradam a parede celular do patógeno. Resultados semelhantes também foram obtidos por Ramouthar, Caldwell e Mcfarlane (2016). De forma semelhante, Deng *et al.* (2020) observaram correlação negativa entre a severidade do carvão (*Sporisorium scitamineum*) e o teor de Si nas folhas e colmos. Os autores relataram que o Si aumentou a atividade de proteínas relacionadas à patogênese, como quitinase e β -1,3-glucanase. Além disso, houve aumento na atividade das enzimas polifenoloxidase (PPO) e fenilalanina amônia liase (PAL), e do teor de lignina nas folhas, o que contribuiu para a redução da doença.

O comportamento alimentar da cigarrinha-das-raízes (*Mahanarva fimbriolata*) foi alterado quando submetida em plantas com maior teor de Si nas folhas. Houve um aumento na mortalidade de ninfas e na duração da fase ninfal, além de redução da longevidade de indivíduos adultos, tanto machos quanto fêmeas (Korndörfer; Grisoto; Vendramim, 2011). Oliva *et al.* (2021) identificaram correlação negativa e significativa entre o teor de Si no colmo e a porcentagem de internódios perfurados pela broca-da-cana (*Diatraea saccharalis*). Esse efeito foi atribuído à deposição de Si nas células epidérmicas do colmo, a qual aumentou a dureza do tecido, formando uma barreira mecânica à penetração da praga.

Nesse cenário, torna-se evidente que um maior teor de Si na parte aérea dos genótipos configura-se como um caráter desejável em programas de melhoramento genético, sobretudo no contexto do manejo integrado de pragas e doenças. Os genótipos RB047016 e RB147529 destacaram-se com os maiores teores de Si na parte aérea, independentemente dos ambientes (Tabela 4). Essa estabilidade na absorção e concentração do elemento na parte aérea reforça o

potencial desses materiais como fontes promissoras para o desenvolvimento de variedades mais tolerantes a estresses bióticos.

Quanto à EU_Si (Tabela 5), verificou-se no ambiente com baixo teor de Si no solo a discriminação dos genótipos em quatro grupos. O grupo de genótipos mais eficiente na utilização de Si, ou seja, aquele que apresentam maior capacidade de converter o Si absorvido em massa de matéria seca, foi composto por CTC11, RB036066, RB057249, RB966928, SP801816, RB98710 e CTC9006, com valores acima de $75,5 \text{ g}^2 \text{ g}^{-1}$. Em contraste, os genótipos RB855536, RB036088, RB975952, RB047055, RB147529, RB056351, RB034045, RB867515, RB975033, RB047016, RB855453 e CTC9007 apresentaram as menores eficiências, com valores inferiores a $44,5 \text{ g}^2 \text{ g}^{-1}$.

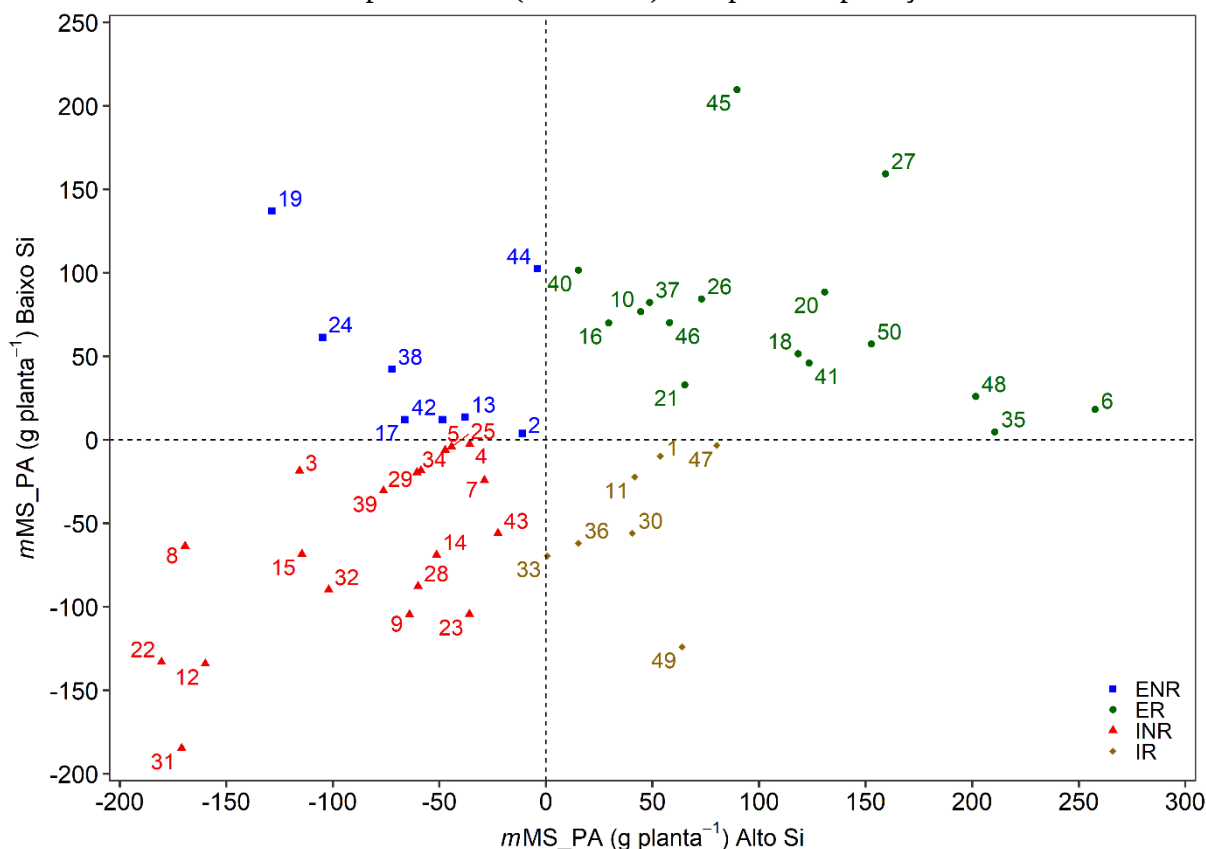
Para o ambiente com alto teor de Si no solo, verificou-se a formação de três grupos de médias. Os genótipos IM76228, RB147531, CTC11, CTC20, CTC9003, RB966928, RB92579, CTC9005, CTC9006, CTC9004, CTC9007 e CTC9009 apresentaram as maiores eficiências, variando de 61,0 a $82,8 \text{ g}^2 \text{ g}^{-1}$. Por outro lado, os genótipos RB975201, RB047212, RB855536, RB975952, RB147529, RB056351, RB034045, SP803280, RB047016, RB07818, RB985476 e CTC4 apresentaram as menores eficiências de utilização de Si, com valores inferiores a $41,1 \text{ g}^2 \text{ g}^{-1}$.

Os genótipos CTC11, RB966928 e CTC9006 foram eficientes na utilização de Si em ambos os ambientes, o que indica comportamento estável e maior adaptação às diferentes condições de Si no solo. Em geral, esses genótipos apresentaram bom desempenho para os componentes de produção da cana-de-açúcar. Por outro lado, os genótipos RB855536, RB975952, RB147529, RB056351, RB034045 e RB047016 apresentaram baixa eficiência em ambas as condições, associado a um reduzido crescimento vegetativo.

A metodologia proposta por Fageria e Kluthcouski (1980), permitiu identificar os genótipos RB147531, RB92579, CTC9004, CTC9009, CTC9005, CTC20, CTC9003, RB01494, RB966928, CTC9006, CTC9008, RB057249, RB147590, CTC11, RB015935 e SP801816 como eficientes e responsivos (ER) (Figura 2). Esses genótipos apresentaram maior massa de matéria seca em ambiente com baixo teor de Si no solo e responderam à aplicação do elemento, com incremento na produção.

Do ponto de vista do melhoramento genético, os genótipos desse grupo destacam-se como potenciais fontes de alelos favoráveis para eficiência de utilização de Si, contribuindo para o aumento do rendimento da cana-de-açúcar. Ressalta-se ainda que os genótipos CTC11, RB966928 e CTC9006 também apresentaram alta eficiência de utilização de Si, segundo a metodologia de Siddiqi e Glass (1981).

Figura 2 – Classificação dos 50 genótipos de cana-de-açúcar quanto à eficiência de produção de massa de matéria seca da parte aérea (mMS_{PA}) e resposta a aplicação de Si.



Fonte: elaborado pelo próprio autor. ER: eficientes e responsivos; ENR: eficientes e não responsivos; INR: ineficientes e não responsivos e IR: ineficientes e responsivos. Os quadrantes foram definidos com base nos desvios das médias de massa de matéria seca da parte aérea em baixo e alto teor de Si no solo. Genótipos: 1-IM76228, 2-RB047201, 3-RB975201, 4-CV7870, 5-RB991532, 6-RB147531, 7-RB077210, 8-RB047212, 9-RB855536, 10-CTC11, 11-RB036088, 12-RB975952, 13-CTC15, 14-RB047055, 15-RB147529, 16-RB147590, 17-RB127825, 18-CTC20, 19-RB036066, 20-RB01494, 21-CTC9003, 22-RB056351, 23-RB034045, 24-SP803280, 25-CTC14, 26-RB057249, 27-RB966928, 28-RB867515, 29-RB987917, 30-RB975033, 31-RB047016, 32-RB07818, 33-CTC9001, 34-RB985476, 35-RB92579, 36-RB987935, 37-RB015935, 38-RB056380, 39-CTC4, 40-SP801816, 41-CTC 9005, 42-SP813250, 43-RB855453, 44-RB98710, 45-CTC9006, 46-CTC9008, 47-CT022994, 48-CTC9004, 49-CTC9007 e 50-CTC9009.

O grupo de genótipos eficientes e não responsivos (ENR) foi formado por RB036066, SP803280, RB056380, RB127825, SP813250, CTC15, RB98710 e RB047201. Esses genótipos apresentaram elevada produção de massa de matéria seca em baixo Si, mas não aumentaram a produção em ambiente com alto Si no solo.

Os genótipos RB867515, RB047016, RB975952, RB056351, RB047212, RB147529, RB07818, RB855536, RB034045, RB975201, CTC4, RB047055, RB855453, RB987917, RB985476, RB991532, CTC14, RB077210 e CV7870 foram classificados como ineficientes e não responsivos (INR). Esses genótipos apresentaram baixa produção de massa de matéria seca em solo com baixo teor de Si e que não apresentam resposta à adubação com o elemento.

Por essa classificação, esses genótipos não demonstraram características promissoras para o melhoramento genético voltado à obtenção de variedades de cana-de-açúcar com maior eficiência no uso de Si. Entretanto, vale ressaltar que os genótipos desse grupo são, em sua maioria, variedades comerciais amplamente cultivadas no Brasil (Oliveira; Barbosa; Daros, 2021).

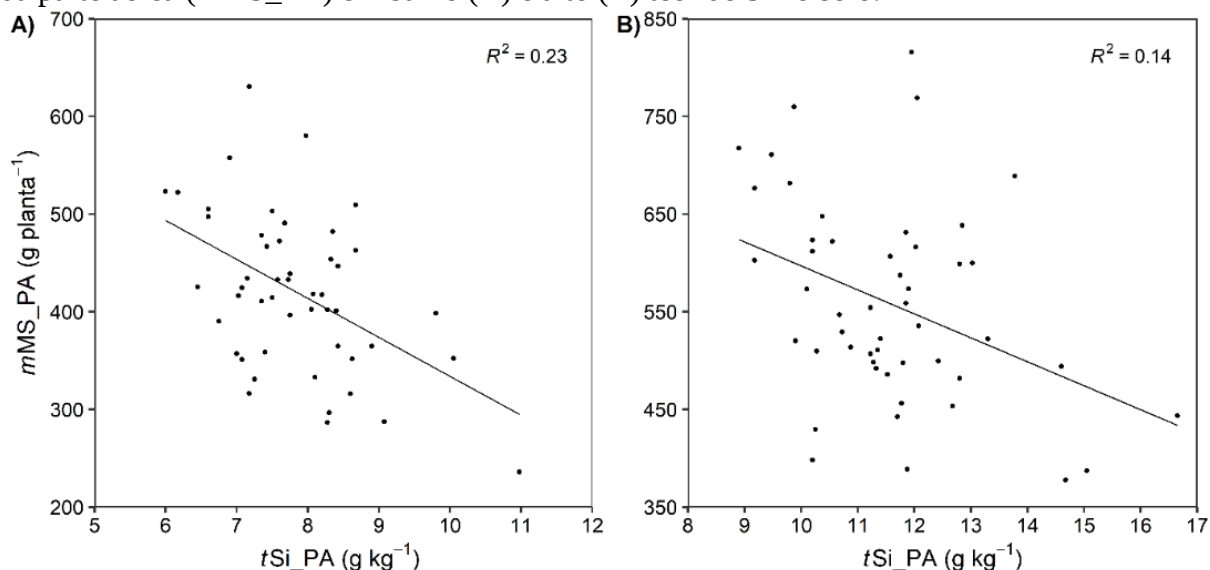
Além disso, muitos desses materiais são utilizados como genitores nos programas de melhoramento genético da cana-de-açúcar. Assim, apesar do limitado desempenho observado, esses genótipos possuem mérito agrônômico reconhecido e devem ser avaliados em outras condições de disponibilidade de Si no solo, com objetivo de confirmar o comportamento.

O grupo ineficientes e responsivos (IR) foi composto pelos genótipos CTC9007, CT022994, RB975033, RB036088, IM76228, RB987935 e CTC9001. Esses genótipos apresentaram baixa eficiência na produção de massa de matéria seca no ambiente de baixa disponibilidade de Si no solo, porém apresentaram uma resposta à aplicação do elemento, com aumento na produção. As características responsivas apresentadas pelos genótipos desse grupo são interessantes aos programas de melhoramentos.

A Figura 3 ilustra a relação entre o teor de Si na parte aérea e a massa de matéria seca da parte aérea em baixo e alto teor de Si no solo, respectivamente. Em ambas os ambientes, observou-se uma relação inversa entre essas variáveis. Esse resultado indica que, nesta fase de desenvolvimento das plantas, os teores mais elevados de Si na parte aérea não estiveram associados a um aumento na produção de matéria seca.

Esse comportamento pode ser explicado pelos efeitos de diluição e concentração (Jarrel; Beverly, 1981). Assim, os teores baixos ou elevados de Si na parte aérea podem estar relacionados a um alto ou baixo crescimento vegetativo das plantas, respectivamente. É importante destacar que as plantas foram colhidas durante período de intenso crescimento e perfilhamento, o que pode ter influenciado essa relação.

Figura 3 – Relação entre as variáveis teor de Si na parte aérea (tSi_PA) e massa de matéria seca da parte aérea (mMS_PA) em baixo (A) e alto (B) teor de Si no solo.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam a possibilidade de seleção de genótipos de cana-de-açúcar mais eficientes na utilização de Si e com maior teor do elemento na parte aérea por meio de programas de melhoramento genético. Esses genótipos podem contribuir para o aumento da produtividade e manejo sustentável da cultura. Contudo, torna-se necessário realizar avaliações adicionais em campo e em condições variadas de Si no solo, com o objetivo de confirmar o comportamento dos genótipos. Além disso, para aplicações práticas no programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar, futuras pesquisas devem se concentrar em estudos sobre os mecanismos responsáveis pelas variações genotípicas na concentração de Si e estabelecer a herdabilidade da característica.

4 CONCLUSÕES

O desempenho agrônômico dos genótipos de cana-de-açúcar foi significativamente influenciado pelos teores contrastantes de Si no solo. A maior disponibilidade do elemento proporcionou aumentos de 28,6 % no número de colmos e de 32,7 % na massa de matéria seca da parte aérea.

Independentemente do teor de Si no solo, os genótipos RB966928, CTC11 e CTC9006 destacaram-se com elevada eficiência e responsividade ao Si.

Os genótipos RB047016 e RB147529 apresentaram os maiores teores de Si na parte aérea, indicando maior capacidade de absorção do elemento.

REFERÊNCIAS

- ASHRAF, M.; RAHMATULLAH; AFZAL, M.; AHMED, R.; MUJEEB, F.; SARWAR, A.; ALI, L. Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant and Soil**, v. 326, p. 381-391, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0019-9>
- ASHRAF, M.; RAHMATULLAH; AHMAD, R.; AFZAL, M.; TAHIR, M. A.; KANWAL, S.; MAQSOOD, M. A. Potassium and silicon improve yield and juice quality in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under salt stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 195, n. 4, p. 284-291, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2009.00364.x>
- BAKHAT, H. F.; BIBI, N.; ZIA, Z.; ABBAS, S.; HAMMAD, H. M.; FAHAD, S.; ASHRAF, M. R.; SHAH, G. M.; RABBANI, F.; SAEED, S. Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review. **Crop Protection**, v. 104, p. 21-34, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.008>
- BARBOSA, M. H. P.; RESENDE, M. D. V.; DIAS, L. A. S.; BARBOSA, G. V. S.; OLIVEIRA, R. A.; PETERNELLI, L. A.; DAROS, E. Genetic improvement of sugar cane for bioenergy: the Brazilian experience in network research with RIDESA. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 12, p. 87-98, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1984-70332012000500010>
- BERTHELSEN, S.; NOBLE, A.; KINGSTON, G.; RUDD, A. Effect of Ca-silicate amendments on soil chemical properties under a sugarcane cropping system. In: **Silicon in Agriculture Conference**, 2. ed. Proceedings... Tsuruoka, Japan: Japanese Society of Soil Science & Plant Nutrition, 2002. p. 57.
- BEZERRA, B. K. L.; LIMA, G. P. P.; REIS, A. R.; SILVA, M. D. A.; CAMARGO, M. S. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, p. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>
- CAMARGO, M. S.; AMORIM, L.; GOMES JÚNIOR, A. R. Silicon fertilisation decreases brown rust incidence in sugarcane. **Crop Protection**, v. 53, p. 72-79, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2013.06.006>
- CAMARGO, M. S.; BEZERRA, B. K. L.; HOLANDA, L. A.; OLIVEIRA, A. L.; VITTI, A. C.; & SILVA, M. A. Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 81-91, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>
- CAMARGO, M. S.; COUTINHO, I. D.; LOURENÇO, S. A.; SOARES, M. K. M.; COLNAGO, L. A.; APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CAVALHEIRO, A. J.; AMORIM, L. Potential prophylactic role of silicon against brown rust (*Puccinia melanocephala*) in sugarcane. **European Journal of Plant Pathology**, v. 157, p. 77-88, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-01982-2>
- CAMARGO, M. S.; KEEPING, M. G. Silicon in sugarcane: availability in soil, fertilization, and uptake. **Silicon**, v. 13, n. 10, p. 3691-3701, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00935-y>

CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; FOLTRAN, D. E.; HENRIQUE, C. M.; ROSSETTO, R. Absorção de silício, produtividade e incidência de *Diatraea saccharalis* em cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 69, n. 4, p. 937-944, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000400020>

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar – Safra 2024/25 - Quarto levantamento, Brasília, DF, v.12, n.4, abril 2025.

CRUZ, C. D. Programa Genes-Ampliado e integrado aos aplicativos R, Matlab e Selegen. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 38, p. 547-552, 2016. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v38i4.32629>

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento**. Viçosa, MG: UFV, 2012.

DEBONA, D.; RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. E. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. **Annual review of Phytopathology**, v. 55, n. 1, p. 85-107, 2017. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312>

DENG, Q.; WU, J.; CHEN, J.; SHEN, W. Physiological mechanisms of improved smut resistance in sugarcane through application of silicon. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.568130>

DEREN, C. W.; GLAZ, B.; SNYDER, G. H. Leaf-tissue silicon content of sugarcane genotypes grown on everglades histosols. **Journal of Plant Nutrition**, v. 16, n. 11, p. 2273-2280, 1993. <https://doi.org/10.1080/01904169309364685>

DUTRA, A. F.; LEITE, M. R. L.; MELO, C. C. F.; AMARAL, D. S.; SILVA, J. L. F.; PRADO, R. M.; PICCOLO, M. C.; MIRANDA, R. S.; SILVA JUNIOR, G. B.; SOUSA, T. K. S. A.; MENDES, L. W.; ARAUJO, A. S. F.; ZUFFO, A. M.; ALCANTARA NETO, F. Soil and foliar Si fertilization alters elemental stoichiometry and increases yield of sugarcane cultivars. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 16040, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43351-z>

ELLIOTT, C. L.; SNYDER, G. H. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 39, n. 6, p. 1118-1119, 1991. <https://doi.org/10.1021/jf00006a024>

EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. **Annals of applied Biology**, v. 155, n. 2, p. 155-160, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x>

ESPOSITO, D. P.; PETERNELLI, L. A.; PAULA, T. O. M.; BARBOSA, M. H. P. Análise de trilha usando valores fenotípicos e genotípicos para componentes do rendimento na seleção de famílias de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 42, p. 38-44, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011005000152>

FAGERIA, N. D.; KLUTHCOUSKI, J. **Metodologia para avaliação de cultivares de arroz e feijão para condições adversas de solo**. Brasília: Embrapa/CNPAP, (Circular Técnica, 8), 1980, 22p.

FAGERIA, N.K. **Maximizing Crop Yields**. New York: Marcel Dekker, 1992. 274p.

FRAZAO, J. J.; PRADO, R. M.; SOUZA JUNIOR, J. P.; ROSSATTO, D. R. Silicon changes C: N: P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 12492, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69310-6>

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, n. 1, p. 201-213, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8>

HAYNES, R. J. Significance and role of Si in crop production. **Advances in Agronomy**, v. 146, p. 83-166, 2017. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.06.001>

HONG, D. K.; TALHA, J.; YAO, Y.; ZOU, Z. Y.; FU, H. Y.; GAO, S. J.; XIE, Y.; WANG, J. Silicon enhancement for endorsement of *Xanthomonas albilineans* infection in sugarcane. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 220, p. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112380>

JARRELL, W. M.; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, v. 34, p. 197-224, 1981. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60887-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60887-1)

KORNDORFER, A. P.; GRISOTO, E.; VENDRAMIM, J. D. Induction of insect plant resistance to the spittlebug *Mahanarva fimbriolata* Stål (Hemiptera: Cercopidae) in sugarcane by silicon application. **Neotropical Entomology**, v. 40, n. 3, p. 387-392, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2011000300013>

LIANG, Y.; NIKOLIC, M.; BELANGER, R.; GONG, H.; SONG, A. Effect of Silicon on Crop Growth, Yield and Quality. In: **Silicon in Agriculture: From Theory to Practice**. Dordrecht: Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2>

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, n. 8, p. 392-397, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>

MAJUMDAR, S.; PRAKASH, N. B. An overview on the potential of silicon in promoting defence against biotic and abiotic stresses in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 4, p. 1969-1998, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00269-z>

MARAFON, A. C.; ENDRES, L. **Adubação silicatada em cana-de-açúcar**. 1. ed. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2011. 46 p. Disponível em: http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2011/doc_165.pdf. Acesso em: 4 set. 2024.

MEENA, V.; DOTANIYA, M. L.; SAHA, J. K.; PATRA, A. K. Silicon potential to mitigate plant heavy metals stress for sustainable agriculture: a review. **Silicon**, p. 1-16, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01200-6>

OLIVA, K. M. E.; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M.; OLIVEIRA, E. C. A.; NASCIMENTO, C. W. A. Amorphous silica-based fertilizer increases stalks and sugar yield and resistance to stalk borer in sugarcane grown under field conditions. **Journal of Soil**

Science and Plant Nutrition, v. 21, n. 3, p. 2518-2529, 2021.

<https://doi.org/10.1007/s42729-021-00543-8>

OLIVEIRA, R. A.; BARBOSA, G. V. S.; DAROS, E. **50 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 30 anos de RIDESA**. Curitiba, PR: UFPR. RIDESA, 2021.

R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2024.

RAMALINGAM, S. P.; NARAYANAN, J.; RADHAKRISHNAN, S.; NAYAKKAR, S. M.; BALRAJ, R.; MUTHURAMAN, Y.; GOMASA, S.; NADARAJAN, S.; PALANISAMY, M. A.; CHANDRASEKARAN, B.; GOVINDAN, S. K.; LOGANATHAN, K.; SANJEEVI, N.; NATARAJAN, C.; CYRIAC, J. Multifarious Activity of Silicon in Sugarcane Productivity Escalation: Regulatory Mechanisms and Future Outlook. **Silicon**, v. 17, p. 635–671, 2025.

<https://doi.org/10.1007/s12633-024-03215-1>

RAMOUTHAR, P. V.; CALDWELL, P. M.; MCFARLANE, S. A. Effect of silicon on the severity of brown rust of sugarcane in South Africa. **European Journal of Plant Pathology**, v. 145, p. 53 – 60, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0812-7>

RICHMOND, K. E.; SUSSMAN, M. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. **Current opinion in plant biology**, v. 6, n. 3, p. 268-272, 2003.

[https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00041-4)

SAVANT, N. K.; KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Silicon nutrition and sugarcane production: a review. **Journal of plant nutrition**, v. 22, n. 12, p. 1853-1903, 1999. <https://doi.org/10.1080/01904169909365761>

SCOTT, A.; KNOTT, M. 1974. Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. **Biometrics**, Washington D.C., v.30, n.3, p.507-512. <https://doi.org/10.2307/2529204>

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 4, n. 3, p. 289-302, 1981. <https://doi.org/10.1080/01904168109362919>

SOUSA JUNIOR, G. S.; HURTADO, A. C.; ALVES, R. C.; GASPARINO, E. C.; SANTOS, D. M. M. Silicon attenuates aluminum toxicity in sugarcane plants by modifying growth, roots morphoanatomy, photosynthetic pigments, and gas exchange parameters. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 4717, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53537-8>

SOUSA JUNIOR, G. S.; HURTADO, A. C.; SOUZA JUNIOR, J. P.; PRADO, R. M.; SANTOS, D. M. M. Nutritional and Structural Role of Silicon in Attenuating Aluminum Toxicity in Sugarcane Plants. **Silicon**, v. 14, p. 5041–5055, 2022.

<https://doi.org/10.1007/s12633-021-01294-y>

SOUSA, A. C. G.; PINTO, C. P. G.; SANTOS, A. L. Z.; FONSECA, S. S.; CAMARGO, M. S.; ROSSI, G. D. Silicon application enhances sugarcane growth by impairing the development of larval sugarcane borer. **Silicon**, v. 16, n. 2, p. 741-751, 2024.

<https://doi.org/10.1007/s12633-023-02719-6>

TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. M.; ROCHA, A. M. S.; SANTOS, L. C. N.; SARAH, M. M. S.; GRATAO, P. L.; FERNANDES, C. Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 849-859, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4>

VERMA, K. K.; LIU, X. H.; WU, K. C.; SINGH, R. K.; SONG, Q. Q.; MALVIYA, M. K.; SONG, X. P.; SINGH, P.; VERMA, C. L.; L, Y. R. The Impact of Silicon on Photosynthetic and Biochemical Responses of Sugarcane under Different Soil Moisture Levels. **Silicon**, v. 12, p. 1355-1367, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00228-z>

ZARGAR, S. M.; MAHAJAN, R.; BHAT, J. A.; NAZIR, M.; DESHMUKH, R. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. **3 Biotech**, v. 9, n. 3, p. 73, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1613-z>

CAPÍTULO 2 – PREDIÇÃO DO TEOR DE SILÍCIO EM CANA-DE-AÇÚCAR POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO

RESUMO

O silício (Si) contribui para a mitigação de diversos estresses bióticos e abióticos em plantas. Na cana-de-açúcar, estudos indicam a existência de variabilidade genética quanto à capacidade de absorção e utilização do Si, o que abre perspectivas para o desenvolvimento de variedades mais eficientes. No entanto, os métodos convencionais de quantificação de Si em tecidos vegetais são morosos, caros e pouco viáveis para a aplicação em larga escala em programas de melhoramento genético. Neste contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de metodologias rápidas e precisas para a predição do teor de Si. O objetivo deste estudo foi desenvolver e validar modelos de regressão multivariada, baseados em espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), para estimar o teor de Si em diferentes partes da cana-de-açúcar. Foram analisadas 192 amostras de folha TVD (*top visible dewlap*) (F_TVD), 192 amostras de folhas totais (secas e verdes) (F_TO), 160 amostras de colmos (COL) e 400 amostras da parte aérea (PA). Os teores de Si, determinados pelo método químico de referência, variaram entre 5,9 e 16,0 g kg⁻¹ para F_TVD; 4,5 e 18,1 g kg⁻¹ para F_TO; 1,0 e 9,3 g kg⁻¹ para COL; 4,7 e 19,6 g kg⁻¹ para PA. Os modelos foram construídos separadamente para cada parte da cana-de-açúcar, utilizando regressão por quadrados mínimos parciais (PLS) com diferentes pré-processamentos espectrais e abordagens do método de seleção dos preditores ordenados (PLS-OPS). O desempenho dos modelos foi avaliado por meio da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), coeficiente de correlação (R) e erro relativo percentual. Os modelos PLS-OPS superaram os modelos PLS em todas as partes avaliadas. Os melhores resultados de predição (R_p e RMSEP) foram: 0,92 e 0,95 g kg⁻¹ para F_TVD; 0,96 e 0,88 g kg⁻¹ para F_TO; 0,97 e 0,35 g kg⁻¹ para COL; e 0,92 e 1,08 g kg⁻¹ para PA, com erros relativos médios inferiores a 10%. Esses resultados demonstram que a espectroscopia NIR, associada à regressão PLS e ao método OPS, é uma alternativa rápida, precisa e eficiente para a quantificação do teor de Si em cana-de-açúcar, com potencial aplicação em programas de melhoramento genético.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; NIR; Regressão multivariada; Melhoramento genético; Elemento benéfico.

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma das culturas mais relevantes para o agronegócio brasileiro. O país lidera a produção mundial de açúcar e ocupa a segunda posição na produção de etanol. A espécie também é essencial para a geração de bioenergia. De acordo com dados da Conab (2025) a cana-de-açúcar é cultivada em todas as regiões do Brasil, embora apresente variações significativas de produtividade, que podem ultrapassar 34% entre as regiões. Tais diferenças podem ser parcialmente atribuídas à ocorrência de estresses bióticos e abióticos que limitam o crescimento e desenvolvimento das plantas.

Diversos estudos têm demonstrado que, sob condições de estresse, o silício (Si) exerce efeitos benéficos sobre às plantas, contribuindo para a mitigação dos impactos negativos causados por fatores ambientais e biológicos (Debona et al., 2017; Zargar et al., 2019). Na cultura da cana-de-açúcar, o Si está associado à atenuação dos estresses salino e hídrico, à redução da severidade de doenças e à diminuição dos danos provocados por diferentes pragas (Ashraf et al., 2010; Bezerra et al., 2019; Camargo et al., 2020; Deng et al., 2020; Hong et al., 2021; Korndorfer; Grisoto; Vendramim, 2011; Oliva et al., 2021).

A capacidade de absorção e utilização do Si varia entre os genótipos de cana-de-açúcar, evidenciando a existência de variabilidade genética para esse atributo (Camargo et al., 2010; Deren; Flaz; Snyder, 1993). Tal variabilidade oferece potencial para a seleção e o desenvolvimento de variedades mais eficientes na assimilação do elemento, por meio de programas de melhoramento genético.

Contudo, a quantificação do teor de Si em tecidos vegetais por métodos convencionais apresenta diversas limitações que dificultam sua aplicação em larga escala. Tais métodos requerem infraestrutura laboratorial avançada, equipamentos de alto custo, uso de reagentes perigosos, mão de obra especializada, além de gerarem resíduos e demandarem longo tempo de análise.

Adicionalmente, programas de melhoramento genético da cana-de-açúcar, como o da Universidade Federal de Viçosa (PMGCA/UFV), avaliam milhares de genótipos ao longo de suas diferentes fases (Ferreira et al., 2022). Nesse cenário, torna-se imprescindível o desenvolvimento de metodologias rápidas, confiáveis e ambientalmente seguras para a quantificação do Si, de forma a viabilizar sua aplicação no melhoramento genético.

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), associada a métodos quimiométricos multivariados, como a regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) e o método de seleção dos preditores ordenados (OPS), tem se destacado como alternativa promissora aos métodos convencionais. Essa técnica apresenta vantagens como rapidez na

análise, ausência de reagentes químicos, menor demanda por mão de obra, redução de erros operacionais, eliminação da geração de resíduos e minimização ou eliminação do preparo das amostras.

Na cana-de-açúcar, a espectroscopia NIR tem sido aplicada com sucesso na seleção e discriminação de clones (Peternelli *et al.*, 2020; Peternelli; Andrade, 2023) e na predição de características de qualidade da matéria-prima (Gonçalves *et al.*, 2021). A técnica também tem se mostrado eficiente na estimativa dos teores de sacarose, glicose e frutose no caldo (Cardoso *et al.*, 2022), bem como na quantificação de macro e micronutrientes em folhas (Fiorio *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2019; Yarcce; Rojas, 2012). Adicionalmente, demonstrou bom desempenho na predição do teor de Si em diferentes espécies vegetais (Smis *et al.*, 2014). No entanto, estudos sobre a aplicação da técnica para predição do teor de Si na cana-de-açúcar ainda são incipientes.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar modelos multivariados baseados em espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) e seleção de variáveis pelo método dos preditores ordenados (OPS), para a predição do teor de silício em diferentes partes da cana-de-açúcar, visando sua aplicação no PMGCA/UFV.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Origem e preparo das amostras

As amostras foram obtidas de dois experimentos conduzidos em casa de vegetação do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar da Universidade Federal de Viçosa (PMGCA/UFV) (latitude 20°45'59" S; longitude 42° 52' 09" W; 658 m de altitude).

2.1.1 Experimento I

O primeiro experimento foi conduzido entre de março de 2022 e março de 2023, em esquema de parcelas subdivididas. As parcelas corresponderam a dois genótipos de cana-de-açúcar (RB867515 e RB966928), e as subparcelas foram compostas pelas épocas de avaliação, realizadas a cada 30 dias, totalizando 360 dias. O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Cada unidade experimental consistiu em dois vasos de 18 dm³, contendo uma planta por vaso.

Os genótipos foram cultivados sob duas condições de disponibilidade de Si no solo: i) baixo teor, correspondente à concentração natural; e ii) alto teor, obtido pela aplicação de 300 mg dm⁻³ de silicato de cálcio e magnésio.

Em cada época de avaliação, as plantas foram colhidas próximo ao solo, e a parte aérea foi separada em folha TVD (*top visible dewlap*), folhas totais (verdes e secas) e colmos. A coleta dos colmos foi iniciada aos 90 dias após o plantio.

Todas as amostras foram trituradas, homogeneizadas e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até peso constante. Em seguida, as amostras secas foram moídas em moinho de facas Willey com peneira de 20 mesh.

Ao final do experimento, foram obtidas 192 amostras de folha TVD, 192 amostras de folhas totais e 160 amostras de colmos. As amostras foram divididas em dois lotes e armazenadas em sacos plásticos. O primeiro lote foi destinado à análise química de referência e o segundo, à aquisição dos espectros NIR.

2.1.2 Experimento II

O segundo experimento foi conduzido entre novembro de 2023 e fevereiro de 2024, em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. Foram avaliados 50 genótipos de cana-de-açúcar pertencentes ao banco de germoplasma do PMGCA/UFV. Cada unidade experimental foi composta por um vaso de 18 dm³, contendo uma planta. As plantas foram cultivadas sob as mesmas duas condições experimentais descritas no Experimento I. No tratamento com alto teor de Si, foi aplicada uma dose de 300 mg dm⁻³ de silicato de potássio.

Após 120 dias do plantio, toda a parte aérea foi colhida, triturada, homogeneizada e processada conforme o protocolo descrito para o Experimento I. Foram obtidas 400 amostras da parte aérea, as quais foram igualmente divididas em dois lotes: um destinado à análise química e outro à aquisição dos dados espectrais.

2.2 Determinação do teor de silício (análise química de referência)

A análise química das amostras coletadas nos dois experimentos foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Elliot e Snyder (1991).

Para a digestão, foram pesadas 0,100 g das amostras em tubos de polipropileno de 50 mL. Foram adicionados 2 mL de peróxido de hidrogênio (300 g L⁻¹) e 3 mL de hidróxido de sódio (500 g L⁻¹).

Os tubos foram então colocados em banho-maria a 50 °C por aproximadamente 1h. Ao fim da oxidação das amostras, evidenciada pela cessação da liberação de gases, os tubos foram fechados e submetidos a autoclave por 1h a 123 °C e pressão de 1,5 atm. Após o resfriamento, foram adicionados 45 mL de água destilada, e os extratos foram transferidos para recipientes

plásticos devidamente identificados, que foram deixados em repouso por aproximadamente 12h para decantação dos resíduos.

Para determinação do Si foi utilizado 1 mL de sobrenadante do extrato digerido, diluído com 19 mL de água destilada. Foram adicionados a essa solução 1 mL de ácido clorídrico (500 g L^{-1}) e 2 mL de molibdato de amônio (100 g L^{-1}). Após 5 a 10 minutos, foram adicionados 2 mL de ácido oxálico (75 g L^{-1}). Decorridos 2 minutos a dosagem foi realizada em espectrofotômetro de absorção molecular UV – Visível no comprimento de onda de 410 nm.

2.3 Análise espectral das amostras

Os espectros NIR das amostras foram obtidos utilizando espectrômetro de transformada de Fourier, modelo Antaris II FT-NIR (Thermo Scientific), com suporte do software TQ Analysis. Para cada amostra foram realizadas 32 varreduras no intervalo espectral de 10000 a 4000 cm^{-1} e resolução de $4,0 \text{ cm}^{-1}$. O resultado médio das varreduras foi armazenado como absorbância, $\log(1/R)$, onde R é a reflectância. Para a coleta dos espectros, cada amostra foi acondicionada em suporte de quartzo e posicionadas diretamente na janela de amostragem do equipamento (Fotografia 1).

Fotografia 1 – Espectrômetro modelo Antaris II FT- NIR (Thermo Scientific) com suporte de quartzo contendo uma amostra.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

2.4 Modelos de regressão multivariada

Os modelos para predição do teor de Si foram desenvolvidos separadamente para cada parte da cana-de-açúcar: folha TVD, folhas totais, colmos e parte aérea.

Os espectros NIR foram organizados em uma matriz **X** (variáveis independentes), onde cada linha corresponde a uma amostra e cada coluna corresponde a um comprimento de onda, ou seja, número de variáveis que serão utilizadas na modelagem. O vetor **y** (variável dependente) representa os valores de teor de Si obtidos pela análise química para cada parte da cana-de-açúcar. O vetor **y** e a matriz **X** possuíram iguais números de linhas.

Os espectros foram importados para o software Matlab 2019a (Math Works, Natick, EUA). Os modelos de regressão inversa ($\mathbf{y} = \mathbf{Xb}$) foram construídos utilizando a regressão por quadrados mínimos parciais (PLS). O algoritmo Kennard-Stone (Kennard; Stone, 1969) foi utilizado para dividir os dados em um conjunto de calibração, contendo 70% dos dados, e um conjunto de validação, com 30% dos dados. O conjunto de calibração foi utilizado para a construção dos modelos, enquanto o conjunto de predição foi utilizado para validar a capacidade preditiva dos modelos desenvolvidos.

Diversos pré-processamentos foram aplicados aos dados espectrais, incluindo autoescalar, centrar na média, suavização, primeira e segunda derivada, normalização, remoção de tendência, correção da linha de base, correção da variação normal padrão (SNV) correção do espalhamento multiplicativa (MSC) e suas combinações, utilizando o software Relyon, disponível em <https://aclab.ufv.br/> (Cardoso *et al.*, 2025) O método de validação cruzada do tipo randômica com dez divisões no conjunto de calibração foi aplicado para selecionar o número de variáveis latentes.

Na construção dos modelos, foram aplicadas quatro abordagens do método de seleção dos preditores ordenados – OPS (AutoOPS, FeedOPS, AutoiOPS, FeediOPS). Esse método tem como objetivo identificar e selecionar variáveis (comprimentos de onda) mais relevantes e associadas ao teor de Si, visando aprimorar a capacidade de predição dos modelos (Roque *et al.*, 2019; Teófilo *et al.*, 2009).

A qualidade dos modelos obtidos foi determinada pela raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e pelo coeficiente de correlação (R), de acordo com as seguintes equações:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

em que: y_i e $\hat{y}_i$ são os valores observados e preditos, respectivamente; $\bar{\hat{y}}$ é o valor médio predito e N é o número de amostras. A raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e do coeficiente de correlação (R) podem ser calculados com as amostras do conjunto de calibração (RMSECV e R_{CV}) ou com as amostras do conjunto de predição (RMSEP e R_P).

O modelo de melhor ajuste e capacidade de predição foi considerado aquele que apresentou os menores valores para RMSECV e RMSEP, associado a maiores valores de R_{CV} e R_P . A qualidade também foi verificada pelo erro relativo percentual (ER%), que expressa, em termos percentuais, a magnitude do erro absoluto em relação ao valor de referência.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve considerável amplitude nos teores de Si entre as diferentes partes da planta, com variações de 5,9 a 16,0 g kg⁻¹ para folha TVD; 4,5 a 18,1 g kg⁻¹ para folhas totais; 1,0 a 9,3 g kg⁻¹ para colmos; e 4,7 a 19,6 g kg⁻¹ para parte aérea, conforme apresentado na Tabela 1. A variabilidade observada pode ser atribuída a fatores ambientais, como as épocas de coleta das amostras e aos teores de Si no solo. Além de fatores genéticos relacionados à variabilidade genética para absorção e acúmulo de Si entre os genótipos de cana-de-açúcar.

Observa-se que as folhas da cana-de-açúcar concentraram mais Si do que os colmos. Isso está relacionado ao papel das folhas como principal órgão transpiratório da planta, favorecendo a deposição de Si na forma de sílica amorfa ao longo do processo de transpiração. Resultados semelhantes foram reportados por Camargo e Keeping (2021), que também observaram maiores concentrações de Si em folhas quando comparadas aos colmos.

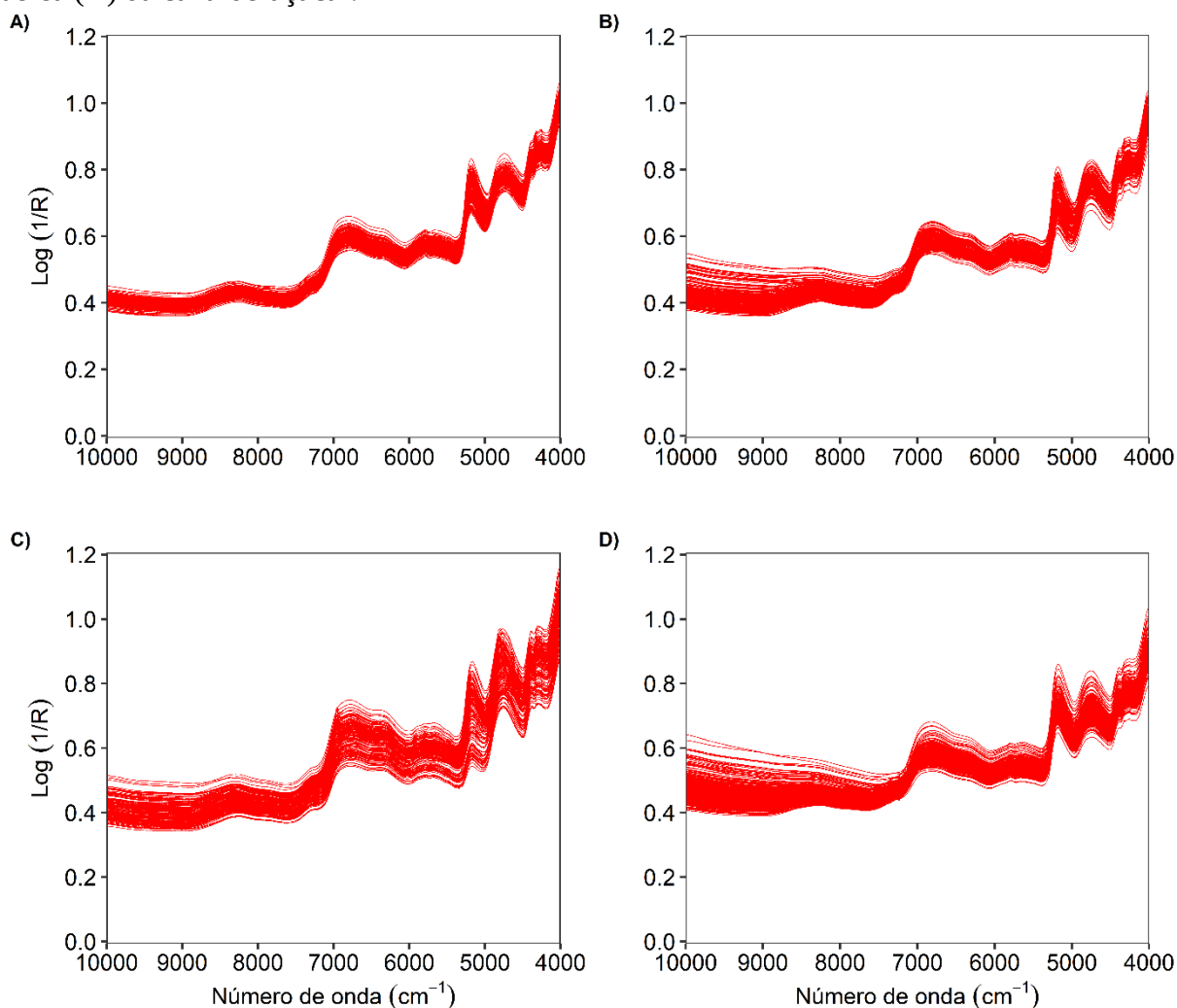
Tabela 1 – Médias, valores mínimos e máximos para o teor de Si (g kg⁻¹) determinado em diferentes partes da cana-de-açúcar via análise química de referência.

Experimentos	Partes da cana-de-açúcar	Média	Mínimo	Máximo
Experimento I	Folha TVD	10,9	5,9	16,0
	Folhas Totais	10,4	4,5	18,1
	Colmos	3,2	1,0	9,3
Experimento II	Parte Aérea	9,7	4,7	19,6

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os espectros NIR da folha TVD, das folhas totais, dos colmos e da parte aérea da cana-de-açúcar estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Espectros NIR da folha TVD (A), das folhas totais (B), dos colmos (C) e da parte aérea (D) da cana-de-açúcar.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Com o objetivo de aumentar a exatidão dos modelos preditivos, diferentes técnicas de pré-processamento foram avaliadas. A principal finalidade é eliminar variações indesejadas nos espectros, aumentar a relação sinal/ruído e melhorar o desempenho dos modelos (Ferreira, 2015). Foram avaliados métodos de correção da dispersão da luz e a aplicação de derivadas espectrais. As técnicas de correção de dispersão, como remoção de tendência e normalização, foram empregadas para reduzir perturbações físicas entre as amostras. As derivadas espectrais foram utilizadas para minimizar variações aditivas e multiplicativas nos espectros, frequentemente associadas à linha de base e a flutuações instrumentais (Rinnan; Berg; Engelsen, 2009). Foram testadas diferentes combinações de pré-processamentos, sendo selecionadas para modelos finais apenas aquelas que resultaram em menor valor de RMSECV.

Os resultados dos modelos preditivos para cada parte da cana-de-açúcar, incluindo os parâmetros estatísticos de desempenho e os pré-processamentos aplicados, estão apresentados na Tabela 2. Na construção dos modelos, foi empregado o método OPS para seleção de variáveis espectrais mais relevantes à predição do teor de Si. Os modelos baseados em todas as variáveis espectrais foram denominados PLS, enquanto aqueles construídos com subconjuntos de variáveis selecionadas via OPS foram designados como PLS-OPS.

De modo geral, os modelos PLS-OPS apresentaram desempenho superior aos modelos PLS, independentemente da parte da cana-de-açúcar analisada. A redução no número de variáveis espectrais resultou em melhor ajuste dos modelos, evidenciando a eficácia do OPS na identificação de regiões espectrais com maior relevância para a predição do teor de Si. Esse ganho de desempenho foi confirmado pelos menores valores de erro de calibração (RMSEC), validação cruzada (RMSECV) e predição (RMSEP), bem como pelos maiores coeficientes de correlação para calibração (R_C), validação cruzada (R_{CV}) e predição (R_P), conforme apresentado na Tabela 2. Resultados semelhantes foram reportados por Cardoso *et al.*, (2022) e Oliveira *et al.*, (2021), que destacaram a eficiência do método OPS na seleção de variáveis espectrais relevantes e na construção de modelos multivariados mais precisos.

Para a folha TVD, o método PLS-OPS elevou o R_{CV} de 0,62 para 0,89 e o R_P de 0,79 para 0,92, com redução do erro relativo médio de 9,81% para 6,40%. Em folhas totais, observou-se aumento do R_{CV} de 0,60 para 0,93 e do R_P de 0,74 para 0,96, com queda do erro relativo médio de 15,68% para 6,74%. Para colmos, o R_{CV} aumentou de 0,69 para 0,93 e o R_P de 0,80 para 0,97, enquanto o erro relativo médio foi reduzido de 17,39% para 8,74%. Já na parte aérea, o modelo PLS-OPS proporcionou incremento no R_{CV} de 0,83 para 0,91 e no R_P de 0,87 para 0,92, com redução do erro relativo médio de 12,24% para 9,38%.

Além dos coeficientes de correlação superiores a 0,90, destaca-se que os valores de erro absoluto (RMSE) foram inferiores ao menor valor mensurado na análise de referência para cada parte da cana-de-açúcar, indicando elevada exatidão dos modelos. Esses resultados confirmam o potencial da espectroscopia NIR, associada à seleção de variáveis via OPS, como ferramenta eficiente para a predição do teor de Si em diferentes partes da cana-de-açúcar.

Tabela 2 – Parâmetros estatísticos dos modelos PLS com todas as variáveis e com seleção de variáveis pelo método OPS (PLS-OPS).

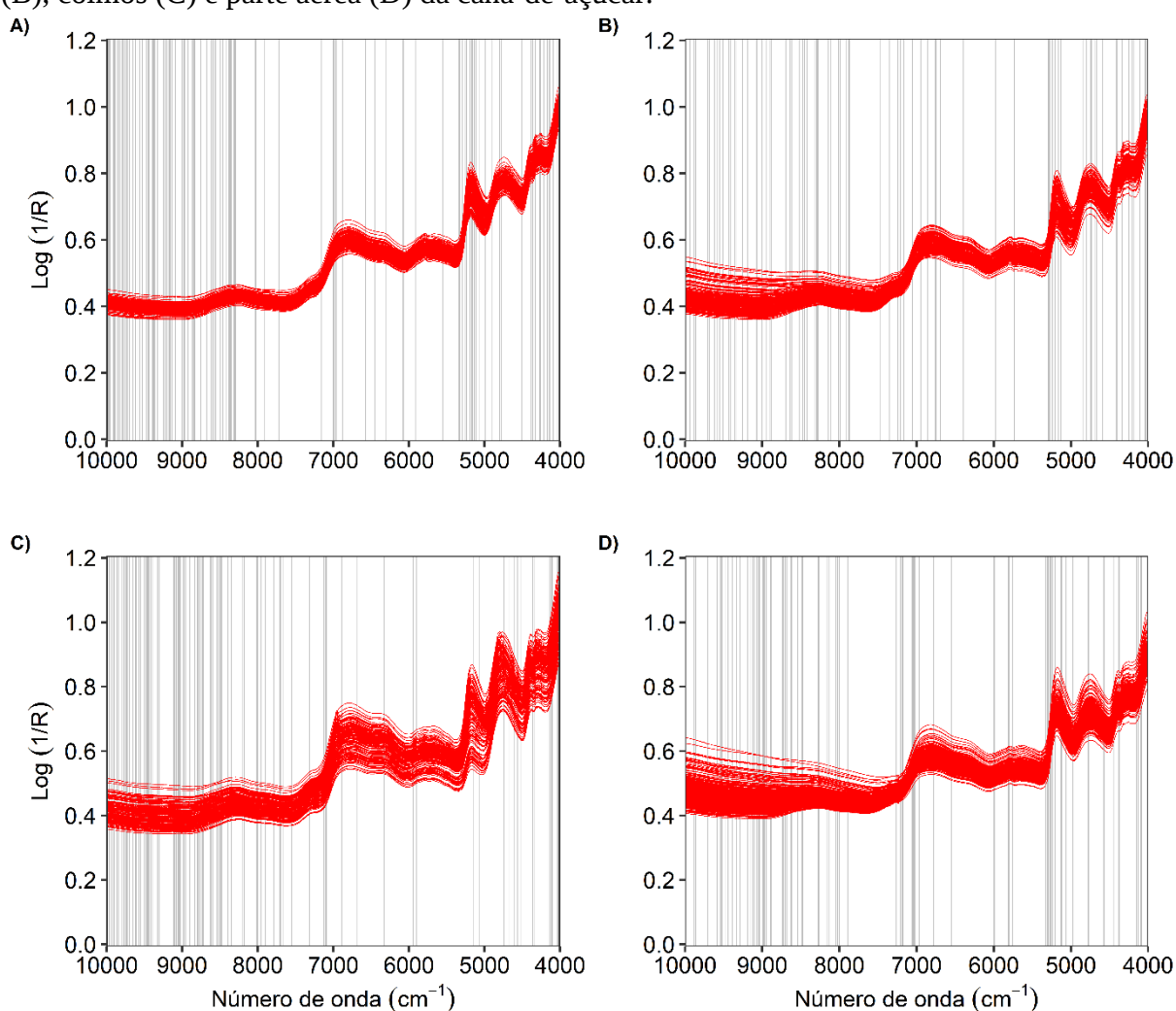
Partes da cana-de-açúcar	Método	Var	VL	RMSEC	R_c	RMSECV	R_{cv}	RMSEP	R_p	%ER	Pré-processamentos
Folha TVD	PLS	3112	10	0,91	0,92	1,89	0,62	1,52	0,79	9,81	PD – S – D
	PLS-OPS	180	10	0,57	0,97	1,07	0,89	0,95	0,92	6,40	
Folhas Totais	PLS	3112	8	0,65	0,97	2,25	0,60	2,16	0,74	15,68	N – PD – D
	PLS-OPS	95	8	0,56	0,98	1,01	0,93	0,88	0,96	6,74	
Colmos	PLS	3112	7	0,47	0,92	0,87	0,69	0,80	0,80	17,39	S – D – SD
	PLS-OPS	120	7	0,21	0,98	0,45	0,93	0,35	0,97	8,74	
Parte Aérea	PLS	3112	9	1,14	0,90	1,50	0,83	1,34	0,87	12,24	SD – S – N
	PLS-OPS	240	9	0,91	0,94	1,12	0,91	1,08	0,92	9,38	

Fonte: elaborado pelo próprio autor. Var: número de variáveis; VL: número de variáveis latentes; RMSEC: raiz quadrada do erro quadrático médio da calibração; R_c: coeficiente de correlação da calibração; RMSECV: raiz quadrada do erro quadrático médio da validação cruzada; R_{cv}: coeficiente de correlação da validação cruzada; RMSEP: raiz quadrada do erro quadrático médio da predição; R_p: coeficiente de correlação da predição; %ER: percentual do erro relativo médio da predição; PD: primeira derivada; S: suavização; D: remoção de tendência; N: normalização; SD: segunda derivada.

Os resultados obtidos neste trabalho estão em concordância com a literatura científica, que atestam a viabilidade da espectroscopia NIR para a predição do teor de Si em materiais vegetais. Smis *et al.*, (2014) reportaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,88 na calibração e acima de 0,90 na predição do teor de Si em folhas e em plantas inteiras, avaliando uma ampla diversidade de espécies. De forma semelhante, Jin e Chen (2007) observaram R^2 superiores a 0,87 na calibração e 0,88 na predição do teor de Si, determinado na forma de cinzas insolúveis, em palha de arroz. Apesar dos resultados deste trabalho terem sido expressos por meio de coeficientes de correlação (R), as métricas obtidas indicam níveis de desempenho equivalentes ou superiores aos descritos nos trabalhos de referência, evidenciando a robustez dos modelos desenvolvidos.

Para todas as partes avaliadas, os parâmetros dos modelos foram otimizados com a seleção de variáveis. A Figura 2 apresenta as variáveis selecionadas pelo OPS.

Figura 2 – Variáveis espectrais selecionadas pelo método OPS para folha TVD (A), folhas totais (B), colmos (C) e parte aérea (D) da cana-de-açúcar.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As respostas espectrais na região do infravermelho próximo estão predominantemente associadas a vibrações moleculares de ligações envolvendo o hidrogênio (H), como C–H, N–H, O–H e S–H (Bokobza, 1998). Por essa razão, o NIR não permite a detecção direta do Si, uma vez que esse elemento não forma ligações covalentes com o hidrogênio. No entanto, o Si se acumula nos tecidos vegetais majoritariamente na forma de sílica amorfa hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), cuja superfície contém grupos hidroxila (–OH). Além disso, estudos indicam que o Si pode se associar a componentes estruturais da parede celular, como hemicelulose, pectina e lignina, por meio de ligações do tipo Si–O–C (Sheng; Chen, 2020).

Essas interações estruturais possibilitam a detecção indireta do Si pela espectroscopia NIR, com base nas bandas espectrais associadas a grupos funcionais como C–O e O–H. Observou-se que as regiões espectrais selecionadas apresentaram certa similaridade entre as diferentes partes da planta, com exceção dos colmos. Essa distinção espectral pode estar relacionada ao menor teor de Si detectado nos colmos.

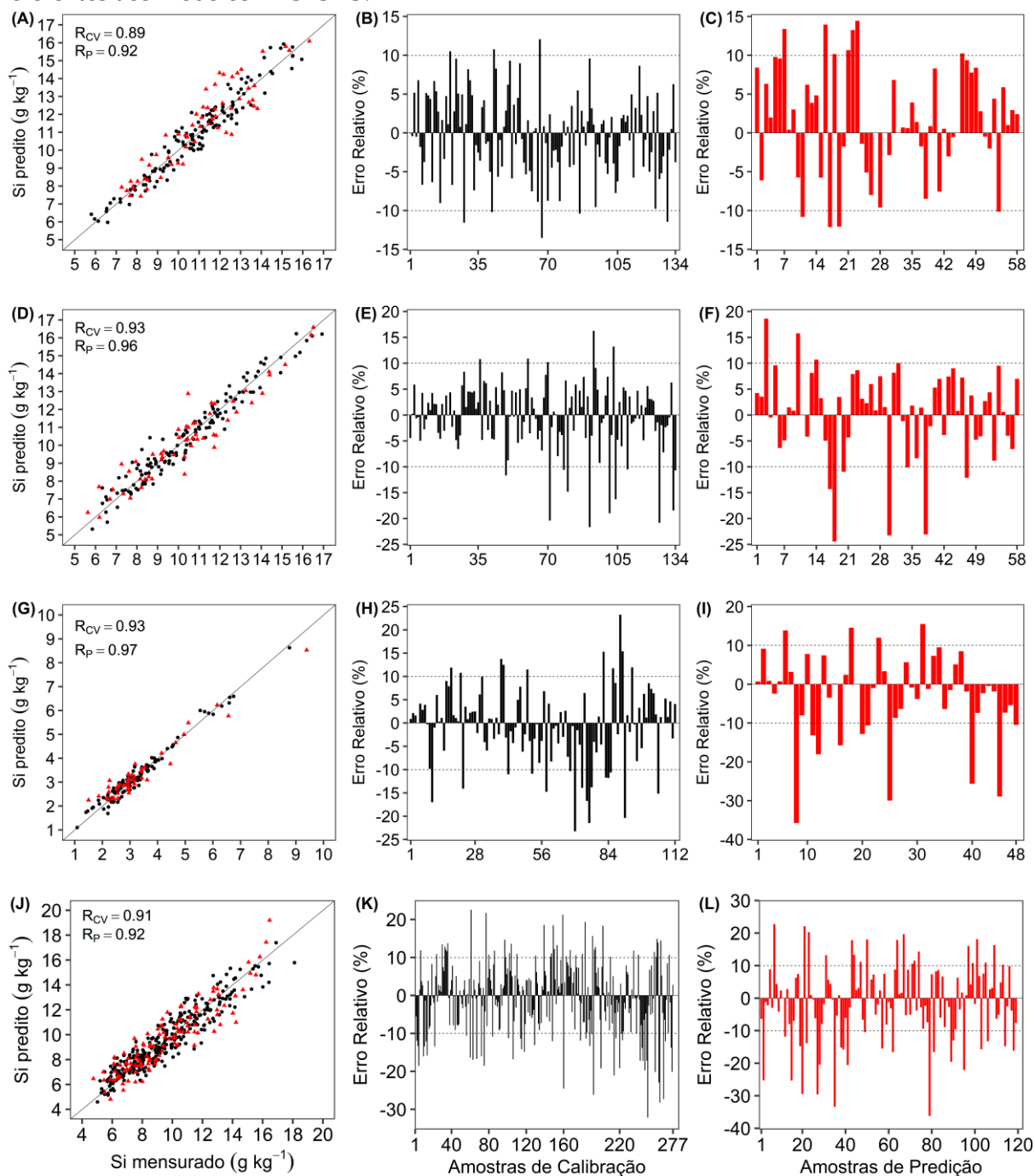
A Figura 3 apresenta os valores mensurados versus preditos, bem como os erros relativos obtidos nas etapas de calibração e predição para todas as partes da cana-de-açúcar. Os valores apresentados são referentes aos modelos PLS-OPS.

Observou-se forte correspondência linear entre os valores observados e preditos para todas as partes avaliadas, conforme ilustrado nas Figuras 3A, 3D, 3G, 3J. Quanto maior a exatidão dos modelos preditivos, maior a concentração dos pontos ao longo da linha de 45°, a qual representa a condição ideal de predição perfeita ($R = 1$). A Figura 3 também apresenta os erros relativos calculados nas etapas de calibração (Figuras 3B, 3E, 3H e 3K) e de predição (Figuras 3C, 3F, 3I e 3L), os quais expressam a relação percentual entre os resíduos e os valores observados.

Embora algumas poucas amostras tenham apresentado erros elevados, a maioria dos valores permaneceu abaixo de 10%. Segundo Oliveira *et al.*, (2021), erros relativos inferiores a 10% indicam desempenho preditivo satisfatório em modelos multivariados aplicado à espectroscopia NIR.

Esses resultados confirmam a elevada capacidade de predição dos modelos desenvolvidos, reforçando o potencial da espectroscopia NIR como uma técnica rápida, precisa e eficiente para determinação do teor de Si em diferentes partes da cana-de-açúcar. A aplicação desta técnica no programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar permitirá otimizar o processo de avaliação e seleção de genótipos.

Figura 3 – Valores mensurados versus preditos para teor de Si na folha TVD (A), nas folhas totais (D), nos colmos (G) e na parte aérea (J) para o conjunto de calibração (●) e de predição (▲). Erro relativo da calibração para teor de Si na folha TVD (B), nas folhas totais (E), nos colmos (H) e na parte aérea (K). Erro relativo da predição para teor de Si na folha TVD (C), nas folhas totais (F), nos colmos (I) e na parte aérea (L). Os valores apresentados são referentes aos modelos PLS-OPS.



Fonte: elaborado pelo próprio autor. R_{CV}: coeficiente de correlação da validação cruzada; R_P: coeficiente de correlação da predição.

4 CONCLUSÕES

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), associada à regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) e à seleção de variáveis pelo método de preditores ordenados (OPS), apresentou elevada acurácia e robustez na predição do teor de Si em diferentes partes da cana-de-açúcar.

Os modelos desenvolvidos demonstraram desempenho satisfatório, com baixos erros relativos e altos coeficientes de correlação. Dessa forma, os resultados obtidos validam a espectroscopia NIR como uma ferramenta rápida e precisa para a quantificação do teor de Si em cana-de-açúcar, com aplicações diretas na avaliação e seleção de genótipos no programa de melhoramento genético.

REFERÊNCIAS

- ASHRAF, M.; RAHMATULLAH; AFZAL, M.; AHMED, R.; MUJEEB, F.; SARWAR, A.; ALI, L. Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant and Soil**, v. 326, p. 381-391, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0019-9>
- BEZERRA, B. K. L.; LIMA, G. P. P.; REIS, A. R.; SILVA, M. D. A.; CAMARGO, M. S. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, p. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>
- BOKOBZA, L. Near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 6, n. 1, p. 3-17, 1998. <https://doi.org/10.1255/jnirs.116>
- CAMARGO, M. S.; COUTINHO, I. D.; LOURENÇO, S. A.; SOARES, M. K. M.; COLNAGO, L. A.; APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CAVALHEIRO, A. J.; AMORIM, L. Potential prophylactic role of silicon against brown rust (*Puccinia melanocephala*) in sugarcane. **European Journal of Plant Pathology**, v. 157, p. 77-88, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-01982-2>
- CAMARGO, M. S.; KEEPING, M. G. Silicon in sugarcane: availability in soil, fertilization, and uptake. **Silicon**, v. 13, n. 10, p. 3691-3701, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00935-y>
- CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; FOLTRAN, D. E.; HENRIQUE, C. M.; ROSSETTO, R. Absorção de silício, produtividade e incidência de *Diatraea saccharalis* em cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 69, n. 4, p. 937-944, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000400020>
- CARDOSO, W. J.; GOMES, J. G. R.; ROQUE, J. V.; BARBOSA, M. H. P.; TEOFILLO, R. F. Dehydration as a tool to improve predictability of sugarcane juice carbohydrates using near-infrared spectroscopy based PLS models. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 220, p. 104459, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2021.104459>
- CARDOSO, W.; ROQUE, J. V.; JANSEN, J. J.; TENG, S. Y.; TEOFILLO, R. F. Combinatorial Order Pre-processing Search (COPS): A new pre-processing strategy for large-scale interpretable data analysis in process analytical technologies. **Computers & Chemical Engineering**, v. 192, p. 108892, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108892>
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar – Safra 2024/25 - Quarto levantamento, Brasília, DF, v.12, n.4, abril 2025.
- DEBONA, D.; RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. E. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. **Annual review of Phytopathology**, v. 55, n. 1, p. 85-107, 2017. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312>
- DENG, Q.; WU, J.; CHEN, J.; SHEN, W. Physiological mechanisms of improved smut resistance in sugarcane through application of silicon. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.568130>

- DEREN, C. W.; GLAZ, B.; SNYDER, G. H. Leaf-tissue silicon content of sugarcane genotypes grown on everglades histosols. **Journal of Plant Nutrition**, v. 16, n. 11, p. 2273-2280, 1993. <https://doi.org/10.1080/01904169309364685>
- ELLIOTT, C. L.; SNYDER, G. H. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 39, n. 6, p. 1118-1119, 1991. <https://doi.org/10.1021/jf00006a024>
- FERREIRA, M. M. C. **Quimiometria – Conceitos, Métodos e Aplicações**. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2015.
- FERREIRA, P. H. S.; GONÇALVES, M. T. V.; TEIXEIRA, G.; FERREIRA, M. D. P.; OLIVEIRA, R. L.; BARBOSA, M. H. P.; PETERNELLI, L. A. Comparison of family selection methodologies used in the initial phase of sugarcane breeding. **Crop Science**, v. 62, n. 2, p. 679-689, 2022. <https://doi.org/10.1002/csc2.20685>
- FIORIO, P. R.; SILVA, C. A. A. C.; RIZZO, R.; DEMATTÊ, J. A. M.; dos Santos Luciano, A. C.; da Silva, M. A. Prediction of leaf nitrogen in sugarcane (*Saccharum* spp.) by Vis-NIR-SWIR spectroradiometry. **Heliyon**, v. 10, n. 5, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26819>
- GONÇALVES, M. T. V.; MOROTA G.; COSTA, P. M. A.; VIDIGAL, P. M. P.; BARBOSA, M. H. P.; PETERNELLI, L. A. Near-infrared spectroscopy outperforms genomics for predicting sugarcane feedstock quality traits. **PloS one**, v. 16, n. 3, p. e0236853, 2021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236853>
- HONG, D. K.; TALHA, J.; YAO, Y.; ZOU, Z. Y.; FU, H. Y.; GAO, S. J.; XIE, Y.; WANG, J. Silicon enhancement for endorsement of *Xanthomonas albilineans* infection in sugarcane. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 220, p. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112380>
- JIN, S.; CHEN, H. Near-infrared analysis of the chemical composition of rice straw. **Industrial Crops and Products**, v. 26, n. 2, p. 207-211, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.03.004>
- KENNARD, R. W.; STONE, L. A. Computer Aided Design of Experiments. **Technometrics**, v. 11, n. 1, p. 137-148, 1969. <https://doi.org/10.1080/00401706.1969.10490666>
- KORNDORFER, A. P.; GRISOTO, E.; VENDRAMIM, J. D. Induction of insect plant resistance to the spittlebug *Mahanarva fimbriolata* Stål (Hemiptera: Cercopidae) in sugarcane by silicon application. **Neotropical Entomology**, v. 40, n. 3, p. 387-392, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2011000300013>
- OLIVA, K. M. E.; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M.; OLIVEIRA, E. C. A.; NASCIMENTO, C. W. A. Amorphous silica-based fertilizer increases stalks and sugar yield and resistance to stalk borer in sugarcane grown under field conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 3, p. 2518-2529, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00543-8>
- OLIVEIRA, U. F.; COSTA, A. M.; ROQUE, J. V.; CARDOSO, W.; MOTOIKE, S. Y.; BARBOSA, M. H. P.; TEOFILLO, R. F. Predicting oil content in ripe Macaw fruits (*Acrocomia*

aculeata) from unripe ones by near infrared spectroscopy and PLS regression. **Food Chemistry**, v. 351, p. 129314, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129314>

PETERNELLI, L. A.; ANDRADE, A. C. B. Insights and protocols for discrimination of sugarcane clones by dissimilarity measures on RGB and NIR data. **PloS one**, v. 18, n. 7, p. e0288508, 2023. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288508>

PETERNELLI, L. A.; GONÇALVES, M. T. V.; FERNANDES, J. G.; BRASILEIRO, B. P.; TEÓFILO, R. F. Selection of sugarcane clones via multivariate models using near-infrared (NIR) spectroscopy data. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 6, p. 889-895, 2020. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.06.p2099>

RINNAN, A.; VAN DEN BERG, F.; ENGELSEN, S. B. Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 28, n. 10, p. 1201-1222, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2009.07.007>

ROQUE, J. V.; CARDOSO, W.; PETERNELLI, L. A.; TEÓFILO, R. F. Comprehensive new approaches for variable selection using ordered predictors selection. **Analytica Chimica Acta**, v. 1075, p. 57-70, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.05.039>

SHENG, H.; CHEN, S. Plant silicon-cell wall complexes: Identification, model of covalent bond formation and biofunction. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 155, p. 13-19, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.020>

SMIS, A.; MURGUZUR, F. J. A.; STRUYF, E.; SOININEN, E. M.; JUSDADO, J. G. H.; MEIRE, P.; BRÅTHEN, K. A. Determination of plant silicon content with near infrared reflectance spectroscopy. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 496, 2014. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00496>

TEÓFILO, R. F.; MARTINS, J. P. A.; FERREIRA, M. M. C. Sorting variables by using informative vectors as a strategy for feature selection in multivariate regression. **Journal of Chemometrics**, v. 23, n. 1, p. 32-48, 2009. <https://doi.org/10.1002/cem.1192>

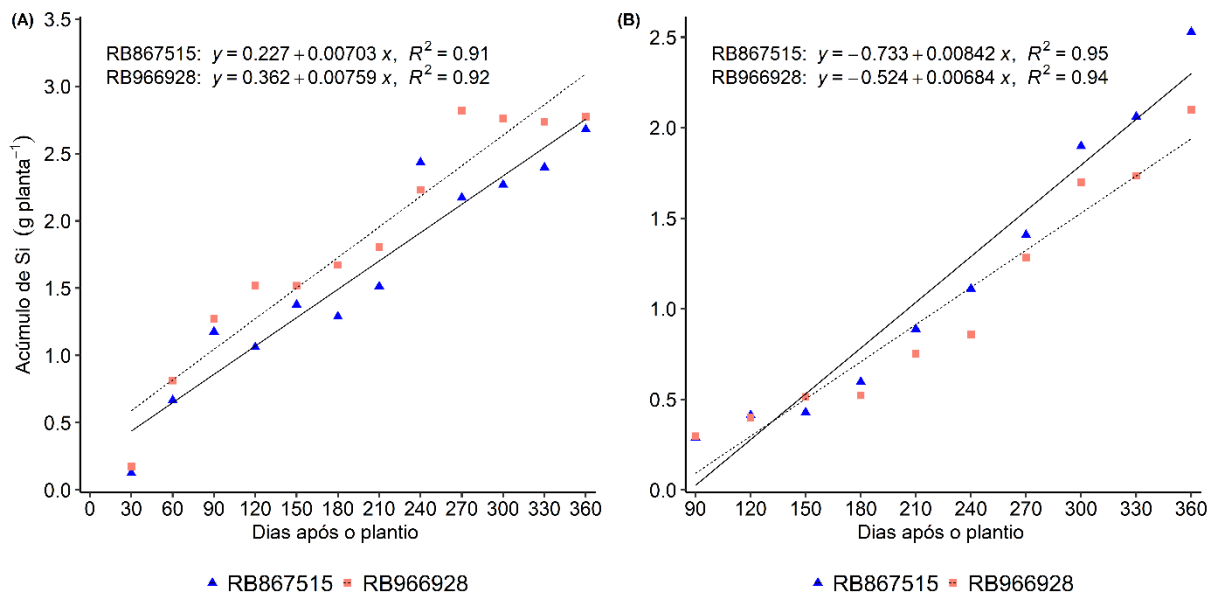
WANG, C.; Li, X.; WANG, L.; YANG, C.; CHEN, X.; LI, M.; MA, S. Prediction of N, P, and K contents in sugarcane leaves by VIS-NIR spectroscopy and modeling of NPK interaction effects. **Transactions of the ASABE**, v. 62, n. 6, p. 1427-1433, 2019. <https://doi.org/10.13031/trans.13086>

YARCE, C. J.; ROJAS, G. Near infrared spectroscopy for the analysis of macro and micro nutrients in sugarcane leaves. **Zuckerindustrie-Sugar Industry**, v. 137, n. 11, p. 707, 2012. <https://doi.org/10.36961/si13611>

ZARGAR, S. M.; MAHAJAN, R.; BHAT, J. A.; NAZIR, M.; DESHMUKH, R. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. **3 Biotech**, v. 9, n. 3, p. 73, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1613-z>

APÊNDICE

APÊNDICE A – Acúmulo de silício (Si) em folhas (A) e colmos (B) da cana-de-açúcar, em função do tempo de cultivo em dias após o plantio.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.