

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Efeitos da aplicação de calcário nos parâmetros nutricionais, produtivos e na resposta hiperespectral foliar da cana-de-açúcar em solo de baixa fertilidade**

**Carlos Augusto Alves Cardoso Silva**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

**Piracicaba  
2022**

**Carlos Augusto Alves Cardoso Silva**  
**Engenheiro Agrícola**

**Efeitos da aplicação de calcário nos parâmetros nutricionais, produtivos e na resposta  
hiperespectral foliar da cana-de-açúcar em solo de baixa fertilidade**  
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **PETERSON RICARDO FIORIO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração:  
Engenharia de Sistemas Agrícolas.

**Piracicaba**  
**2022**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Silva, Carlos Augusto Alves Cardoso Silva

Efeitos da aplicação de calcário nos parâmetros nutricionais, produtivos e na resposta hiperspectral foliar da cana-de-açúcar em solo de baixa fertilidade / Carlos Augusto Alves Cardoso Silva - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. Piracicaba, 2022.

58 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Calagem 2. 3. Espectroscopia 4. Reflectância espectral I. Título

## DEDICATÓRIA

Aos meus amados pais Francimar da Costa Silva e Marly Alves Cardoso Silva;  
Aos meus irmãos Darly Alves, Mary Mayane, Markes Marrony; e  
À minha amada noiva, Maria Patrícia.  
DEDICO!

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sem ele nada sou e nada conseguiria. Obrigado pela saúde, por permitir que alcançasse esse tão desejado sonho em me tornar mestre.

Aos meus pais Francimar da Costa Silva e Marly Alves Cardoso Silva, vocês são minhas maiores inspirações e símbolo de amor aqui na terra.

Aos meus irmãos Darly Alves Cardoso Silva, Mary Mayane Alves e Markes Marrony Alves Silva, pelo apoio e confiança.

À minha noiva Maria Patrícia Pereira Castro, pelos momentos de companheirismo e por tornar os momentos difíceis em tempos mais fáceis.

À minha família que direta ou indiretamente estiveram comigo me apoiando e acreditando nos meus objetivos.

Ao meu orientador prof. Dr. Peterson Ricardo Fiorio pela confiança depositada em mim, conselhos e ensinamentos que sempre levarei comigo.

À Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), em especial ao Dr. Fábio Luís Ferreira Dias por toda generosidade, auxílio e por permitir que o experimento fosse realizado sobre seus cuidados.

Aos meus amigos de laboratório, por compartilharem suas experiências já vividas e trocas de conhecimentos.

Aos meus amigos da vila estudantil, em especial ao Felipe, Luís, João e Rafael.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas e ao Departamento de Engenharia de Biossistemas, por promover meu crescimento profissional e científico.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela aquisição do equipamento FieldSpec® 3 Jr através do projeto de pesquisa nº 2013/22435-9 e pela disponibilidade dos multiusuários SeedReporter através do projeto de pesquisa nº 2018/03793-5.

**EPIGRAFE**

*“Se o dinheiro for a sua esperança de independência,  
você jamais a terá; a única segurança verdadeira  
consiste numa reserva de sabedoria,  
de experiência e de competência.”*  
*Henry Ford*

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>9</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>12</b>
<b>2. FERTILIDADE DO SOLO, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE TECNOLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB O EFEITO DE DOSES DE CALCÁRIO .....</b>	<b>15</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>15</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>31</b>
<b>3. DETECÇÃO DE ESTRESSE NUTRICIONAL EM CANA-DE-AÇÚCAR POR ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA VIS-NIR.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>37</b>
3.2.1 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO .....	37
3.2.2 ANÁLISES ESPECTRAIS E MACRONUTRIENTES FOLIAR.....	38
<b>3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>41</b>
3.3.1 DOSES DE CALCÁRIO E OS TEORES DE MACRONUTRIENTES FOLIARES .....	41
3.3.2 ANÁLISE DESCRITIVA DAS CURVAS ESPECTRAIS .....	42
3.3.3 CORRELAÇÃO DE SPEARMAN.....	46

3.3.3.1 SAFRA 2019/20 .....	46
3.3.3.2 SAFRA 2021 .....	48
3.3.4 ANÁLISE DE SIMILARIDADE (ANOSIM) E ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP) .....	49
3.3.5 PREDIÇÕES DOS TEORES DE NUTRIENTES COM DADOS ESPECTRAIS E PLSR 51	
<b>3.4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

## RESUMO

### **Efeitos da aplicação de calcário nos parâmetros nutricionais, produtivos e na resposta hiperespectral foliar da cana-de-açúcar em solo de baixa fertilidade**

A cana pode alcançar produções mais elevadas em um único ciclo e por períodos mais longos, neste caso, são necessárias novas técnicas que monitorem de forma rápida e precisa o estado nutricional das plantas em múltiplas escalas. Assim, o objetivo deste trabalho após cinco anos de aplicação, foi avaliar o efeito do calcário nas safras (2019/20 e 2020/21) em relação aos atributos químicos do solo, produtividade e os indicadores de qualidade tecnológica; e através de dados hiperespectrais de reflectância foliar, identificar comprimentos de ondas característicos do estresse nutricional da cana-de-açúcar. O experimento foi instalado em 06/10/2016, ocorrendo as análises após três ciclos produtivos. A calagem foi aplicada de forma fracionada, as quantidades ao final de 5 anos de cultivo, foram: 0, 9, 15 e 21 t ha<sup>-1</sup> de calcário do tipo dolomítico. A coleta de solos e folhas para análises nutricionais foram obtidos no exponencial crescimento vegetativo da cultura, enquanto os parâmetros produtivos ao final de cada safra. Os dados de reflectância hiperespectral das folhas foram registrados na fase de exponencial crescimento da cultura. Os comprimentos de onda sensíveis ao N, P, K, S, Ca e Mg foram identificados usando análise de correlação linear. Aplicou-se, também, o teste ANOSIM e o teste PCA para avaliar variabilidade dos dados. As doses de calcário na 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> safra influenciaram de forma positiva, com o aumento nos teores do pH, Ca, Mg, SB e V%, deixando as concentrações de Al, H+Al e m% a níveis baixos. Porém, houve uma redução nos teores de K no solo. Na safra 2019/20, as somatórias das doses foram: 0, 6, 12 e 18 t ha<sup>-1</sup> e com produtividades de 64, 77, 67 e 65 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. No ano subsequente, as produtividades foram: 51, 59, 55 e 54 t ha<sup>-1</sup> para as doses 0, 9, 15 e 21 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Em relação aos efeitos dos nutrientes na reflectância, a ordem do grau de correlação na região do visível foram: P > K > N > Ca > S > Mg e para região do infravermelho próximo a correlação passou a ser: P > K > Ca > N > S > Mg. O P teve picos agudos negativos e com alta correlação nos comprimentos de onda 706-717 nm, com correlação de -0,78; e na faixa e 522-543 nm (verde), com -0,76. Houve agrupamento entre as doses, porém os grupos não diferiram entre si.

Palavras-chave: Calagem, Espectroscopia, Reflectância espectral.

## ABSTRACT

### **Effects of lime application on nutritional, productive parameters and leaf hyperspectral response of sugarcane in low fertility soil**

Sugarcane can achieve higher yields in a single cycle and for longer periods, in this case, new techniques are needed that quickly and accurately monitor the nutritional status of plants on multiple scales. Thus, the objective of this work after five years of application was to evaluate the effect of limestone on the harvests (2019/20 and 2020/21) in relation to soil chemical attributes, productivity and technological quality indicators; and through hyperspectral leaf reflectance data, to identify wavelengths characteristic of nutritional stress of sugarcane. The experiment was installed on 10/06/2016, and the analyses occurred after three productive cycles. The lime was applied in a fractional way, the quantities at the end of 5 years of cultivation were: 0, 9, 15 and 21 t ha<sup>-1</sup> of dolomitic limestone. The collection of soils and leaves for nutritional analyses were obtained in the exponential vegetative growth of the crop, while the productive parameters at the end of each crop. The hyperspectral reflectance data of tealeaf's were recorded in the exponential growth phase of the crop. The wavelengths sensitive to N, P, K, S, Ca and Mg were identified using linear correlation analysis. The ANOSIM test and the PCA test were also applied to evaluate data variability. The limestone doses in the 4th and 5th crop influenced positively, with the increase in the contents of pH, Ca, Mg, SB and V%, leaving the concentrations of Al, H+Al and m% at low levels. However, there was a reduction in k contents in the soil. In the 2019/20 harvest, the sums of the doses were: 0, 6, 12 and 18 t ha<sup>-1</sup> and with yields of 64, 77, 67 and 65 t ha<sup>-1</sup>, respectively. In the following year, the yields were: 51, 59, 55 and 54 t ha<sup>-1</sup> for doses 0, 9, 15 and 21 t ha<sup>-1</sup>, respectively. Regarding the effects of nutrients on reflectance, the order of the degree of correlation in the region of the visible were: P > K > N > Ca > S > Mg and for the near infrared region the correlation became P > K > Ca > N > S > Mg. P had negative acute peaks and with high correlation in wavelengths 706-717 nm, with a correlation of -0.78; and in the range and 522-543 nm (green), with -0.76. There was grouping between doses, but the groups did not differ from each other.

**Keywords:** Liming, Spectroscopy, Spectral Reflectance.



## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) do mundo, estima-se que a produção nacional para a safra 2021/22 é de 568,4 milhões de toneladas (CONAB, 2021). A projeção para a produção de etanol é de 50 bilhões de litros até 2030 e a quantidade de cana destinada a produção do biocombustível é estimada em 485 milhões de toneladas (EPE, 2019).

Através da expansão na produção de cana-de-açúcar e de etanol, o PIB nacional poderá aumentar 2,6 bilhões de dólares em até 2030, influenciando de forma positiva no número de emprego, além do mais, os benefícios se estendem a todas as regiões de plantio da cana, gerando emprego adicional, principalmente nas classes de renda mais baixa (BRINKMAN et al., 2018).

Além disso, a biomassa da cana-de-açúcar é vista como uma alternativa sustentável para a produção de energia limpa e combustíveis renováveis, permitindo a substituição de combustíveis fósseis e a redução das emissões de gases de efeito estufa (WIESBERG et al., 2021; SINGH; GU, 2010).

Contudo, para que a cana-de-açúcar alcance altas produtividades precisa de tratamentos culturais especiais logo no preparo do solo. A calagem, por exemplo, é uma prática reconhecida por elevar a produtividade e a longevidade dos canaviais cultivados nos solos tropicais ácidos e intemperizados, sendo uma das primeiras práticas agrícolas realizadas no solo antes da implantação do canavial (FERRAZ et al., 2015). Sendo o calcário o principal corretivo da acidez do solo e também o mais utilizado na calagem, conhecido por afetar os parâmetros de crescimento da cana, além de melhorar o teor de sacarose e os parâmetros de crescimento (altura, diâmetro e peso do colmo) das plantas (PANG et al., 2019).

No entanto, estudos mostram que o efeito do calcário aplicado na superfície para correção do subsolo sofre efeitos indesejáveis de acordo com a taxa e granulometria do produto, forma de aplicação, tipo de solo, condições climáticas, sistema de cultivo e tempo de aplicação (SORATTO; CRUSCIOL, 2008; CRUSCIOL et al., 2017). A variabilidade desses fatores coloca em questão a eficiência da correção do solo, particularmente, a correção da acidez do subsolo (CRUSCIOL et al., 2017). Tornando-se, desta forma, essenciais estudos que abordem técnicas e período de aplicação da calagem, a fim de alcançar produções mais elevadas em um único ciclo e por períodos mais longos.

Dessa forma, visando promover uma maior eficiência agrícola frente aos desafios da agricultura mundial, o uso de geotecnologias no gerenciamento e controle dos processos produtivos têm sido cada vez mais empregados pelos agricultores (FURTADO et al., 2020). Neste caso, o sensoriamento remoto por meio da espectroscopia permite avaliar o

desenvolvimento, estado nutricional e sanidade das culturas, através da relação entre a absorção da luz e quantidade de radiação refletida pelas folhas (NAUE et al., 2011).

Diversos estudos no mundo já foram realizados para identificar o estresse nutricional da planta através de dados hiperespectrais da folha e/ou dossel, dentre as culturas mais estudadas, estão: alface (PACUMBABA et al., 2011), trigo (MAHAJAN et al., 2014; ANSARI et al., 2016), milho (OSBORNE et al., 2002), beterraba e morango (SIEDLISKA et al., 2021), arroz (MAHAJAN et al., 2017) e citros (LIU et al., 2015).

O uso destas técnicas de sensoriamento remoto para detecção de estresse nutricional das plantas é baseado na alteração da fotossíntese e na estrutura física da planta que acabam afetando a absorção de energia luminosa e, assim, alteram o espectro de reflectância das plantas. No entanto, poucos trabalhos no mundo procuram identificar estresse nutricional da cana-de-açúcar por meio de técnicas hiperespectrais foliar, e na maioria dos casos é limitado à previsão do nitrogênio e biomassa. Desta forma, o estudo foi realizado em duas etapas, resultando em dois capítulos.

No primeiro capítulo, foi abordado sobre os efeitos do calcário em solo cultivado por cana-de-açúcar após cinco ciclos produtivos, neste caso, o estudo descreve os efeitos desejáveis e indesejáveis ocasionados pela aplicação de calcário em dosagens baixas e elevadas, além disso, comenta sobre os efeitos do déficit hídrico na incorporação do calcário ao solo, seus efeitos na produtividade e, também, relata sobre os efeitos da calagem nos parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar. No segundo capítulo, o estudo focou no aspecto nutricional da cultura e por meio de técnicas de sensoriamento remoto hiperespectral identificou comprimentos de ondas (nm) característico do estresse nutricional de alguns nutrientes, como no caso do fósforo, potássio, enxofre e nitrogênio.

Os dois estudos aqui apresentados fornecem informações úteis sobre a calagem em solos com plantio de cana-de-açúcar, e também descrevem técnicas de sensoriamento remoto que podem auxiliar na identificação de estresse nutricional da cana-de-açúcar.

## REFERÊNCIAS

ANSARI, M. S.; YOUNG, K. R.; NICOLAS, M. E. Determining wavelenth for nitrogen and phosphorus nutrients through hyperspectral remote sensing in wheat (*Triticum aestivum* L.) plant. **Int. J. Bio-Resour. Stress Manage**, v. 7, n. 4, p. 653-662, 2016.

BRINKMAN, M. L. J.; CUNHA, M. P.; HEIJNEN, S.; WICKE, B.; GUILHOTO, J. J. M.; WALTER, A.; FAAIJ, A. P. C.; HILST, F. V. Interregional assessment of socio-economic

effects of sugarcane ethanol production in Brazil. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 88, p. 347-362, 2018.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira da cana-de-açúcar**. 2021. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 16.mar.2022.

CRUSCIOL, C. A. C.; ROSSATO, O. B.; FOLTRAN, R.; MARTELLO, J. M.; NASCIMENTO, C. A. C. D. Soil fertility, sugarcane yield affected by limestone, silicate, and gypsum application. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 48, n. 19, p. 2314-2323, 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Investimentos e custos operacionais e de manutenção no setor de biocombustíveis: 2020-2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br). Acesso em: 19 dez. 2019.

FERRAZ, R. L. S.; SOUZA FERRAZ, R. L.; ANDRADE BARBOSA, M.; LIMABATISTA, J.; DOURADO MAGALHÃES, I.; FIGUEIREDO DANTAS, G.; OLIVEIRA FRANCO, F. Calagem em cana-de-açúcar: efeitos no solo, planta e reflexos na produção. **InterfacEHS**, 10:166-177, 2015.

FREITAS FURTADO, G.; DE VASCONCELOS SILVA, E.; DE FREITAS FURTADO, B. E.; CAROLINA, A.; PALMEIRA, R. As geotecnologias e o agronegócio brasileiro: Um estudo de caso na produção de Soja. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, v. 10, n. 3, p. 88–96, 2020.

LIU, Y.; LYU, Q.; HE, S.; YI, S.; LIU, X.; XIE, R.; ZHENG, Y.; DENG, L. Prediction of nitrogen and phosphorus contents in citrus leaves based on hyperspectral imaging. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 2, p. 80-88, 2015.

MAHAJAN, G. R.; PANDEY, R. N.; SAHOO, R. N.; GUPTA, V. K.; DATTA, S. C.; KUMAR, D. Monitoring nitrogen, phosphorus and sulphur in hybrid rice (*Oryza sativa* L.) using hyperspectral remote sensing. **Precision agriculture**, v. 18, n. 5, p. 736-761, 2017.

MAHAJAN, G. R.; SAHOO, R. N.; PANDEY, R. N.; GUPTA, V. K.; KUMAR, D. Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Precision agriculture**, v. 15, n. 5, p. 499-522, 2014.

NAUE, C. R.; MARQUES, M. W.; LIMA, N. B.; GALVÍNCIO, J. D. Sensoriamento remoto como ferramenta aos estudos de doenças de plantas agrícolas: uma revisão (Remote Sensing as a Toll for the Study of Plant Diseases on Agriculture: a Revision). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, n. 3, p. 190-195, 2011.

OSBORNE, S.; SCHEPERS, J.; FRANCIS, D.; SCHLEMMER, M. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 1215-1221, 2002.

PACUMBABA, J. R. R. O.; BEYL, C. A. Changes in hyperspectral reflectance signatures of lettuce leaves in response to macronutrient deficiencies. **Advances in Space Research**, v. 48, n. 1, p. 32-42, 2011.

PANG, Z.; TAYYAB, M.; KONG, C. H. U. C.; ZHU, Z.; WEI, X.; YUAN, Z. Liming positively modulates microbial community composition and function of sugarcane fields. **Agronomy**, v. 9, n. 12, p. 808, 2019.

SIEDLIKA, A.; BARANOWSKI, P.; PASTUSZKA-WOŹNIAK, J.; ZUBIK, M.; KRZYSZCZAK, J. Identification of plant leaf phosphorus content at different growth stages based on hyperspectral reflectance. **BMC Plant Biology**, v. 21, n. 1, p. 1-17, 2021.

SINGH, J.; GU, S. Biomass conversion to energy in India a critique. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 5, p. 1367-1378, 2010.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Chemical soil attributes as affected by lime and phosphogypsum surface application in a recently established no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 675-688, 2008.

WIESBERG, I. L.; DE MEDEIROS, J. L.; DE MELLO, R. V. P.; MAIA, J. G. S.; BASTOS, J. B. V.; QUEIROZ, F. A. O. Bioenergy production from sugarcane bagasse with carbon capture and storage: Surrogate models for techno-economic decisions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111486, 2021.

## 2. FERTILIDADE DO SOLO, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE TECNOLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB O EFEITO DE DOSES DE CALCÁRIO

### RESUMO

Objetivou-se avaliar em duas safras consecutivas (2019/20 e 2020/21) os atributos químicos do solo, a produtividade e os indicadores de qualidade tecnológica da cultivar IACSP95-5000 cultivada sob o efeito de doses de calcário após cinco anos de aplicação contínua. O experimento foi instalado em 06/10/2016, ocorrendo as análises após três ciclos produtivos. A calagem foi aplicada de forma fracionada de acordo com as doses pré-estabelecidas, as quantidades ao final de cinco anos de cultivo, foram: 0, 9, 15 e 21 t ha<sup>-1</sup> de calcário do tipo dolomítico. Foi realizado um levantamento das condições meteorológicas entre o período de agosto de 2019 e agosto de 2021. As doses de calcário na 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> safra influenciaram de forma positiva, aumentando os teores do pH, Ca, Mg, SB e V%, deixando as concentrações de Al, H+Al e m% a níveis baixos. Porém, houve uma redução nos teores de K no solo. Na safra 2019/20, as somatórias das doses foram: 0, 6, 12 e 18 t ha<sup>-1</sup> e com produtividades de 64, 77, 67 e 65 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. No ano subsequente, as produtividades foram: 51, 59, 55 e 54 t ha<sup>-1</sup> para as doses 0, 9, 15 e 21 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Os parâmetros tecnológicos não apresentaram diferença entre as doses, mas os efeitos do déficit hídrico na safra 2020/21 influenciaram na redução da produtividade, enquanto os parâmetros tecnológicos foram favorecidos com o aumento dos teores de Brix e ATR.

Palavras-chave: Solo tropical, Química do solo, Déficit hídrica.

### ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate in two consecutive harvests (2019/20 and 2020/21) the chemical attributes of the soil, productivity and technological quality indicators of the cultivar IACSP95-5000 cultivated on the effect of limestone doses after five years of continuous application. The experiment was installed on 10/06/2016, and the analyses occurred after three productive cycles. The liming was applied fractionally according to pre-established doses, the amounts at the end of five years of cultivation were: 0, 9, 15 and 21 t ha<sup>-1</sup> of dolomitic limestone. A survey of the meteorological conditions between August 2019 and August 2021 was carried out. The limestone doses in the 4th and 5th crop influenced positively, aumentand the pH, Ca, Mg, SB and V% contents, leaving the concentrations of Al, H+Al and m% at low levels. However, there was a reduction in K contents in the soil. In the 2019/20 harvest, the sums of the doses were: 0, 6, 12 and 18 t ha<sup>-1</sup> and with yields of 64, 77, 67 and 65 t ha<sup>-1</sup>, respectively. In the following year the yields were: 51, 59, 55 and 54 t ha<sup>-1</sup> for doses 0, 9, 15 and 21 t ha<sup>-1</sup>, respectively. The technological parameters showed no difference between doses, but the effects of water deficit in the 2020/21 crop influenced the reduction of productivity, while the technological parameters were favored with the increase of Brix and ATR contents.

Keywords: Soil chemistry, Tropical soil, Water deficit.

## 2.1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, *Saccharum* spp da família Poaceae (Gramínea), é típica de climas tropicais e semitropicais sendo a principal matéria-prima para a fabricação de açúcar e etanol, assim como diversos outros produtos, como: melação, bioplástico, biodiesel, querosene e energia elétrica, além de ser muito usada in natura para alimentação animal (KIRUBAKARAN et al., 2013; NOGUEIRA, et al., 2015).

Apesar da cana ser uma cultura conhecida por se adaptar a solos mais ácidos, o calcário é visto por promover benefícios a cultura quando o solo apresenta baixa fertilidade e pH inferior a 4,4 (ROSSETO et al., 2004). Estudos mais recentes apontam que o aumento do pH no solo promove alta na produção da cana-de-açúcar (LIMA et al., 2016). Assim, a calagem é uma prática reconhecida por elevar a produtividade e a longevidade de canaviais cultivados em solos tropicais ácidos e intemperizados, sendo uma das primeiras práticas agrícolas realizadas no solo antes da implantação do canavial (FERRAZ et al., 2015).

A acidez do solo afeta também a disponibilidade dos nutrientes essenciais e elementos tóxicos, comprometendo o crescimento da cultura e a produtividade (AZEVEDO et al., 2021). O produto mais utilizado no Brasil para corrigir a acidez do solo é o calcário, que aumenta o pH e a saturação por bases (V%), neutralizando o alumínio (NOLLA et al., 2021).

Pelos fatores descritos anteriormente, as abordagens acerca do calcário já são bem conhecidas, mas, são ainda primordiais para o avanço do agronegócio, isso porque dentre os fatores ambientais do solo, os ligados à acidez (pH, saturação por bases, acidez potencial e disponibilidade de nutrientes) interferem de forma significativa a produtividade das culturas (FERRAZ et al., 2015).

Além disso, existem poucos estudos a respeito da aplicação de calcário para correção da acidez no sistema de colheita sem queima e com resíduo da cana no solo, pois as recomendações de aplicação de calcário para correção do pH em cana-de-açúcar foram desenvolvidas para um sistema de colheita de cana queimada (Crusciol et al., 2017).

Além do mais, para a cana-de-açúcar é importante avaliar a interação genótipo e ambiente que se expressa na heterogeneidade dos solos, relevos acidentados e, sobretudo na irregularidade das chuvas (DUTRA FILHO et al., 2014). Pois, os fatores climáticos de um ano agrícola são diferentes de outro, afetando o desempenho agrônômico das variedades, reduzindo inclusive, a longevidade das soqueiras com consideráveis perdas na produtividade (DUTRA FILHO et al., 2018).

As variedades tem comportamento diferente quanto a exigência nutricional e o período de amadurecimento. A variedade IACSP95-5000, por exemplo, se destaca por atingir o nível de sacarose ideal para o corte em diferentes períodos, além de possuir alto potencial agroindustrial e adaptabilidade à colheita mecanizada (GOMES; CARVALHO, 2007).

Embora tenha muitas vantagens relativas ao clima e as condições de cultivo, a produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo segue abaixo do patamar que já alcançou na década passada. A cana pode alcançar produções mais elevadas em um único ciclo e por períodos mais longos, a depender das técnicas de aplicação do corretivo, manejo e condições climáticas. Neste caso, a época de aplicação e as doses de calcário utilizadas na correção do solo são fatores que podem contribuir na obtenção de produtividade elevadas por períodos mais longos, pois esses processos interferem diretamente na disponibilidade e absorção de nutrientes pelas plantas.

Desta forma, objetivou-se avaliar em duas safras consecutivas (2019/20 e 2020/21) os atributos químicos do solo, a produtividade e os indicadores de qualidade tecnológica da cultivar IACSP95-5000 cultivada sob o efeito de doses de calcário após cinco anos de aplicação contínua.

## **2.2 MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido em condições de campo e instalado em uma área experimental da Agência Paulista de Tecnologia do Agronegócio – APTA, localizada no município de Piracicaba, São Paulo, Brasil. O clima da região segundo a classificação de Köppen é denominado subtropical úmido (Cwa), com pluviosidade média anual inferior a 1400 mm, com duas estações bem definidas, sendo o inverno seco e o verão chuvoso.

A variedade utilizada no estudo foi a IACSP95-5000, conhecida pela alta produtividade, bom porte ereto, ótima brotação de soqueira, bom perfilhamento e fechamento entre linhas, baixa concentração de plantas tombadas e com pouco florescimento, resistente a doenças e apresenta ótimos resultados em situações de déficit hídrico (CHAVES et al., 2015). A área experimental havia sido cultivada anteriormente com cana por três ciclos-safras, ocorrendo as análises no quarto e quinto ciclo produtivo da cultura. O solo é descrito como Latossolo vermelho, textura argilosa e relevo plano.

No momento da implantação do experimento (06/10/2016) o solo apresentava as seguintes características químicas (Tabela 1) nas camadas 0-20, 20-40 e 40-60 cm, sendo que as amostragens de solo foram obtidas por meio de três amostras simples, originando uma composta para cada parcela de 172,5 m<sup>2</sup>.

**Tabela 1.** Atributos químico do solo nas profundidades 0-20, 20-40 e 40-60 cm, antes da primeira aplicação de calcário.

Camadas (cm)	pH CaCl2	M.O. g.dm <sup>-3</sup>	P mg.dm <sup>-3</sup>	S mg.dm <sup>-3</sup>	Ca -----	Mg -----	K -----	Al mmolc dm <sup>-3</sup>	H+Al -----	S.B. -----	CTC -----	V% -----	m% -----
0-20	4,1	21	24	21	13	8	1,2	5	88	22	110	20	18
20-40	4,1	16	6	42	8	7	1,0	8	88	16	104	15	33
40-60	4,2	11	4	67	8	5	0,5	7	80	14	94	14	34

A correção do solo foi feita de forma manual com aplicação de doses de calcário do tipo dolomítico, indicado para a correção de solo com baixo teor de Ca e Mg. A aplicação aconteceu na palhada após o corte da cana-de-açúcar de forma manual de acordo com as doses pré-determinadas para cada tratamento. O experimento foi instalado em 06/10/2016 e as aplicações das doses de calagem foram distribuídas entre os anos 2016 (implantação), 2017, 2018, 2019 e 2020.

Seguindo às recomendações técnicas do Boletim 100 – IAC, a adubação de plantio foi realizada conforme resultados da análise de solo, bem como nas soqueiras para as safras 2019/20 e 2020/21 onde as adubações nos referidos anos foram realizadas em cobertura possuindo as seguintes recomendações: na safra de 2019/20 foi aplicado 600 kg da fórmula 20-05-20 e na safra 2020/21, aplicou-se 375 kg de nitrato de amônio, 233 kg cloreto de potássio e 100 kg de fosfato reativo Yoorin.

O delineamento adotado foi em blocos casualizados com 4 doses e 6 repetições. Cada parcela possuía 5 linhas espaçadas de 1,5 m e 23 m de comprimento. Os dados foram coletados somente nas 3 linhas centrais, considerando as 2 das laterais como bordadura. As aplicações de calcário foram fracionadas no período de 2016 a 2020 (Tabela 2). Sendo que, no 4º ciclo ou 3ª cana soca a somatória das doses, foram 0, 6, 12 e 18 t ha<sup>-1</sup>, acrescido mais 3 toneladas no último ciclo (safra 2020/21) para todas as doses, com exceção da testemunha, as somatórias das doses ao final da safra 2020/21, foram: 0, 9, 15 e 21 t ha<sup>-1</sup>.

**Tabela 2.** Aplicações de calcário de forma fracionada no período de 2016 a 2020.

Época de aplicação	Dose 1	Doses 2	Dose 3	Dose 4
	----- Calcário em t ha <sup>-1</sup> -----			
2016/ plantio	0	3	6	12
2017/ 1ª soca	0	-	3	-
2018/ 2ª soca	0	3	3	3
2019/ 3ª soca	0	-	-	3
2020/ 4ª soca	0	3	3	3
Soma	0	9	15	21

Os resultados foram alcançados somente a partir do 4º ciclo de produção da cultura (safras 2019/20 e 2020/21), tempo este, suficiente para a melhor interação entre a cultura e os efeitos das doses de calcário no solo. As datas de coleta dos dados de altura de planta, análise química do solo, produtividade e parâmetros tecnológicos estão descritos na Tabela 3.

**Tabela 3.** Datas e fase fenológica no momento das análises de altura de planta, atributos químicos do solo, produtividade e tecnológica, para as safras de 2019/20 e 2020/21.

Parâmetros	Data (mês/ano)	Fases fenológicas
Corte da 2ª cana soca	08/2019	Maturação
Altura de planta	03/2020	Estádio vegetativo
Química do solo	04/2020	Maturação
Produtividade	09/2020	Maturação
Tecnológica	09/2020	Maturação
1º Altura de planta	03/2021	Estádio vegetativo
2º Altura de planta	05/2021	Estádio vegetativo
3º Altura de planta	07/2021	Maturação
Química do solo	05/2021	Maturação
Tecnológica	08/2021	Maturação
Produtividade	09/2021	Maturação

Nas três linhas centrais de cada unidade experimental foram coletadas três amostras simples de solo na profundidade de 0-0,25 m, seguida de uma amostra composta, totalizado 24 amostras para cada ciclo produtivo. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e enviadas ao laboratório de solos da Escola de Agricultura Luiz de Queiroz/ESALQ para a realização das análises químicas do pH (CaCl<sub>2</sub>), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Potássio (K), Fósforo (P), Enxofre (S), Matéria Orgânica (M.O.), Alumínio (Al), Acidez Potencial (H+Al), Soma de Bases (S.B.), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação por Bases (V%) e Saturação por Alumínio (m%).

As amostras para análises de características tecnológicas foram feitas através da coleta de 10 colmo das linhas centrais de cada parcela. Posteriormente, as amostras foram encaminhadas ao laboratório de tecnologia da APTA, Piracicaba, SP, para as análises do teor de Açúcares Redutores do caldo (AR), Sólidos Solúveis (Brix), Teor de Sacarose no caldo (POL caldo), Pureza da cana (PC) e Açúcar Total Recuperável (ATR), conforme metodologia do CONSECANA (2015).

A fim de avaliar se houve influência das variáveis meteorológicas no desenvolvimento da cultura e na produtividade, foram verificadas as condições da temperatura do ar, insolação diária e precipitação pluviométrica para o município de Piracicaba/SP. Cabe destacar que, a estação meteorológica onde os dados foram coletados, encontra-se a menos de 500 m de

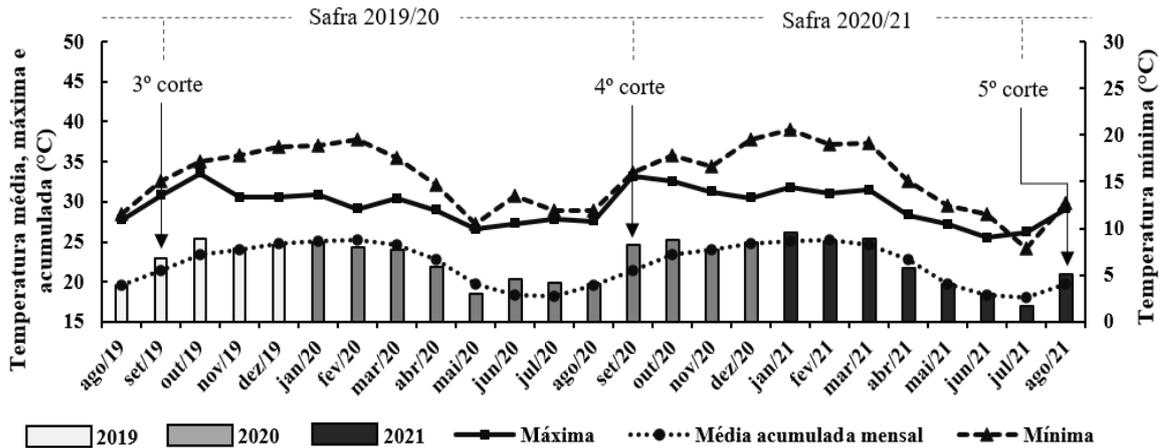
distância da área experimental. Assim, os dados de precipitação (mm), temperatura máxima e mínima (°C) e insolação (h/dia) foram analisados através da média mensal, no período de agosto de 2019 a agosto de 2021. Além disso, para as mesmas variáveis foi realizado um levantamento histórico de 1980 a 2021.

Os dados foram organizados em gráficos boxplot com os valores da média, mediana, primeiro e terceiro quartil, assim como os valores máximo e mínimos. Para fins estatísticos, os dados passaram pelo teste de normalidade pelo método de Shapiro e Wilk, a  $p < 95\%$ , de modo que os pressupostos da ANOVA fossem satisfeitos, o efeito das doses de calcário na altura de planta, produtividade e atributos químicos do solo foram avaliados por meio da regressão polinomial linear e quadrática, os dados foram gerados por meio do programa estatístico SISVAR 5.0 (FERREIRA, 2011).

### **2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A temperatura mensal entre os meses de agosto de 2019 e setembro de 2021, registrou médias de 18,5 (junho/2021) a 26,17° C (janeiro/2021). Por outro lado, os meses de outubro de 2019, setembro (2020) e outubro (2020) foram os mais quentes com médias de 33, 33 e 32° C, respectivamente. Os meses mais frios foram maio/2020 (10,54° C), junho/2021 (11,49° C) e agosto/2019 (11,53° C).

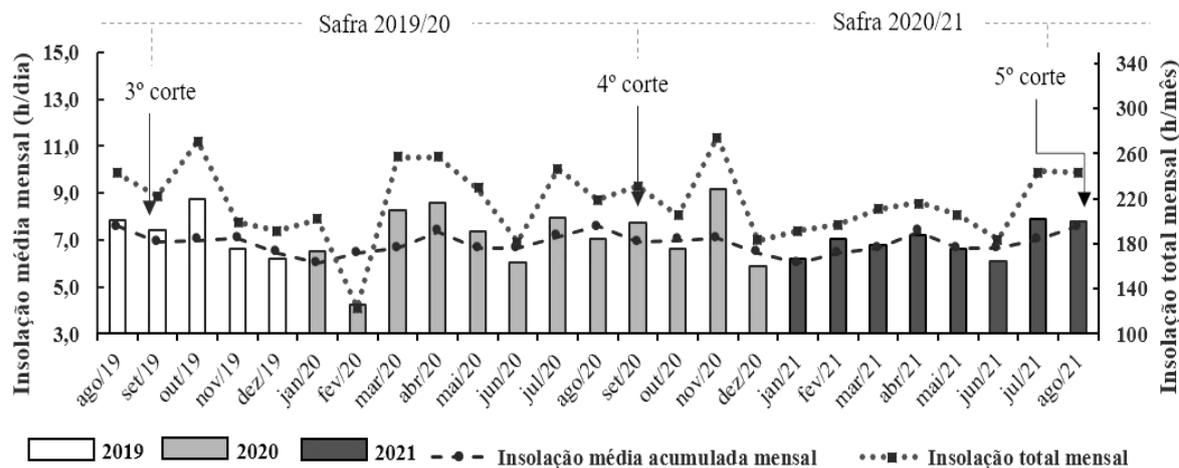
Nos meses de setembro, outubro e novembro a soqueira de cana soca encontrava-se na fase inicial do crescimento vegetativo, sendo de suma importância para cultura que neste período as condições de temperatura ambiente estejam dentro do ideal para um bom desenvolvimento. Segundo Vianna e Sentelhas (2014), a taxa dos processos fisiológicos da cultura da cana-de-açúcar varia em função da temperatura do ar de cada local, em ambientes com temperaturas mais elevadas, o período requerido para a ocorrência dos processos fisiológicos das plantas são mais curtos que em locais com temperaturas mais amenas.



**Figura 1.** Gráfico de temperatura média, máxima e mínima mensal entre os meses de agosto de 2019 a setembro de 2021 e temperatura média acumulada do período de 1980 a 2021, região de Piracicaba – SP.

Os resultados se assemelham com os de Aguirre et al. (2020) que para temperatura máxima mensal, compreendendo o período de 1975 a 2017 obtiveram os três primeiros (janeiro, fevereiro e março) e os quatro últimos meses (setembro, outubro, novembro e dezembro) com maiores temperaturas para o município de Piracicaba/SP. Segundo VASANTHA et al. (2021), a temperatura ótima para o crescimento da cana-de-açúcar é em torno de 37°C. Neste caso, as safras estudadas estiveram em temperaturas dentro do ideal para um bom desenvolvimento da cultura.

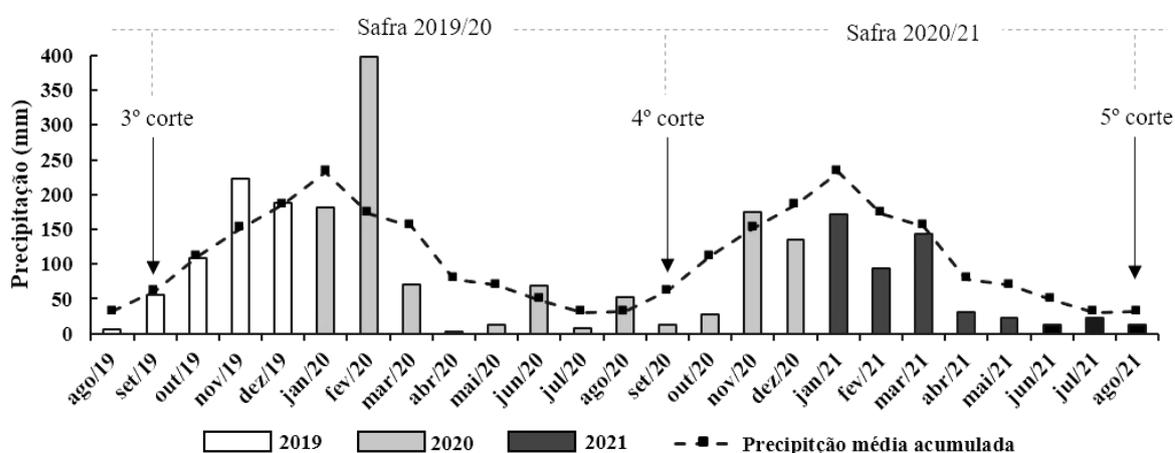
Além da temperatura, a quantidade de horas por dia de insolação se faz importante como forma de identificar os meses com maior número de dias com sol. Na safra 2019/20, os meses com maior número de h/dia de insolação foram outubro (8,8 h/dia), seguido de abril (8,6 h/dia) e março (8,3 h/dia); já na safra 2020/21, foram novembro (9,2 h/dia), julho (7,9 h/dia) e agosto (7,8 h/dia). Não houve grande diferença de uma safra para outra em relação a insolação (Figura 2).



**Figura 2.** Gráfico de insolação (h/dia) média e total mensal entre os meses de agosto de 2019 a setembro de 2021 e insolação média mensal acumulada no período de 1980 a 2021, região de Piracicaba – SP.

Nos meses de alta concentrações de chuva, registrou menos h/dia de insolação, como no caso do mês de fevereiro, com média próxima a 400 mm de precipitação, muito acima da média acumulada de 1980 a 2021 e insolação muito abaixo da média com 4,2 h/dia (Figura 2 e 3).

No 3º ciclo da cana soca a concentração hídrica foi de 1373,5 mm entre os meses de setembro/2019 e agosto/2020, esse acúmulo ocorreu principalmente após o terceiro corte, nos meses de outubro (109,3 mm), novembro (222,8 mm), dezembro (188,2 mm), janeiro (181,3 mm) e fevereiro (398,9 mm), tendo uma baixa acentuada nos meses de março a agosto de 2020 (Figura 3).

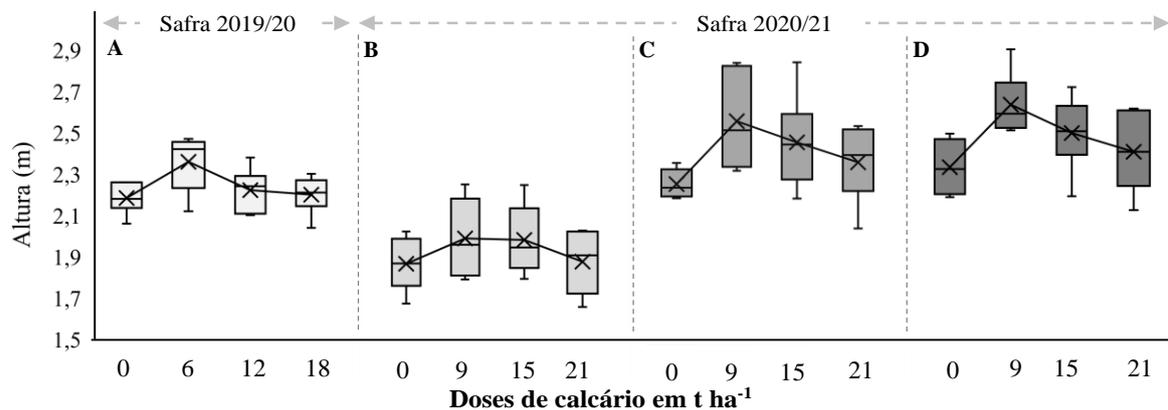


**Figura 3.** Gráfico de precipitação pluviométrica mensal entre os meses de agosto de 2019 a setembro de 2021 e precipitação média acumulada do período de 1980 a 2021, região de Piracicaba – SP.

A cana-de-açúcar possui quatro fases fisiológicas de crescimento, sendo germinação (0-60 dias), perfilhamento (60-150 dias), grande crescimento (150-240 dias) e maturidade (240-360 dias); cada fase possui uma necessidade de água de 300, 600, 1000 e 600 mm, respectivamente (VASANTHA et al., 2021). Contrário à última safra, 2020/21 registrou precipitação muito abaixo da média acumulada (1980 a 2021), principalmente nos meses de perfilhamento e grande crescimento da cana, fases que exigem altas concentrações de água (Figura 3). Conseqüentemente, o desenvolvimento da lavoura na última safra foi comprometido. Pois, a baixa disponibilidade de água afeta negativamente o crescimento das plantas e é a principal causa da redução da produtividade (FLEXAS et al., 2006).

As primeiras aferições de altura aconteceram no final do mês de março e a influência das condições meteorológicas no crescimento da cana foi identificada logo nas primeiras análises. Independente das doses aplicada os resultados foram distintos, apresentando plantas mais altas em 03/2020, comparado ao mesmo mês de 2021 (Figura 4A e 4B).

Somente no mês de maio de 2021 as alturas se equipararam as de março de 2020, ou seja, o crescimento exponencial da cultura da safra 2020/21 foi alcançado após dois meses, comparado a safra de 2019/20. A última medição da altura (Figura 4D) ocorreu na fase de maturação da cana, motivo pelo qual não se diferem tanto da realizada em 05/2021, independente das doses aplicada.



**Figura 4.** Gráfico *boxplot* da altura de planta (m) da cana-de-açúcar nas datas 03/2020 (A), 03/2021 (B), 05/2021 (C) e 07/2021 (D), referentes as doses de calcário 0 t ha<sup>-1</sup>, 6 t ha<sup>-1</sup>, 12 t ha<sup>-1</sup> e 18 t ha<sup>-1</sup>, safra 2019/20; e 0 t ha<sup>-1</sup>, 9 t ha<sup>-1</sup>, 15 t ha<sup>-1</sup> e 21 t ha<sup>-1</sup>, safra 2020/21.

Os resultados corroboram com os encontrados por Inman-Bamber et al. (2008), no qual relatam que umas das primeiras repostas da cana-de-açúcar ao déficit hídrico é a redução do crescimento. Inman-Bamber (2004), ressalta que a escassez de água afetou a cultura (cana-de-

açúcar) principalmente durante a fase de intenso crescimento, possuindo menor número de folhas verdes, largura foliar mais estreita e menor área foliar. Além disso, a produtividade média da safra 2020/21 apresentou uma queda expressiva comparado a safra anterior. Isto se deu ao fato de que a produtividade em função das doses foi sempre maior no 4º comparado ao 5º ciclo, o equivalente a 23%, 18% e 17% para as doses 6-9 t ha<sup>-1</sup>, 12-15 t ha<sup>-1</sup> e 18-21 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Deste modo, os resultados mostram que as doses de calcário influenciaram na produtividade de uma safra para outra, além disso, fatores externos como déficit hídrico também foi importante, pois independentemente da aplicação, a testemunha (0 t ha<sup>-1</sup>) registrou uma queda expressiva da produtividade do 4º para o 5º ciclo produtivo, com 20% de baixa (Tabela 4).

**Tabela 4** - Produtividade da cana-de-açúcar nas safras 2019/20 e 2020/21 em função das doses de calcário e a baixa em porcentagem da segunda para a primeira safra.

Safr 2019/20		Safr 2020/21		Diferença de produtividade	
Doses	Produtividade	Doses	Produtividade	Soma	%
----- t ha <sup>-1</sup> -----		----- t ha <sup>-1</sup> -----			
0	64	0	51	115	20
6	77	9	59	136	23
12	67	15	55	122	18
18	65	21	54	119	17
CV (%)	9,4	-	9,5	-	-

Essa queda de produtividade entre as safras ocorreu em função de dois fatores: i) é normal para cultura da cana-de-açúcar maiores produtividade nos primeiros ciclos, ocorrendo uma redução de 10 a 15% do primeiro para o próximo corte; e ii) devido ao déficit hídrico na região, no período da safra 2020/21 (Figura 3).

O calcário a longo prazo e em doses elevadas mostrou-se ser um dos fatores que influencia no crescimento da cana-de-açúcar, registrando as doses 6 e 9 t ha<sup>-1</sup> nas safras 2019/20 e 2020/21, respectivamente, as mais satisfatórias no crescimento da planta. Similar à altura de planta, as menores doses acumuladas (6 e 9 t ha<sup>-1</sup>) teve os resultados melhores de produtividade, por outro lado, quanto maior a dose, menor foi a produtividade, praticamente se igualando a testemunha (Tabela 5).

**Tabela 5** - Valores médios da altura de planta (m) e produtividade (t ha<sup>-1</sup>) em função das doses de calcário na cultura da cana-de-açúcar, safras 2019/20 e 2020/21.

Variáveis	Saфра 2019/20							
	Doses				CV (%)	Função de regressão		
	0	6	12	18		p	Modelo	R <sup>2</sup>
Alt. de Planta	2,18	2,36	2,22	2,20	4,01	0,01**	$y = -0,0491x^2 + 0,024x + 2,016$	0,52
Produtividade	64,3	77,5	69,6	64,9	6,14	0,0002*	$y = -0,1239x^2 + 2,128x + 65,55$	0,52
	Saфра 2020/21							
	Doses				CV (%)	Função de regressão		
	0	9	15	21		p	Modelo	R <sup>2</sup>
Alt. de Planta	2,23	2,52	2,43	2,34	6,60	0,009*	$y = -0,096x^2 + 0,5036x + 1,847$	0,84
Produtividade	51,0	59,3	55,2	54,0	8,18	0,04**	$y = -1,979x^2 + 10,237x + 43,79$	0,60

CV = Coeficiente de Variação (%); ns = não significativo; \*\* = significativo a 5% de probabilidade e \* = significativo a 1% de probabilidade.

Resultados semelhantes foram descritos por Prado et al. (2003), pois concluem que a maior dose de calcário, equivalente a 3,8 t ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> causou efeito depressivo no perfilhamento, no número de colmos industrializáveis e na produção da cana-de-açúcar. Por outro lado, Silva et al. (2014), relatam efeitos positivos em relação a sete doses (0, 1, 2, 3, 4, 5 e 6 t ha<sup>-1</sup>) de calcário na produtividade e qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar em solo da Amazônia, as maiores concentrações de calcário renderam produtividades mais altas. Vale destacar que, no final do último ciclo a soma das doses aplicadas foram de 9, 15 e 21 t ha<sup>-1</sup>, valores bastante elevados. Esse excesso pode ter causado um desbalanceamento dos nutrientes no solo, dificultando a absorção pelas plantas de nutrientes essenciais para o desenvolvimento da cultura, como no caso do potássio e nitrogênio, principalmente do primeiro.

Desta forma, na Tabela 6, encontra-se os valores médios e regressões dos atributos do solo das safras 2019/20 e 2020/21, em que as doses de calcário influenciaram em quase todos os atributos do solo a 1% de significância, com exceção do K que foi a 5%. No entanto, as doses de calcário não promoveram diferenças significativas para o P e M.O em ambos os ciclos produtivos, nem para CTC na 3ª cana soca (2020/21).

O pH ficou em padrões adequados para cana-de-açúcar, próximo de 6,0, tendo melhor resultados nas doses mais elevadas de calcário, partindo de 4,4 a 5,9 (safra 2019/20) e 4,4 a 5,6 (safra 2020/21), nas duas safras estudadas a acidez do solo passou de alta para baixa; na 4ª e 5ª cana soca, o P registrou teores a níveis baixos (11,1 a 14,2 mg. dm<sup>-3</sup>) e médios (19 a 24 mg. dm<sup>-3</sup>) (RAIJ et al., 1996).

Os teores de Ca e Mg aumentaram de forma linear em resposta às doses de calcário, segundo o boletim 100 – IAC os teores de Ca no solo são considerados altos quando maiores

que 7,0 mmolc.dm<sup>-3</sup> e superiores a 8 mmolc.dm<sup>-3</sup> para o Mg (RAIJ et al., 1996), neste estudo, os teores ficaram bem acima dos padrões recomendados (Tabela 6).

**Tabela 6.** Teores médios dos atributos do solo em função das doses de calcário em área com cultura da cana-de-açúcar, safra 2019/20 e 2020/21, em profundidade de 0-25 cm.

Safra 2019/20										
Atributos		Doses				CV	<i>p</i>	Regressão		
		0	6	12	18	(%)		Modelo	R <sup>2</sup>	
pH	CaCl2	4,4	4,8	5,4	5,9	4,52	< 0,01*	y = 0,0885x + 4,3318	0,99	
P	(mg. dm <sup>-3</sup> )	19,2	19,0	13,4	22,8	32,1	0,06ns	-	-	
Ca	mmolc.dm <sup>-3</sup>	23,1	28,9	41,2	55,9	15,3	< 0,01*	y = 1,8451x + 20,674	0,96	
Mg		11,7	20,0	33,0	39,5	13,5	< 0,01*	y = 1,6083x + 11,548	0,98	
K		0,70	0,74	0,61	0,58	18,1	0,04**	y = -0,0082x + 0,7335	0,74	
Al		12,5	3,4	0,0	0,0	95,2	< 0,01*	y = -0,6814x + 10,112	0,80	
H+Al		62,9	45,0	27,2	17,7	21,4	< 0,01*	y = -2,5561x + 61,222	0,98	
SB		33,7	49,6	74,7	96,0	15,9	< 0,01*	y = 3,5336x + 31,71	0,99	
CTC		103,2	94,6	102,0	113,7	6,06	< 0,01*	y = 0,142x <sup>2</sup> - 1,89x + 102,6	0,96	
V		%	37,8	52,2	73,0	84,2	12,1	< 0,01*	y = 2,6656x + 37,793	0,98
M		%	28,3	7,2	0,0	0,0	107	< 0,01*	y = -1,5361x + 22,7	0,79
MO (mg.dm <sup>-3</sup> )			19,0	18,4	19,8	19,7	5,66	0,10ns	-	-
Safra 2020/21										
Atributos		Doses				CV	<i>p</i>	Regressão		
		0	9	15	21	(%)		Modelo	R <sup>2</sup>	
pH	CaCl2	4,4	4,9	5,1	5,6	8,6	< 0,01*	y = 0,0534x + 4,3685	0,97	
P	(mg. dm <sup>-3</sup> )	14,2	24,0	11,1	20,6	48,1	0,59ns	-	-	
Ca	mmolc.dm <sup>-3</sup>	20,4	28,4	32,4	47,5	32,1	< 0,01*	y = 1,2113x + 18,587	0,91	
Mg		11,7	17,6	26,3	31,2	25,1	< 0,01*	y = 0,9597x + 10,92	0,97	
K		0,45	0,58	0,5	0,48	17,6	0,03**	y = -0,001x <sup>2</sup> + 0,02x + 0,46	0,84	
Al		18,0	3,9	0,0	0,0	51,1	< 0,01*	y = -0,8678x + 15,175	0,84	
H+Al		67,4	43,2	40,3	26,4	32,3	< 0,01*	y = -1,8594x + 65,265	0,95	
SB		32,8	51,9	56,4	79,3	34,7	0,001*	y = 2,0721x + 31,793	0,94	
CTC		100,3	95,1	96,7	105,7	9,85	0,33ns	-	-	
V		%	33,8	53,6	57,8	74,1	28,2	< 0,01*	y = 1,8219x + 34,379	0,96
M		%	30,3	9,0	0,0	0,0	115	< 0,01*	y = -1,5016x + 26,726	0,88
MO (mg.dm <sup>-3</sup> )			17,2	16,5	16,2	17,3	10,2	0,98ns	-	-

ATR = Atributos do solo; CV = Coeficiente de Variação (%); ns = não significativo; \*\* = significativo a 5% de probabilidade e \* = significativo a 1% de probabilidade.

De acordo com o boletim 100 – IAC (RAIJ et al., 1996), os teores de saturação por bases no 4º ciclo produtivo, melhorou com o aumento das doses de calcário, passando de concentrações baixas (37,8%) na testemunha (0 t ha<sup>-1</sup>), para altas (84,2 %) na dose 18 t ha<sup>-1</sup>; similar ao anterior, o 5º ciclo teve os teores de V% elevados com o aumento das doses de calcário, variando entre 33,8% (baixa) e 74,1% (alta), entre as doses 0 e 21 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Na 3ª e 4ª cana soca a calagem promoveu correção da acidez do solo na camada 0-0,25 através da elevação do pH a níveis em que o Al, H+Al e m% não se encontrava disponível para cultura, conseqüentemente houve um aumento na disponibilidade de nutrientes e alta nos teores de Ca, Mg e V% (Tabela 6). Mesmo em condições mais adequadas, as doses de calcário, principalmente as mais elevadas teve efeitos negativos nas concentrações de K nos dois ciclos estudados, pois estavam com teores muito baixo (entre 0 e 0,7 mmolc.dm<sup>-3</sup>) segundo as recomendações do boletim 100 – IAC (RAIJ et al., 1996). Além da redução dos teores de K com o aumento das doses de calcário, houve uma diminuição nas médias de K no 5º ciclo produtivo em comparação ao anterior.

No experimento de Cordero et al., (1977), a calagem causou redução de 19% na disponibilidade de K para a cana em Latossolo Roxo e 10% em Latossolo Vermelho-Amarelo. Além disso, o tipo de calcário também é um fator importante a ser levado em consideração na correção do solo. Acredita-se que essas baixas concentrações de K no solo tenha contribuído de forma negativa no desenvolvimento da cultura, pois este nutriente, dentre outras funções, é responsável por ativar mais de 60 sistemas enzimáticos, além de atuar na fotossíntese das plantas, favorece um alto estado de energia necessária para a produção de ATP, regula a abertura e o fechamento dos estômatos, promove a absorção de água e regula a translocação de nutrientes nas plantas (MEURER et al., 2018).

Segundo Otto et al. (2010), o K desempenha importante papel no crescimento, produtividade de colmos e produtividade de açúcar especialmente em solos de baixa fertilidade e que até a dose em torno de 160 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O proporciona efeitos positivos no desenvolvimento da cana-de-açúcar. Rosseto et al. (2004), destacam que a resposta da cana ao potássio foi de natureza linear em sete das dez avaliações realizadas em seus estudos, tanto na cana-planta como em soqueiras, havendo diferenças significativas entre as doses de K somente na segunda e terceira soqueiras.

As melhores produtividades nas doses 6 e 9 t ha<sup>-1</sup> estão relacionadas não somente a quantidade de calcário aplicado, mas também devido o manejo adotado na aplicação fracionada. Como o calcário tem solubilização lenta, principalmente em condições de estresse hídrico, o corretivo precisou de um maior período de tempo para a reação no solo. Doses elevadas de calcário sem incorporação, elevam muito o pH no local de aplicação, tornando indisponíveis ou menos disponíveis outros nutrientes. Logo, a dose de 3 t ha<sup>-1</sup> no plantio, somada com mais três na 2ª e 3ª cana soca, influenciou nos últimos ciclos da cultura de forma positiva. No entanto, as doses mais elevadas foram excessivas e se mostraram prejudiciais ao desenvolvimento da cana.

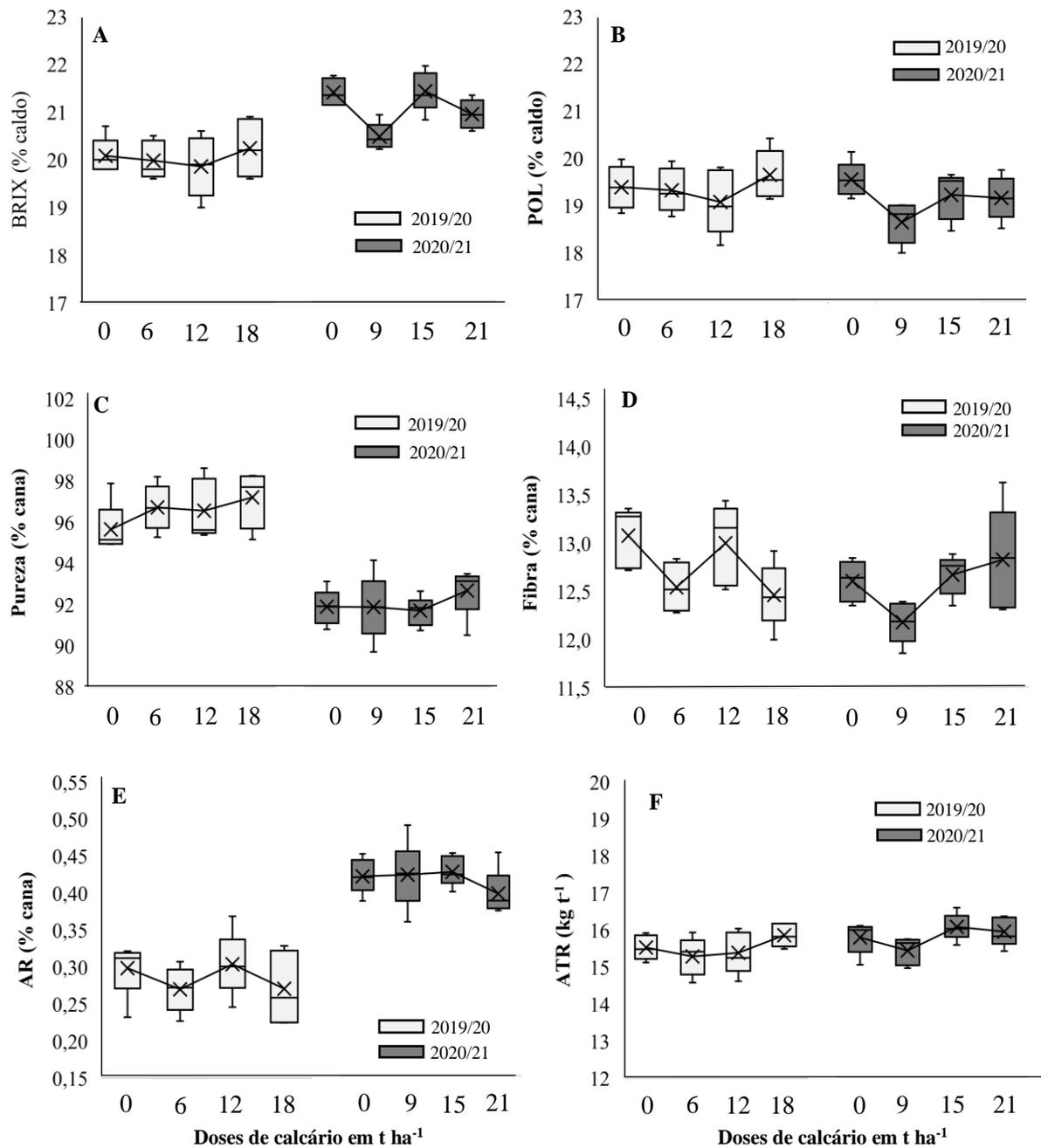
Na Figura 5, encontra-se manchas de calcário na superfície do solo da área experimental no momento da colheita da última safra (2020/21), isso mostra que houve pouca incorporação do calcário no perfil do solo e que os efeitos da aplicação neste caso foram de forma negativa e somente observados nas últimas safras.



**Figura 5.** Manchas de calcário na superfície do solo um ano após a aplicação na palhada.

Em relação aos parâmetros tecnológicos (Figura 6), a safra 2019/20 registrou teores médios em função das doses que variaram entre 19,86 (12 t ha<sup>-1</sup>) a 20,24% (18 t ha<sup>-1</sup>) para Brix; de 19,08 (12 t ha<sup>-1</sup>) a 19,65% (18 t ha<sup>-1</sup>) para POL caldo; de 95,66 (0 t ha<sup>-1</sup>) a 97,62% (18 t ha<sup>-1</sup>) para pureza; de 12,46 (18 t ha<sup>-1</sup>) a 13,08% (0 t ha<sup>-1</sup>) para fibra; de 0,27 (18 t ha<sup>-1</sup>) a 0,30% (12 t ha<sup>-1</sup>) para AR e de 15,29 (6 t ha<sup>-1</sup>) a 15,86% (18 t ha<sup>-1</sup>) para ATR.

Na safra 2020/21, os teores médios por doses para Brix foram de 20,36 (9 t ha<sup>-1</sup>) a 21,26% (0 t ha<sup>-1</sup>); para a POL caldo variou de 18,65 (9 t ha<sup>-1</sup>) a 19,52% (0 t ha<sup>-1</sup>); os teores de pureza ficaram entre 91,58 (15 t ha<sup>-1</sup>) a 92,53% (21 t ha<sup>-1</sup>); de 12,15 (9 t ha<sup>-1</sup>) a 12,78% (18 t ha<sup>-1</sup>) para fibra; os valores de AR ficaram entre 0,39 (21 t ha<sup>-1</sup>) a 0,42% (15 t ha<sup>-1</sup>), valores muito acima da safra anterior e de 15,32 (9 t ha<sup>-1</sup>) a 15,94% (15 t ha<sup>-1</sup>) para ATR (Figura 6).



**Figura 6.** Gráficos *boxplot* mostrando os teores de Sólidos Solúveis (A), Teor de Sacarose no caldo (B), Pureza da cana (C), Fibra da cana (D), Açúcares Redutores do caldo (E) e Açúcar Total Recuperável (F) da cultura da cana-de-açúcar nas safras 2019/2020 e 2020/2021, sob diferentes doses de calcário.

As doses de calcário não influenciaram diretamente nos teores das variáveis tecnológicas (Figura 6) da cana soca na mesma safra, verificando-se igualdade de eficiência entre as doses. Apesar de muito pequena as variações entre as variáveis tecnológicas em função das doses na mesma safra, os resultados da qualidade tecnológica mostram que a variedade IACSP95-5000

apresentou teores recomendados dentro do ideal, de acordo com os indicadores da qualidade e valores recomendados para industrialização da cana-de-açúcar que, segundo os autores Ripoli e Ripoli (2009), o ideal é que o teor de sacarose aparente na cana (POL) para indústria canavieira seja acima de 14%; brix maior que 18%; pureza superior a 85%; ART acima de 15%; AR com teores menores que 0,8% e fibra entre 11 a 13%.

Os teores de Brix na safra 2020/21 (21,26 a 20,36%) foram superiores que a anterior (20,24 a 19,86%), esse acréscimo na última safra (2020/21) está relacionado com a deficiência hídrica na fase de maturação ocorrendo uma inibição no crescimento da planta e favorecendo o aumento do Brix. O teor de sacarose nos colmos está ligado diretamente com a disponibilidade hídrica, nitrogênio e potássio (VASANTHA et al., 2021).

Na Figura 6B, os teores de POL (% caldo) da 3ª soca foram um pouco superiores que os da 4ª, isso se deve pela fase fenológica da cana no momento da colheita, apesar que em ambas as safras foram colhidas para análises tecnológicas na fase de maturação, a primeira teve um período maior no campo, tempo este suficiente para melhor amadurecimento.

A pureza nos dois ciclos estudados pode ser considerada como ótima, pois apresentam valores acima de 85%. No entanto, a safra de 2020/21 registrou valores muito abaixo em relação à safra anterior (Figura 6E), essa diferença está relacionada a época de colheita da última safra, pois foi colhida em período menor de tempo. Segundo Stupiello (2000), quanto mais próximo a cultura estiver da fase de crescimento mais baixa são os teores de pureza devido ao consumo de açúcares, estando diretamente relacionada com estágio vegetativo da cultura.

Os teores de fibra para o 4º (12,46 a 13,08%) e 5º (12,15% a 12,78) ciclo estão dentro do ideal de acordo com os parâmetros exigidos pela indústria sucroalcooleira (LOPES, 2011). Os valores de fibra nas duas safras estudadas (2019/20 e 2020/21) ficaram muito próximos (Figura 6D). Em aspecto industrial, maiores quantidades de fibras aumenta o volume de bagaço, por sua vez, eleva o potencial energético por meio da geração de energia e produção de álcool (LAVANHOLI, 2010).

Os teores de açúcar redutores no caldo (AR) no último ciclo foram maiores comparado ao do 4º ciclo, esse importante parâmetro pode ser explicado pela fase de maturação que se encontrava a cultura no momento da última colheita, destaca-se que o último ciclo teve sua colheita antecipada para análises tecnológicas, consequentemente valores maiores de AR. Segundo Lavanholi (2010), os teores de AR são gerados pela conversão de açúcares em sacaroses, sendo um dos indicativos da maturação da cana-de-açúcar. Os teores de açúcares redutores para safras 2019/20 e 2020/21 encontra-se dentro do ideal para indústria sucroalcooleira com teores bem abaixo de 0,8% (Figura 6E).

Os valores de Açúcar Total Recuperável (ATR) tiveram variações de 15,29 a 15,86% e 15,32 a 15,94% para as safras 2019/20 e 2020/21, respectivamente. As variações de uma safra para outra foram pequenas e os teores estão dentro dos padrões da indústria sucroalcooleira (LOPES, 2011). Segundo Wiedelfeld (2008), destaca que os baixos teores de ATR está ligado ao conteúdo de água da planta e consumo maior de energia como decorrência de um maior desenvolvimento vegetativo. A falta de chuva enfrentada pelas lavouras de cana-de-açúcar, desde o início da safra até fins de outubro nos principais locais de produção do país, trouxe prejuízos aos níveis de produtividades, mas, em contrapartida, foram registrados aumento nos níveis de ATR (CONAB, 2020).

## 2.4 CONCLUSÃO

As doses de calcário na 4ª e 5ª cana soca influenciaram de forma positiva com o aumento nos teores do pH, Ca, Mg, SB e V%, deixando as concentrações de Al, H+Al e m% a níveis em que não se encontrava disponíveis para cultura.

Doses elevadas de calcário mostram-se prejudiciais a produtividade da cana, por causar desequilíbrios nutricionais no solo, a exemplo do teor de K. A aplicação de calcário não influenciou nas características tecnológicas. O rendimento em açúcar por hectare seguiu a produtividade da cana.

## REFERÊNCIAS

AGUIRRE, A. F. L.; NOGUEIRA, D. A.; BEIJO, L. A. Análise da temperatura máxima de Piracicaba (SP) via distribuição GEV não estacionária: uma abordagem bayesiana. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, 2020.

AZEVEDO, M. C.; SILVA, E. S.; ALMEIDA, L. J. M.; ROSENDO, B. H. B.; RIBEIRO, J. E. S.; SIMÕES NETO, D. E.; MIELEZRSKI, F. Productivity of sugar cane genotypes in response to the limestone application in microclimate of the brazilian semiarid. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. 1-14, 2021.

CHAVES, V. A.; SANTOS, S. G.; SCHULTZ, N.; PEREIRA, W.; SOUSA, J. S.; MONTEIRO, R. C.; REIS, V. M. Desenvolvimento Inicial de Duas Variedades de Cana-de-açúcar Inoculadas com Bactérias Diazotróficas. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v. 39, p. 1595–1602, 2015.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira da cana-de-açúcar, 2020**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 03/08/2021.

CONSECANA. **Manual de instruções CONSECANA-SP**. 6. Ed. Piracicaba: CONSECANA-SP, 2015.

CORDERO, D. A.; BATISTA, L. F.; GURGEL, M. N.; BITTENCOURT, V. C. Study by means of labeling techniques on the K-liming relation in soils cultivated with sugarcane. **Proceedings of the International Society of Sugarcane Technology**, v. 16, p. 1011-1025, 1977.

CRUSCIOL, C. A. C.; ROSSATO, O. B.; FOLTRAN, R.; MARTELLO, J. M.; NASCIMENTO, C. A. C. D. Soil fertility, sugarcane yield affected by limestone, silicate, and gypsum application. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 48, n. 19, p. 2314-2323, 2017.

DUTRA FILHO, J. A.; JUNIOR, T. C.; SIMÕES NETO, D. E. Phenotype adaptability and stability of sugarcane genotypes in the sugarcane belt of the State of Pernambuco, Brazil. **Genetics and Molecular Research**, v. 13, n. 3, p. 6865-6877, 2014.

DUTRA FILHO, J. A.; SIMÕES NETO, D. E.; CALSA JÚNIOR, T. Determination of the number of harvests to select elite sugarcane genotypes in NE Brazil. **Genetics and Molecular Research**, v. 17, n. 1, p. 1-16, 2018.

FERRAZ, R. L. S.; SOUZA FERRAZ, R. L.; ANDRADE BARBOSA, M.; LIMABATISTA, J.; DOURADO MAGALHÃES, I.; FIGUEIREDO DANTAS, G.; OLIVEIRA FRANCO, F. Calagem em cana-de-açúcar: efeitos no solo, planta e reflexos na produção. **InterfaceHS**, 10:166-177, 2015.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBO, M.; BOTA, J.; GALMES, J.; HENKLE, M.; MARTINEZ-CANELLAS, S.; MEDRANO, H. Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO<sub>2</sub> concentration. **New Phytologist**, v.172, p.73-82, 2006.

GOMES, C. **IAC expõe 11 variedades de cana-de-açúcar na Agrishow**. Ribeirão Preto, dez. 2007. IAC notícias. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/noticiasdetalhes.php?>. Acesso em: 03/08/2021.

GOMES, C.; CARVALHO, I. **Programa Cana IAC lança quatro variedades de cana-de-açúcar.** Ribeirão Preto, dez. 2007. IAC notícias. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/noticiasdetalhes.php?pag=1&ano=2007&id=502>>. Acesso em: 03/08/2021.

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

INMAN-BAMBER, N. G.; BONNETT, G. D.; SPILLMAN, M. F.; HEWITT, M. L.; JACKSON J. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. **Australian Journal of Agricultural Research** v. 59, p. 13-26, 2008.

KIRUBAKARAN, R.; VENKATARAMANA, S.; JAABIR, M. S. M. Effect of ethrel and glyphosate on the ripening of sugar cane. **International Journal of Chemical Technology Research**, v. 5, p. 1927-1938, 2013.

LAVANHOLI, M. G. D. P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de açúcar e álcool. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. S. M.; LANDELL, M. G. A. (ed.). **Cana-de-açúcar. Campinas: IAC**, 2010. p. 882.

LIMA, C. G. R.; DE PASSOS, M.; SOUZA, A.; COSTA, N. R.; MONTANARI, R. Correlação entre componentes da produtividade da cana-de-açúcar com pH de um Argissolo vermelho distrófico do noroeste paulista. **Revista Engenharia Na Agricultura-REVENG**, v. 24, n. 2, p. 120-130, 2016.

LOPES, C. H., 2011. **Tecnologia de produção de açúcar**. 1. ed. São Carlos: EdUFSCar, 183 p.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1980. 254 p.

MEURER, E. J.; TIECHER, T.; MATTIELLO. Potássio. FERNADES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. **Nutrição Mineral de plantas**. 2 Ed. Viçosa, 2018. p 429-464.

NOGUEIRA, H. M. C. M.; NOGUEIRA, C. U.; FANTINEL, A. L.; MÜLLER, I.; HOFFMANN, R.; PADRÓN, R. A. R. Avaliação da produção e resistência à geada de cultivares de cana-de-açúcar. **Revista Espacios**, v. 36, n. 24, p. 15, 2015.

NOLLA, A.; DA SILVA ALVES, E. O.; DA SILVA, T. G.; BORDIN, A. V. Correção da acidez e disponibilização de fósforo e potássio em latossolo vermelho distrófico típico

submetido à calagem incorporada e superficial. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 3, p. 2478-2487, 2021.

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

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

RAIJ, B.; VAN CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1996. 285p.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C., 2009. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. 2. ed. Piracicaba. 333 p.

ROSSETO, R. SPIRONELLO, A.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Calagem para a cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, 63:105-119, 2004

SILVA, S. V.; SANTOS, J. Z. L.; TUCCI, C. A. F.; DE SOUZA, C. A. A. Efeito de doses de calcário e cultivares na produtividade e qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar em solo da Amazônia. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 8, n. 3, p. 298-305, 2014.

STUPIELLO, J. P. **Pureza da cana e seu impacto no processamento. STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.18, n.3, 12 p, 2000.

VASANTHA, S.; KUMAR, R. A.; TAYADE, A. S.; KRISHNAPRIYA, V.; RAM, B.; SOLOMON, S. Physiology of Sucrose Productivity and Implications of Ripeners in Sugarcane. **Sugar Tech**, p. 1-17, 2021.

VIANNA, M. S.; SENTELHAS, P. C. Simulação do risco de deficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 237-246, 2014.

WIEDENFELD, B.; ENCISO, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid south Texas. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 3, p. 665-671, 2008.

### 3. DETECÇÃO DE ESTRESSE NUTRICIONAL EM CANA-DE-AÇÚCAR POR ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA Vis-NIR

#### RESUMO

Técnicas mais modernas e precisas são necessárias para o monitoramento de estresses nutricionais da cana-de-açúcar. O objetivo deste estudo foi analisar a partir de dados hiperespectrais, as relações da reflectância foliar da cana-de-açúcar com os teores de nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, cálcio e magnésio. Durante duas safras consecutivas (2019/20 e 2020/21), foi induzido o estresse nutricional a partir da aplicação de doses de calcário em diferentes épocas. A primeira análise ocorreu três ciclos produtivos após a implantação do experimento. A calagem foi aplicada de forma fracionada, de acordo com doses pré-estabelecidas, sendo que ao final dos 5 anos do experimento as quantidades corresponderam à 0, 9, 15 e 21 t ha<sup>-1</sup> de calcário do tipo dolomítico. Foram registrados os dados de reflectância hiperespectral da folha e o estado de nutrientes na fase de exponencial crescimento da cultura da cana-de-açúcar. Os comprimentos de onda correlacionados ao N, P, K, S, Ca e Mg foram identificados usando análise de correlação de Spearman. Além disso, aplicou-se o teste ANOSIM e à análise de componentes principais para avaliar a variabilidade dos dados. A ordem do grau de correlação na região do visível foi: P > K > N > Ca > S > Mg e para região do infravermelho próximo a correlação passou a ser P > K > Ca > N > S > Mg. O P teve picos agudos negativos e com alta correlação nos comprimentos de onda 706-717 nm, com correlação de -0,78. Na faixa do 522-543 nm (verde), observou-se correlação de -0,76, principalmente quando a cultura estava sob estresse nutricional. Houve agrupamento entre as doses, porém os grupos não diferiram entre si. Os valores do PLRS registraram respostas espectrais na região do Vis e red-edge registraram sofrer influência mais significativa do enxofre, potássio e fósforo. Palavras-chave: Calagem; Reflectância foliar; Espectrometria.

#### ABSTRACT

More modern and accurate techniques are necessary for monitoring nutritional stress of sugarcane. The aim of this study was to analyze from hyperspectral data the relationships of leaf reflectance of sugarcane with the contents of nitrogen, phosphorus, potassium, sulfur, calcium and magnesium. During two consecutive harvests (2019/20 and 2020/21), nutritional stress was induced from the application of limestone doses at different times. The first analysis occurred three productive cycles after the implementation of the experiment. The lime was applied in a fractional way, according to pre-established doses, and at the end of the 5 years of the experiment the amounts corresponded to 0, 9, 15 and 21 t ha<sup>-1</sup> of dolomitic limestone. Data on hyperspectral reflectance of the leaf and the state of nutrients in the exponential growth phase of sugarcane crop were recorded. Wavelengths correlated with N, P, K, S, Ca and Mg were identified using Spearman correlation analysis. In addition, the ANOSIM test and principal component analysis were applied to evaluate the variability of the data. The order of the degree of correlation in the visible region was: P > K > N > Ca > S > Mg and for near infrared region the correlation became P > K > Ca > N > S > Mg. P had negative acute peaks and with high correlation in wavelengths 706-717 nm, with a correlation of -0.78. In the 522-543 nm (green) range, a correlation of -0.76 was observed, especially when the crop was under nutritional stress. There was grouping between doses, but the groups did not differ from each other. Pls values recorded spectral responses in the Vis region and red-edge reported suffering a more significant influence of sulfur, potassium and phosphorus. Keywords: Calage; Leaf reflectance; Spectrometry.

### 3.1 INTRODUÇÃO

Há poucos estudos relacionados à aplicação de calcário para correção da acidez do solo, considerando sistemas de colheita sem queima e com resíduo da cana no solo (Crusciol et al., 2017). As recomendações de aplicação de calcário em cana-de-açúcar foram desenvolvidas para o sistema de colheita de cana queimada. Podendo influenciar nas aplicações de nutrientes minerais em lavouras de cana-de-açúcar.

Visto isto, é sabido que a disponibilidade de nutrientes é um importante fator para o crescimento e produtividade da cana-de-açúcar. Em áreas com cultivo de cana, a aplicação de calcário melhora a disponibilidade de nutrientes no solo, a quantidade e a diversidade microbiana, bem como os parâmetros fisiológicos da planta e a produtividade (PANG et al. 2019). Além disso, uso de fertilizantes químicos é a principal fonte de nutrientes para as culturas de produção agrícola. Apesar dos benefícios, as aplicações excessivas de adubos químicos (nitrogênio por exemplo) em um sistema agrícola prejudicam a saúde e o bem-estar humano, tanto diretamente como indiretamente, além de afetar negativamente as águas superficiais e subterrâneas (GALLOWAY, et al. 2008; HAMMAD, et al. 2020).

Neste contexto, é fundamental desenvolver novas técnicas capazes de monitorar de forma rápida e precisa o estado nutricional das plantas, maximizando o retorno econômico e reduzindo o impacto adverso ao ambiente. Técnicas de detecção via espectroscopia de reflectância, desempenham um papel fundamental na identificação de ligações funcionais entre os processos fisiológicos, químicos e as feições espectrais, principalmente as informações relacionadas ao conteúdo de clorofila na folha (HOUBORG et al., 2015).

Neste caso, sabe-se que os pigmentos das folhas como a clorofila e carotenoides estão diretamente ligados aos nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S), além de desempenharem papéis importantes no estado nutricional das plantas, também contribui para uma boa realização da fotossíntese (HOU et al., 2019; CROFT; CHEN, 2018; CROFT et al., 2017).

As mudanças causadas na atividades fotossintética, estrutura celular e estiramento alteram a reflectância espectral das plantas na região do espectro visível (Vis), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR). Logo, o sensoriamento remoto hiperespectral torna-se uma ferramenta potencial na predição da concentração bioquímica foliar de nutrientes. Além destas técnicas serem promissoras, oferecem estimativas mais rápidas e não destrutivas em comparação com análises laboratoriais (MAHAJAN et al. 2014).

Alguns estudos relatam que o sensoriamento remoto hiperespectral possui potencial em prever a concentração de nutrientes essenciais, como: N, P, K, Ca e Mg. Dentre as culturas mais estudadas, estão: alface (PACUMBABA et al., 2011); trigo (MAHAJAN et al., 2014; ANSARI et al., 2016); milho (OSBORNE et al., 2002); beterraba e morango (SIEDLISKA et al., 2021); arroz (MAHAJAN et al., 2017); citros (LIU et al., 2015) e plantas lenhosas: salgueiro, mopane e oliveira (FERWERDA; SKIDMORE, 2007). Foram encontrados poucos estudos para cana-de-açúcar, além disso, os trabalhos se limitaram na previsão do nitrogênio e biomassa (BARROS et al., 2021; ROSA et al., 2015; MOKHELE; AHMED, 2010).

É evidente a partir dos estudos citados que é possível o monitoramento do estresse nutricional em diferentes culturas usando sensoriamento remoto hiperespectral. No entanto, até onde sabemos, ainda são poucos os trabalhos dedicados à identificação do estresse nutricional em cana-de-açúcar a partir do espectro na região do Vis-NIR-SWIR, principalmente para os nutrientes fósforo, potássio e enxofre. Neste caso, acreditamos que seja possível identificar a deficiência dos nutrientes N, P, K, S, Mg e Ca a partir de dados hiperespectrais obtidos por meio da reflectância das folhas da cana-de-açúcar.

Portanto, o objetivo deste estudo foi analisar em duas safras consecutivas (2019/20 e 2020/21), a partir de dados espectrais obtidos em laboratório, as relações da refletância foliar da cana-de-açúcar com os teores de nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, cálcio e magnésio em condições de estresse nutricional ocasionado por aplicações de doses de calcário em diferentes épocas.

## **3.2 MATERIAL E MÉTODOS**

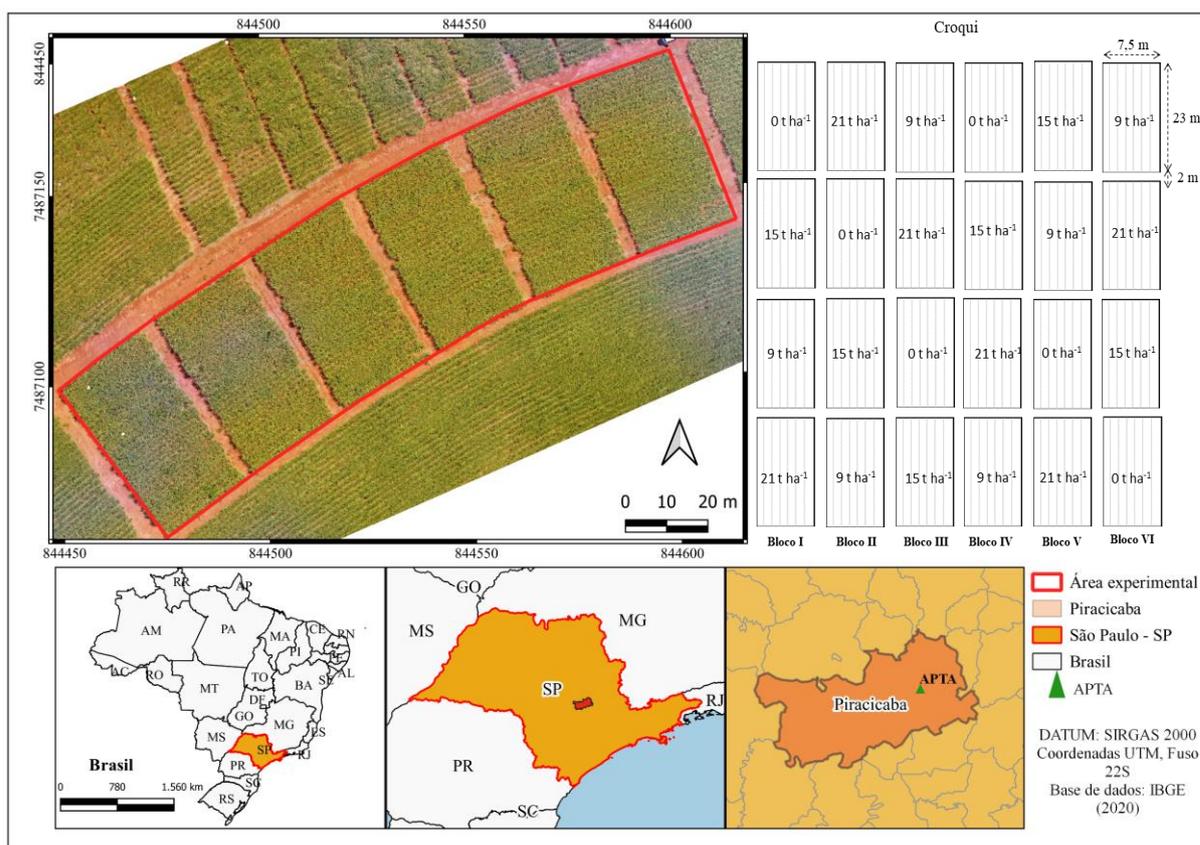
O experimento foi instalado em área experimental da Agência Paulista de Tecnologia do Agronegócio – APTA, localizada no município de Piracicaba, São Paulo, Brasil (Figura 1). O clima da região segundo a classificação de Koppen é denominado subtropical úmido (Cwa), com pluviosidade média anual inferior a 1400 mm, com duas estações bem definidas, sendo o inverno seco e o verão chuvoso.

### **3.2.1 Descrição do experimento**

A área experimental havia sido cultivada anteriormente com cana por três ciclos-safra, ocorrendo as análises no 4º e 5º ciclo produtivo da cultura. A área é caracterizada de relevo plano, Latossolo Vermelho com textura argilosa. A correção do solo foi feita de forma manual com aplicação de doses de calcário do tipo dolomítico, indicado para a correção de solo com

baixo teor de Ca e Mg. A aplicação aconteceu na palhada após o corte da cana de acordo com as doses pré-determinadas para cada tratamento.

O experimento foi instalado em 06 de outubro de 2016 e as aplicações das doses de calcário foram distribuídas entre os anos 2016 (implantação), 2017, 2018, 2019 e 2020. O delineamento adotado foi em blocos casualizados com 4 doses e 6 repetições, totalizando 24 parcelas. Sendo que, no quarto ciclo ou terceira cana soca a somatória das doses, foram 0, 6, 12 e 18 t ha<sup>-1</sup>, acrescido mais 3 toneladas no último ciclo (safra 2020/21) para todas as doses, com exceção da testemunha (Figura 1).



**Figura 1.** Mapa de localização da área experimental e o croqui com as doses da safra 2020/21.

A variedade utilizada no estudo foi a IACSP95-5000, conhecida pela alta produtividade, bom porte ereto, ótima brotação de soqueira, bom perfilamento e fechamento entre linhas, baixa concentração de plantas tombadas e com pouco florescimento, resistente a doenças e apresenta ótimos resultados em situações de déficit hídrico (CHAVES et al, 2015).

### 3.2.2 Análises espectrais e macronutrientes foliar

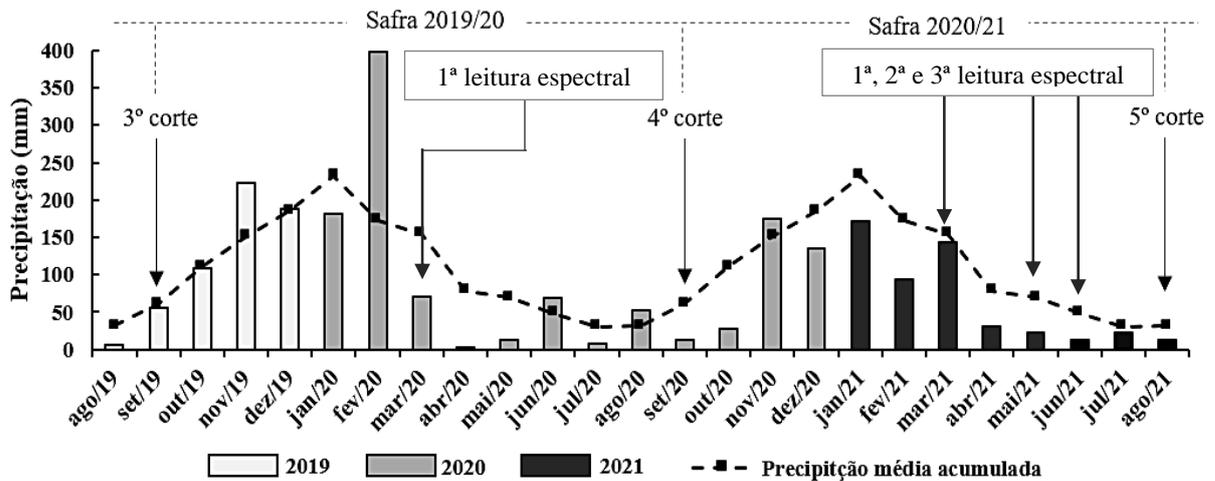
Em todas as parcelas nas duas safras (2019/20 e 2020/21) foram coletadas 10 folhas de cana-de-açúcar quando a cultura se encontrava no exponencial crescimento vegetativo, a folha coletada é caracteriza como a primeira totalmente expandida do ápice da planta, denominada

como “folha +1”. Após a coleta em campo, as folhas foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados e transportadas em caixas térmicas com gelo, com a finalidade de manter a turgescência das folhas, e enviadas ao laboratório de geoprocessamento.

Na safra 2019/20, ocorreu somente uma leitura da espectroscopia das folhas, sendo realizada em março de 2020, período em que a cultura se encontrava no exponencial crescimento vegetativo. Na safra seguinte (2020/21), foram feitas três leituras espectrais, ocorrendo nos meses de março, maio e final de junho de 2021 (Figura 2).

Devido o déficit hídrico ocorrido na região na última safra (2020/21), as plantas retardaram o crescimento e passaram para o estágio de maturação mais cedo, ou seja, o exponencial crescimento da cultura somente ocorreu em maio, dois meses após o esperado. Como meio de avaliar a influência do conteúdo de água na leitura espectral, foi observado a distribuição mensal da precipitação pluviométrica na área do experimento.

Na Figura 2, encontra-se os meses das leituras espectrais e a distribuição mensal da precipitação pluviométrica (mm) no período de agosto de 2019 a agosto de 2021. A estação usada na obtenção dos dados fica a menos de 500 m de distância da área experimental.



**Figura 2.** Gráfico de precipitações pluviométricas mensal no período de agosto de 2019 a setembro de 2021 e precipitação média acumulada do período de 1980 a 2021.

As leituras espectrais foram referentes a reflectância de todas as 240 folhas de cada safra, sendo obtidas por meio do espectrorradiômetro ASD FieldSpec FR Spectroradiometer® (ASD – Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, EUA) com o uso de um computador com o *software* RS<sup>3</sup> da mesma empresa. O espectrorradiômetro coleta dados no espectro compreendido entre os comprimentos de onda de 350 a 2500 nm, abrangendo assim as regiões do Visível/VIS, Borda vermelha, Infravermelho Próximo/NIR e Infravermelho Médio/SWIR,

com resolução espectral de 3 nm na faixa de 350-1000 nm e de 10 nm entre 1000 e 2500 nm (ASD, 2010).

As curvas espectrais foram adquiridas em termos de reflectância utilizando o *software* ViewSpec Pro (ASD – Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, USA) e exportadas para o *software* Microsoft Excel. Após, realizou-se um pré-tratamento dos dados com a exclusão das respostas provocadas por ruídos na extremidade de 350-400 nm, resultando assim, uma curva espectral de 400 a 2500 nm.

Para avaliar o estado nutricional das plantas, foram realizadas análises dos nutrientes Nitrogênio (N), Calcio (Ca), Magnésio (Mg), Potássio (K), Fósforo (P) e Enxofre (S) dos tecidos vegetais foliar nas duas safras estudadas (2019/20 e 2020/21), quando a cultura se encontrava no exponencial crescimento vegetativo, o critério adotado foi por meio da leitura espectral das 10 folhas de cada parcela. As folhas que apresentavam valores de reflectância muito distante da mediana da parcela foram excluídas e as demais enviadas ao laboratório de tecidos vegetais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/ESALQ.

### 3.2.3 Análises estatística

As análises químicas dos tecidos vegetais para ambos os ciclos produtivos foram avaliadas de acordo com a análise de variância por meio do teste F. E para a fonte de variação das doses aplicou-se o teste de regressão e a seleção dos modelos foram baseadas na significância dos betas e o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ), utilizando-se o programa computacional SISVAR.

Para fins estatísticos, os dados passaram pelo teste de normalidade pelo método de Shapiro e Wilk, a  $p < 95\%$ . Os dados referentes a reflectância não se ajustaram à distribuição normal, então a análise de correlação de Spearman foi empregada para avaliar a correlação da reflectância entre todos os comprimentos de onda e os nutrientes foliares. A correlação de Spearman avalia as relações de correlação monotônicas se os dados são lineares ou não lineares; possuindo intervalos de correlação de +1 a -1 (KHOKHAR et al., 2019).

Técnicas multivariadas foram utilizadas para comparar a variabilidade entre as doses, bem como sua similaridade espectral. Para avaliar se os grupos de reflectância para as doses se diferenciavam foi realizado uma análise de similaridade entre os grupos. Uma matriz de associação foi gerada para a reflectância foliar usando a distância euclidiana, através do teste de análise de similaridade (ANOSIM).

O ANOSIM de 9999 permutações foi usado para comparar classificações de semelhanças entre as doses de calcário, podendo ser interpretada através do valor R, onde um valor próximo

a zero indica pouca ou nenhuma separação, enquanto o valor 1 indica separação completa entre os grupos (CASAL et al., 2013).

Para investigar a possibilidade de agrupamento, os dados do espectro foram submetidos à análise de componentes principais (ACP). A ACP é um método exploratório de análise estatística multivariada que foi utilizado para analisar a possibilidade de separação espectral por meio da reflectância das folhas da cana-de-açúcar submetida a doses de calcário. O gráfico de *scores* da ACP auxilia na identificação da tendência de agrupamento, enquanto os *loadings* mostram os principais comprimentos de onda associados à uma determinada componente (JUNGES et al. 2020).

Empregou-se a técnica de regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR) para a predição dos teores nutricionais, a partir do comportamento espectral das folhas. A PLSR é uma técnica de análise multivariada, muito utilizada em análises de predição por meio dos dados espectrais (BELMONTE, 2006). Durante a etapa de calibração, a PLSR utiliza as informações das variáveis independentes (espectros) e variáveis dependentes (teores), para gerar novas variáveis denominadas de variáveis latentes (ou fatores). Ao ajustar um modelo por PLSR, busca-se encontrar o menor número possível de fatores PLS necessários para explicar as variáveis dependentes.

Durante a validação cruzada (leave-one-out), definiu-se tanto o modelo com número ótimo de fatores, quanto o seu respectivo desempenho. O melhor modelo apresentou maior  $R^2$  e menor RMSE (raiz do erro quadrático médio). Para definir quais bandas espectrais são de fato relevantes na predição, calculou-se a Importância da Variável na Projeção (VIP). Os índices VIP são calculados para cada banda espectral, e são considerados relevantes somente valores acima de 0,8. Todo o processamento descrito foi realizado no programa ParLeS 3.1 (VISCARRA ROSSEL, 2008).

### **3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.3.1 Doses de calcário e os teores de macronutrientes foliares**

Constatou-se que para a safra 2019/20 não houve efeito significativo na interação entre quase todos os nutrientes e as doses de calcário, exceto para o Mg e K a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. Na safra 2020/21, somente o Ca e Mg tiveram efeito significativo a 1%, e o P significativo a 5%.

Na safra 2019/20, a dose 6 t ha<sup>-1</sup> concentrou os maiores teores de N (12,1 g.kg<sup>-1</sup>) e K (4,06 g.kg<sup>-1</sup>) nas folhas, enquanto que nas doses 0 e 18 t ha<sup>-1</sup>, tiveram as menores concentrações, tanto de N como K. Similar a safra anterior, em 2020/21 a menor dose de calcário (9 t ha<sup>-1</sup>) foi

a que gerou as melhores concentrações de nitrogênio e potássio, com teores de 11,2 g.kg<sup>-1</sup> e 8,98 g.kg<sup>-1</sup>, respectivamente, ocorrendo uma redução mais acentuada na testemunha e na dose 21 t ha<sup>-1</sup>. Os teores de Ca, Mg e S tiveram efeitos contrário ao N e K, pois seus teores aumentaram de forma linear em função das doses de calcário (Tabela 1).

**Tabela 1.** Teores foliares médios de macronutrientes em função de doses de calcário na cultura da cana-de-açúcar, safra 2019/20 e 2020/21.

Safra 2019/20								
Nutr. (g.kg <sup>-1</sup> )	Doses				C.V. (%)	Função de regressão		
	0	6	12	18		F	Modelo	R <sup>2</sup>
N	10,8	12,1	11,6	11,3	8,8	0,08ns	-	-
Ca	3,26	3,36	3,39	3,82	19,6	0,19ns	-	-
Mg	2,23	2,30	2,51	2,69	10,5	0,004*	y = 0,0266x + 2,1944	0,96
K	3,14	4,06	3,89	3,75	17,8	0,04**	y = -0,0074x <sup>2</sup> + 0,160x + 3,19	0,87
P	1,28	1,32	1,37	1,36	6,92	0,09ns	-	-
S	0,87	0,90	0,91	0,93	9,77	0,24ns	-	-
Safra 2020/21								
g.kg <sup>-1</sup>	0	9	15	21	C.V.	F	Modelo	R <sup>2</sup>
N	10,7	11,2	11,2	11,1	6,04	0,38ns	-	-
Ca	3,60	3,84	4,08	4,28	7,91	0,001*	y = 0,0327x + 3,5808	0,99
Mg	2,18	2,42	2,66	2,58	12,4	0,007*	y = 0,0255x + 2,1957	0,94
K	7,81	8,98	8,89	8,18	30,9	0,40ns	-	-
P	1,30	1,34	1,33	1,40	4,55	0,13**	y = 0,0045x + 1,2907	0,84
S	1,84	2,08	2,10	2,03	9,70	0,07ns	-	-

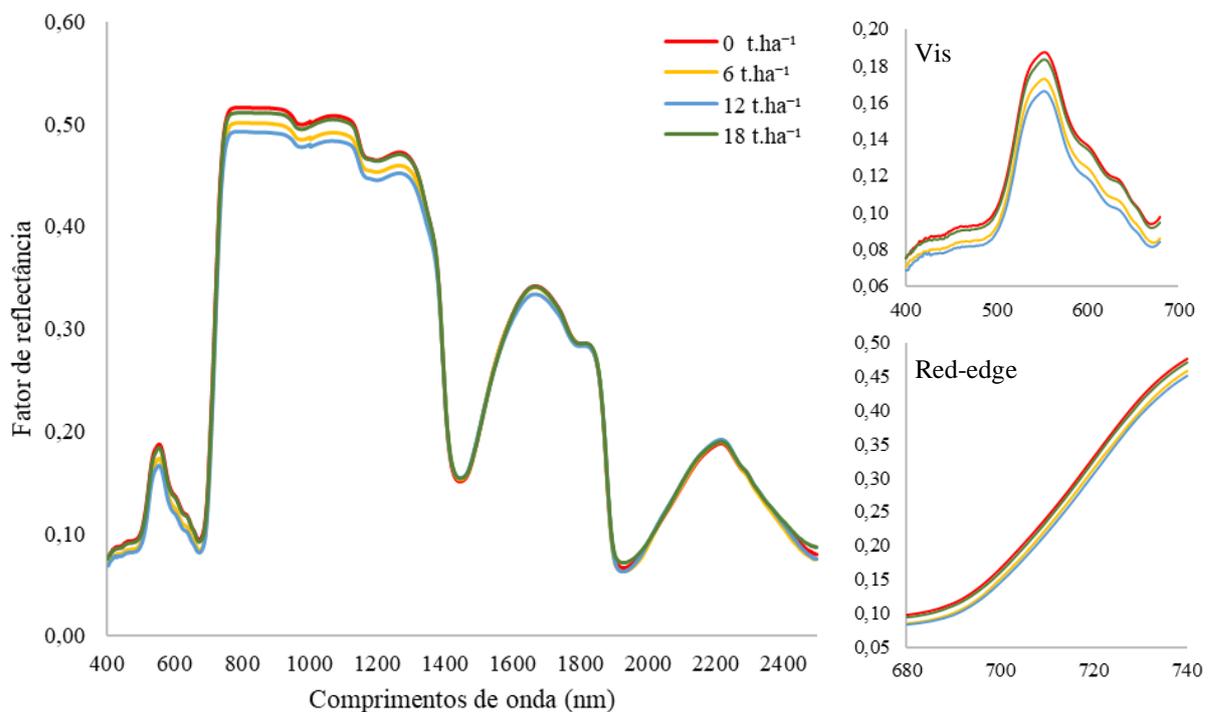
Nutr. = Nutrientes foliar; CV = Coeficiente de Variação (%); ns = não significativo; \*\* = significativo a 5% de probabilidade e \* = significativo a 1% de probabilidade.

Independente das doses de calcário e do ciclo produtivo os nutrientes foliares não apresentaram grandes oscilações, principalmente entre as doses 6 e 12 t ha<sup>-1</sup> (safra 2019/20) e 9 e 15 t ha<sup>-1</sup> (safra 2020/21). No entanto, no 4º ciclo produtivo os teores de N, P, K e S foram abaixo da faixa ideal para cana-de-açúcar (MALAVOLTA et al. 1997; RAIJ et al. 1996); o Ca e Mg mantiveram as concentrações dentro do recomendado com valores entre 3,26 e 3,82 g kg<sup>-1</sup> e 2,23 e 2,69 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Já na última safra (2020/21), quase todos macronutrientes estiveram dentro da faixa ideal, com exceção do nitrogênio (RAIJ et al. 1996).

### 3.3.2 Análise descritiva das curvas espectrais

Conforme a Figura 3, as doses 0 e 18 t ha<sup>-1</sup> de calcário foram as que registraram as maiores taxas de reflectância, principalmente na região do infravermelho próximo (720-1100 nm) e visível (400-680 nm). A faixa do espectro NIR foi a que melhor respondeu ao estresse

nutricional das plantas. Neste caso, as curvas referentes as doses 6 e 12 t ha<sup>-1</sup> indicaram folhas mais saudáveis, registrando fator de reflectância menor nos comprimentos de onda do visível, especialmente em 550 nm; isto mostra uma maior absorção de energia incidente na folha para realização dos processos fisiológicos na planta, como a fotossíntese (AYALA-SILVA; BEYL, 2005).



**Figura 3.** Assinaturas espectrais foliar da cana-de-açúcar sob o efeito de diferentes doses de calcário, safra 2019/20.

Segundo Hou et al., (2019), a taxa fotossintética, as características morfológicas e fisiológicas das folhas, incluindo massa, área seca foliar e teor de clorofila são significativamente influenciadas pelo N, K e suas interações na folha. As moléculas de clorofila desempenham um papel importante na fotossíntese das plantas, realizando a absorção da radiação solar para a conversão em energia química (CROFT; CHEN, 2018). Logo o comportamento espectral da folha é um ótimo indicador da capacidade fotossintética (CROFT et al., 2017), além de possuir alta correlação com o conteúdo de nitrogênio (SCHLEMMER et al., 2013; CHENG et al., 2018). Ayala-Silva e Beyl (2005), mencionam que a deficiência de macronutrientes no trigo reduziu o teor de clorofila nas folhas e aumentou a refletância nas faixas de 400–700 nm (VIS) e 700–1100 nm, faixas do NIR.

Os resultados corroboram com os encontrados neste estudo, pois os teores de N e K ficaram muito abaixo do ideal para cultura, principalmente o nitrogênio (Tabela 1). Segundo RAIJ et al. (1996), a faixa de teores adequados de N na folha de cana-de-açúcar é de 18 a 25 g

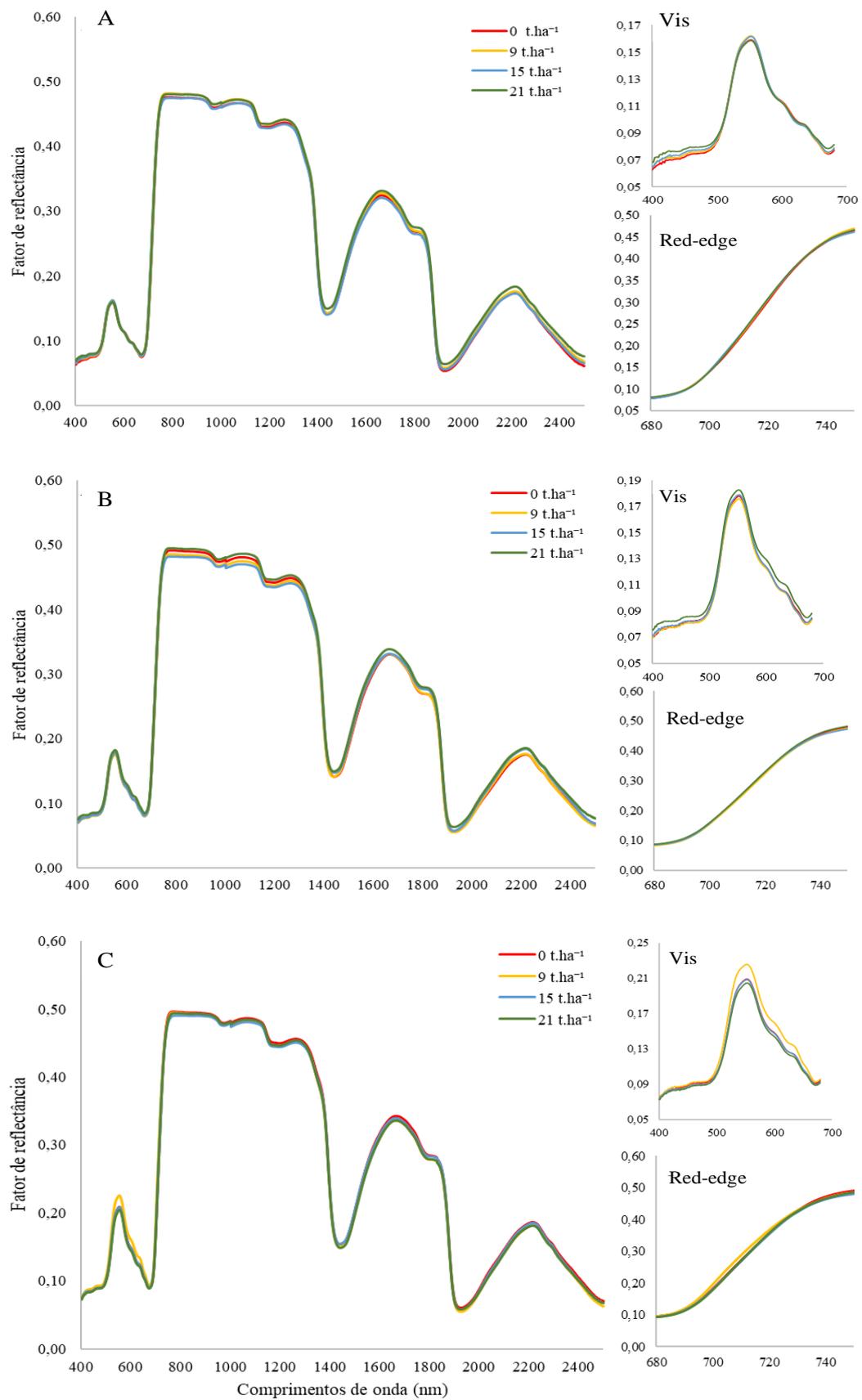
$\text{kg}^{-1}$ , enquanto os teores encontrados neste estudo ficaram abaixo de  $12 \text{ g kg}^{-1}$ . Este estresse causado na planta pode ser observado através da reflectância foliar, principalmente, nas faixas do visível (400-680 nm), red-edge (680-740 nm) e infravermelho próximo (740-1300 nm) (Figura 3).

Outra importante característica observada em relação ao efeito negativo das doses 0 e  $18 \text{ t ha}^{-1}$  para a cultura foi através da faixa do red-edge. Em vegetação severamente degradada, ocorre diminuição da capacidade de absorção nas regiões visível e red-edge do espectro, juntamente com a diminuição no estado de nutrição foliar, o que desloca a reflectância para a extremidade azul do espectro e para longe do vermelho em vegetação levemente degradada (PENG et al. 2014; PENG et al., 2020).

A reflectância da folha na safra seguinte (2020/21), foi medida no mês de março, mesma data do ciclo anterior (safra 2019/20). No entanto, a cultura ainda não havia alcançado o crescimento exponencial vegetativo. Este retardo no crescimento da cultura foi devido às baixas concentrações de precipitação ocorridas na região na última safra (2020/21). Neste caso, a reflectância foliar para esta data registrou as maiores variações entre a faixa que é sensível ao conteúdo de água na folha, especificamente nos comprimentos de onda 1450 e 1950 nm (Figura 4A).

Como a água absorve a radiação eletromagnética, as plantas que possuem maior conteúdo de água na folha registraram menor fator de reflectância nos comprimentos de ondas 1450 e 1950 nm (PONZONI et al., 2012). Assim, as curvas que mostraram maior conteúdo de água intracelular na folha foram as que receberam as doses 0, 9 e  $15 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente (Figura 4A). Segundo Auler et al., (2017), a calagem superficial é a melhor forma de aplicação de calcário para aumentar a disponibilidade hídrica do solo, principalmente o teor de água na capacidade de campo, sendo essas mudanças mais significativas na camada de solo de 0 – 0,10 m.

Outro ponto de maior diferença em reflectância entre as doses foram na faixa de 400 a 500 nm, região do visível (Vis). Segundo Peng et al. (2020), as bandas sensíveis aos teores de K nas folhas, em seus estudos, foram localizadas principalmente nas bandas que variam entre 360 nm e 450 nm. O potássio, neste estudo, ficou abaixo do recomendado e teve muitas variações em teores foliares nas doses de calcário, podendo ser um indicativo a sensibilidade nesta região do espectro (400-470 nm) ao potássio.



**Figura 4.** Assinaturas espectrais foliar da cana-de-açúcar sob o efeito de diferentes doses de calcário quando a cultura estava na fase inicial de crescimento (A), exponencial crescimento vegetativo (B) e início da maturação (C), safra 2020/21.

No estágio de exponencial crescimento vegetativo da safra 2020/21 (Figura 4B), a curva espectral apresentou características semelhantes a leitura da safra anterior (2019/20), pois as plantas submetidas a dose mais elevadas ( $21 \text{ t ha}^{-1}$ ) de calcário, seguida da dose  $0 \text{ t ha}^{-1}$  apresentaram maior reflectância nas folhas. Novamente, as faixas do espectro que diferiram entre as doses, sendo mais característico na região do verde (553 nm) e NIR (720 a 1100 nm).

Quando a cultura estava no início da fase de maturação (Figura 4C), a reflectância das folhas se assemelhou em quase todos os comprimentos de onda, porém, ocorreu um pico de reflectância na faixa do visível das folhas submetidas a dose  $9 \text{ t ha}^{-1}$ , especificamente entre os comprimentos de onda do verde, amarelo e vermelho (550 a 680 nm).

Na data da leitura espectral, a cultura apresentava coloração mais amarelada das folhas, sendo ainda mais evidente em algumas parcelas do experimento. Segundo Aude (1993), a cana-de-açúcar ao completar o ciclo diminui a assimilação, paralisa o crescimento e inicia a concentração de açúcar, as folhas tornam-se amareladas e as inferiores secam.

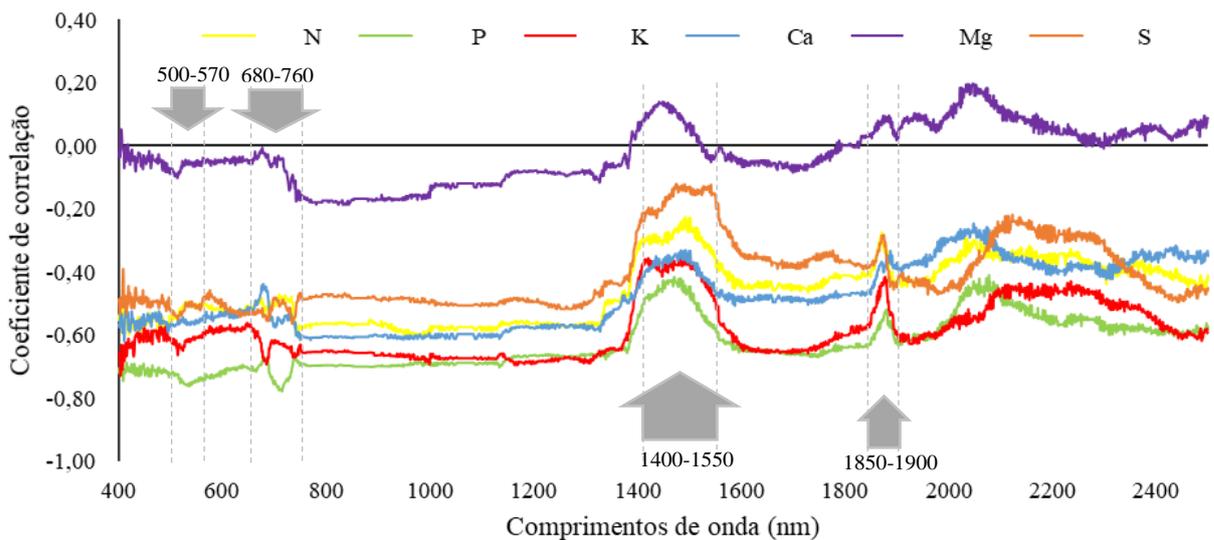
Para que ocorra a maturação, é necessária a translocação dos nutrientes N, P, K e Mg presentes na parte aérea para os colmos e sistema radicular da cultura, sendo um reflexo fisiológico deste estágio fenológico (FRANCO et al. 2007). Neste caso, acredita-se que as plantas submetidas a  $9 \text{ t ha}^{-1}$  de calcário entraram primeiro no estágio de maturação. Sendo o clima um dos principais fatores para a mudança do estágio de crescimento para maturação da cana-de-açúcar (AUDE, 1993). Neste estudo, o mês de junho teve a maior estiagem hídrica de todo 5º ciclo produtivo (Figura 2), sendo a época ideal para o acúmulo de açúcar no colmo (FRANCO et al. 2007).

### **3.3.3 Correlação de Spearman**

#### **3.3.3.1 Safra 2019/20**

A Figura 5, refere-se aos resultados do coeficiente de correlação Spearman entre os nutrientes e as reflectâncias. As análises ocorreram quando a cultura se encontrava no seu exponencial crescimento vegetativo da safra 2019/20.

Neste caso, a ordem do grau de correlação na região do visível foi:  $P > K > N > Ca > S > Mg$ . Em quase toda faixa do infravermelho próximo a correlação passou a ter a seguinte ordem  $P > K > Ca > N > S > Mg$ , passando o nitrogênio a ter uma menor correlação em comparação ao cálcio. Mahajan et al. (2014), relatam que para a cultura do trigo a ordem do grau de correlação dos diferentes nutrientes na região do VIS foi  $N > P > K$ .



**Figura 5.** Coeficiente de correlação de Spearman entre os nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) foliar e a reflectância dos comprimentos de onda entre 400 a 2500 nm.

O P, nutriente de maior grau de correlação, teve picos agudos negativos e com alta correlação nos comprimentos de onda 706-717 nm (borda vermelha), com correlação de -0,78; outro pico ocorreu na faixa do 522-543 nm (verde), com -0,76. Outro importante nutriente foi o K, pois teve alta correlação (-0,73) nos comprimentos 404-407 nm, tendo um segundo pico entre os comprimentos de onda 678-689 nm (borda vermelha), com -0,68. Os resultados corroboram com os encontrados por Peng et al., (2020), pois destacam que as bandas sensíveis para o conteúdo de N e P nas regiões verde, verde-amarelo, vermelho e NIR; para o K, os comprimentos de ondas curtos, variando de 360 nm a 450 nm e cobrindo as regiões violeta, azul, ciano, verde e amarelo do espectro foram os mais sensíveis.

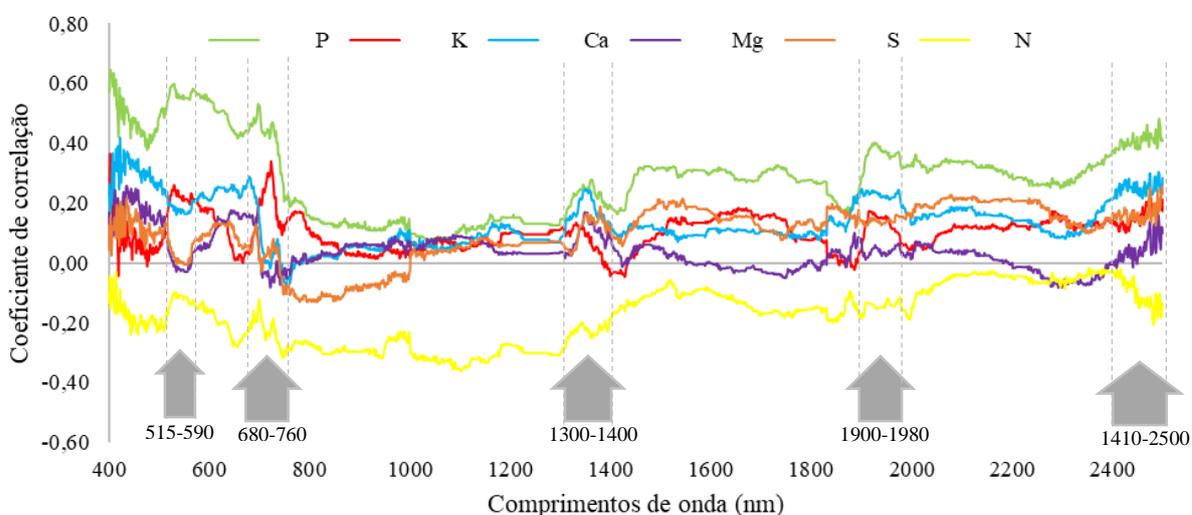
Essa alta correlação na faixa do visível é atribuído à característica de absorção dos pigmentos clorofila e carotenoides, pois a deficiência de P e K reduziu a concentração de clorofila nas plantas (MAHAJAN et al., 2014). A deficiência ou aplicação excessiva de P em vasos causou quedas muito elevadas nas concentrações de clorofila e carotenóide em folhas de morangueiro (SIEDLISKA, et al. 2021). Ayala-Silva e Beyl (2005), também relataram que a deficiência de nutrientes minerais como P e K reduziu significativamente o teor de clorofila em plantas de trigo em condições de casa de vegetação. Se assemelhando com os resultados de teores foliar deste estudo, pois os níveis de P, K e N ficaram muito abaixo do ideal para cultura da cana-de-açúcar.

Quando se observa os comprimentos de onda de absorção de água, a correlação dos nutrientes e a reflectância diminuem, essa característica já era esperada, pois nesta faixa o

conteúdo de água na célula é o principal fator na influência da reflectância (PONZONI et al., 2012). Outra importante característica refere-se ao infravermelho próximo (720-1100 nm), nesta faixa a correlação com os nutrientes foi alta e manteve-se estável, sem grandes oscilações. Por outro lado, toda faixa do visível e borda vermelha teve grandes oscilações entre as correlações.

### 3.3.3.2 Safra 2021

O fósforo (P), similar a última safra (2019/20) foi o nutriente de maior correlação com a reflectância, no entanto, esta foi positiva e com coeficientes menores (Figura 6). A faixa de 400-420 nm teve a maior média de coeficiente de correlação, com 0,61. Tendo um segundo e terceiro pico na região do verde (560-574 nm) e borda vermelha (690-730 nm), respectivamente. Diferente do último ciclo produtivo, quase todos nutrientes, com exceção do N, apresentaram valores positivos e de correlação menor.



**Figura 6.** Coeficiente de correlação de Spearman entre os nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) foliar e a reflectância dos comprimentos de onda entre 400 a 2500 nm.

Cabe destacar, que na primeira safra (2019/20) os teores de P, K e N foram abaixo do adequado para cultura, conseqüentemente apresentaram coeficientes altos e negativos, principalmente na região do Vis (400-680 nm) e borda vermelha (680-760 nm) pois estes nutrientes possuem alta correlação com a clorofila e carotenoides (SIEDLISKA, et al., 2021; AYALA-SILVA e BEYL 2005).

Já, na safra 2020/21, as concentrações de P e K passaram a níveis adequados, mas tendo uma menor e positiva correlação com a reflectância. Neste caso, o N foi o único nutriente com teores abaixo do recomendado, apresentando uma similaridade no comportamento da

correlação da safra 2019/20, mantendo-se negativa. Os resultados mostram que neste estudo, a reflectância esteve ligada diretamente com a deficiência de nutriente na cultura e que esta relação é inversamente proporcional.

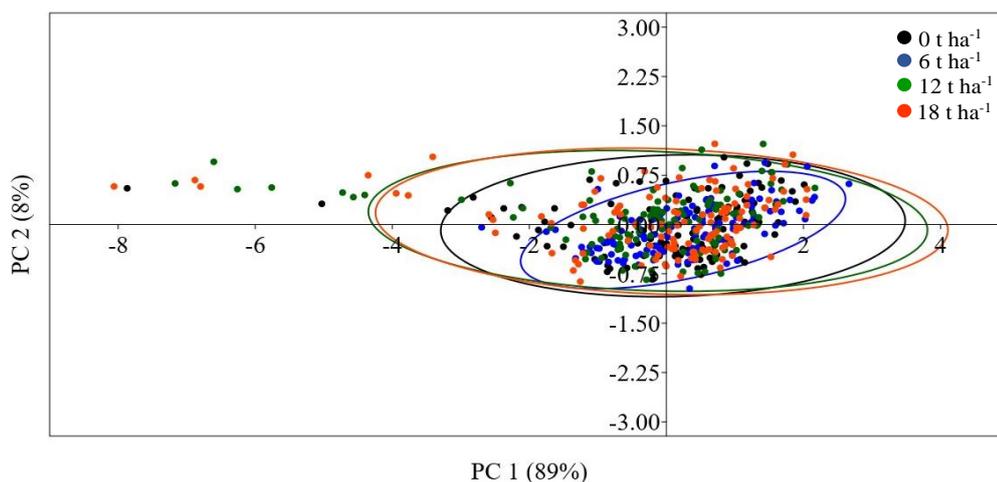
Nos dois ciclos estudados a região da borda vermelha (680-760 nm) demonstrou ser bastante sensível as variações dos nutrientes P, K e N, nesta ordem em grau de correlação. Isso porque a borda vermelha (680-760 nm) é bastante correlacionada as variações dos teores de clorofila nas folhas (LIN et al. 2019). Segundo Peng et al. (2020), as bandas que são indicativas de P foliar também estão na região de 580-710 nm, embora isso varie entre os diferentes estudos de caso. Os teores de N e sua correlação com a borda vermelha já são bastante discutidos em estudos com dados hiperespectrais (BARROS et al., 2021; WEN et al., 2021) Por outro lado, poucos trabalhos abordam características espectrais causado pelo estresse nutricional do K.

Além disso, a variação na reflectância entre as doses de calcário evidenciou a relação com o estado nutricional da cana, pois quando a cultura encontrava-se sob estresse nutricional o fator de correlação era maior e negativo, já quando as condições passou a padrões adequados a correlação passou a ser menor e positiva (Figura 5 e 6).

### **3.3.4 Análise de similaridade (ANOSIM) e Análise das Componentes Principais (ACP)**

A análise de similaridade (ANOSIM) referentes a reflectância das folhas da cana-de-açúcar da safra 2019/20, indica que o teste rejeitou a hipótese nula, indicando que houve a formação de pelo menos um grupo ( $p = 0,0051$ ). No entanto, o valor global de R muito baixo ( $R=0,01$ ) indica sobreposição e baixa possibilidade de diferença entre os grupos.

Na análise da ACP (Figura 7), as PC1 e PC2 explicaram 97% da variância da reflectância, formando quatro grupos referentes as doses 0, 6, 12 e 18 t ha<sup>-1</sup>, cabe destacar, que dentre as doses a que melhor se agrupou foi a de 6 t ha<sup>-1</sup>. No entanto, os grupos não diferem entre si, confirmando os resultados da ANOSIM.

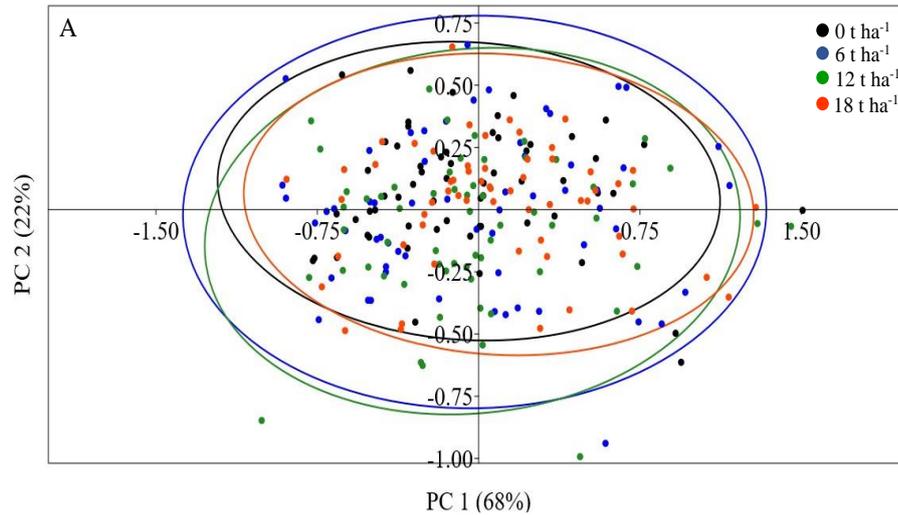


**Figura 7.** Distribuição da análise das componentes principais (ACP)

Essa semelhança entre os grupos já era esperada para a safra 2019/20, pois ocorreu estresse nutricional na cultura em todas as doses estudadas devido à baixa nos nutrientes N, P, K e S (Tabela 1). Além disso, a reflectância foliar das doses 0, 6, 12 e 18 t ha<sup>-1</sup> ficaram muito próximas, registrando diferenças mais acentuadas somente nos comprimentos de onda do VIS e NIR.

O teste de similaridade (ANOSIM) no último ciclo produtivo (2020/21), semelhante a safra anterior (2019/20), registrou valor baixo de R (0,02), indicando sobreposição entre as classes e baixa possibilidade de diferença entre os grupos; no entanto, o valor de *p* (0,01) foi significativo, mostrando que houve formação de pelo menos um grupo.

Já a ACP respondeu 90% da variabilidade dos dados hiperespectrais, possuindo a primeira componente (PC 1) 68% e a segunda componente (PC 2) 22%. Nesta safra, os resultados mostram que as doses não se agruparam muito bem e não se separaram entre si, confirmando os resultados da ANOSIM e os fatores de reflectância da Figura 4B, pois não se diferenciaram entre as doses.

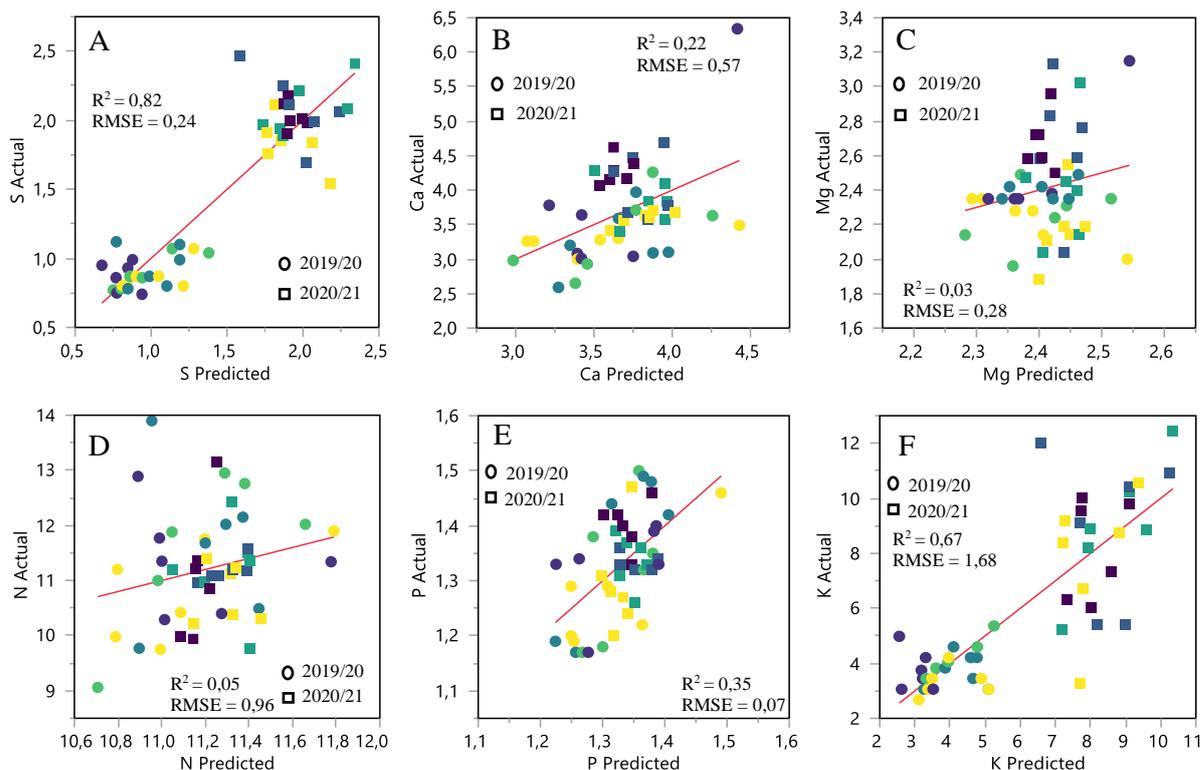


**Figura 8.** Distribuição da análise das componentes principais (ACP)

Ao analisar os teores de nutrientes foliar na cana-de-açúcar na safra 2020/21, as concentrações de P, K, Mg, Ca e S estavam em condições adequadas para cultura, não podendo ser observado diferenças mais acentuadas na reflectância foliar para esse período, acredita-se, que seja um dos fatores que tenha influenciado na semelhança entre os grupos na PCA, como já demonstrado pela própria curva espectral.

### 3.3.5 Predições dos teores de nutrientes com dados espectrais e PLSR

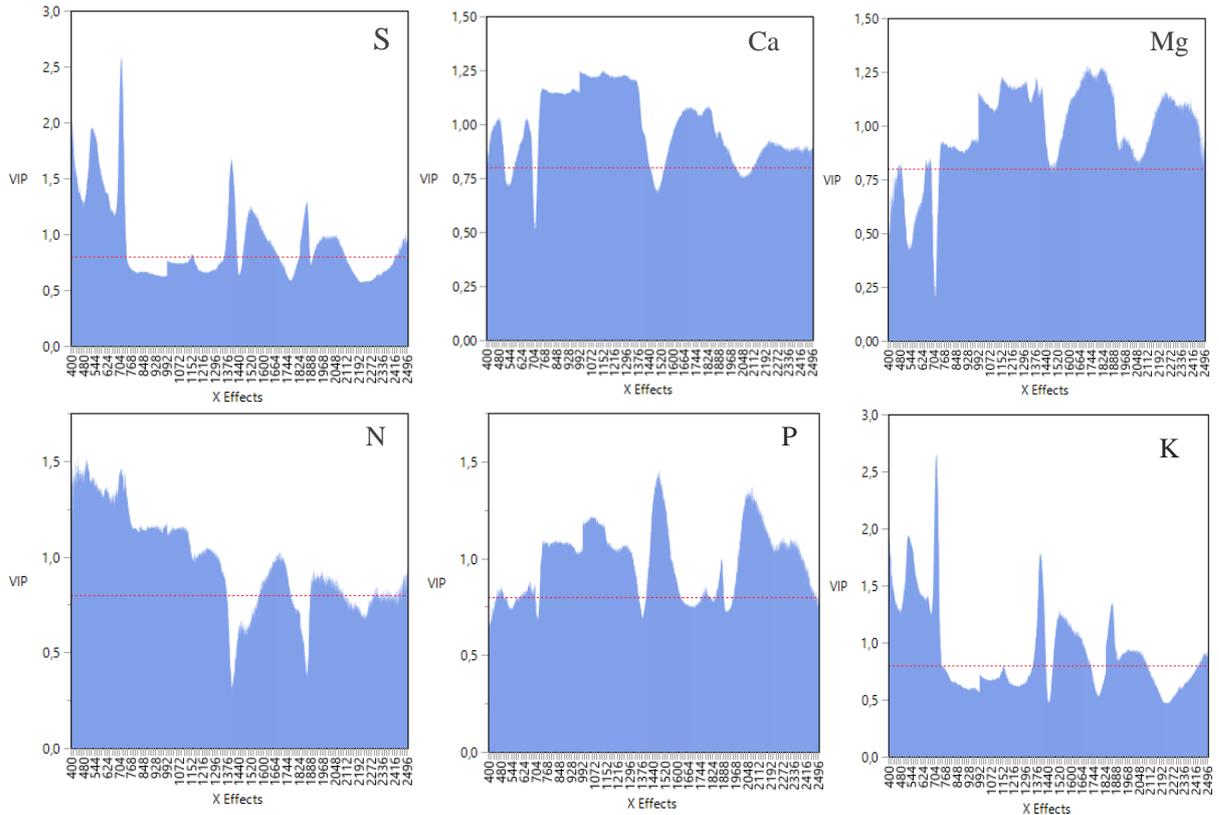
A análise de estimativa dos teores de nutrientes da cana-de-açúcar a partir da resposta espectral das folhas, mostram maiores diferenças dos espectros de uma safra para outra, além disso, as respostas espectrais registraram sofrer influência mais significativa do enxofre, potássio e fósforo, com  $R^2$  igual a 0,82, 0,67 e 0,35, respectivamente (Figura 9).



**Figura 9.** Gráfico de dispersão da estimativa dos teores de nutrientes por espectro observado versus predito para os nutrientes enxofre (A), cálcio (B), magnésio (C), nitrogênio (D), fósforo (E) e potássio, nas safras 2019/20 e 2020/21.

Apesar da reflectância estar diretamente relacionada com os teores de N e P na planta, por conta, principalmente, dos pigmentos da clorofila e carotenoides (SIEDLISKA, et al. 2021; MAHAJAN et al., 2014; BARROS et al., 2021; ROSA et al., 2015), neste estudo, os espectros tiveram uma boa resposta para os teores de S, K e P. Os nutrientes S e K atuam de forma indireta na reposta espectral da cultura, dificultando na maioria dos casos sua correlação com a reflectância das folhas.

Neste caso, foi possível identificar através do teste VIP (Figura 10) a importância de cada banda na predição dos nutrientes. Mesmo que de forma indireta, neste estudo, os teores de S e K, além de semelhantes tiveram contribuições mais expressivas no espectro da região do Vis e red-edge, com picos acentuados na faixa de 400-420, 480-600 e 700 nm.



**Figura 10.** Importância de cada banda na predição de nutrientes das folhas da cana-de-açúcar através da regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR – VIF). Sendo: S (Enxofre), Ca (Cálcio), Mg (Magnésio), N (Nitrogênio), P (Fósforo) e K (Potássio).

Estudos com K demonstraram que a região do Vis foram as mais sensíveis, principalmente na faixa de 360 a 450 nm (PENG et al., 2020), essa relação entre os espectros e o potássio pode ser explicado devido a deficiência de K reduzir a concentração de clorofila nas plantas (MAHAJAN et al., 2014; AYALA-SILVA; BEYL, 2005).

As bandas da faixa do Vis (400-680 nm) e red-edge (680-720 nm) tiveram grande importância na predição do nitrogênio, ocorrendo uma redução na região do NIR e de forma mais acentuada na faixa do SWIR. As bandas sensíveis ao N são devidas as características morfológica e fisiológica das plantas (HOU et al., 2019), pois as moléculas de clorofila desempenham um papel importante na fotossíntese das folhas, realizando a absorção da radiação solar para a conversão em energia química (CROFT; CHEN, 2018), sendo o comportamento espectral da folha na faixa do Vis um ótimo indicador da capacidade fotossintética (CROFT et al., 2017).

Os teores de Ca e Mg tiveram maior importância de contribuição na região do NIR, isto foi devido ao cálcio e magnésio estarem relacionados a parede celular das folhas. O Ca, por exemplo, aumenta a taxa fotossintética, além de desempenhar um papel estrutural na parede celular e nos sistemas da membrana. Por outro lado, a deficiência de cálcio pode ser observada como margens

foliares cloróticas e pode dificultar a fotossíntese foliar (ETICHA et al., 2017). Neste caso, e de maneira geral, o cálcio está diretamente ligado com a reflectância, pois quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação incidente, conseqüentemente, maiores serão os valores dos fatores de reflectância (POZONI et al., 2012).

### 3.4 CONCLUSÃO

As doses 6 e 12 t ha<sup>-1</sup> (safra 2019/20) estava em condições menos estressadas e com melhores taxas de fotossínteses, nestas doses os teores de N e K foram os que registraram as melhores concentrações, acima dos teores das doses 0 e 18 t ha<sup>-1</sup>; já no ciclo seguinte, as plantas da dose 21 t ha<sup>-1</sup> apresentou maior fator de reflectância e com baixas concentrações de N.

Os resultados demonstraram que o uso de técnicas radiométricas podem ser usadas para monitorar o status nutricional da cana-de-açúcar. A análise de correlação dos nutrientes com a reflectância da folha mostrou a presença de comprimentos de onda responsivos ao estado variável de N, P e K, principalmente.

O fósforo registrou os maiores graus de correlações com a reflectância principalmente na faixa da red-edge e verde, regiões conhecidas por possuir relação ao estado nutricional da planta. As respostas espectrais na região do Vis e red-edge registraram sofrer influência mais significativa do enxofre, potássio e fósforo.

### REFERÊNCIAS

ANSARI, M. S.; YOUNG, K. R.; NICOLAS, M. E. Determining wavelenth for nitrogen and phosphorus nutrients through hyperspectral remote sensing in wheat (*Triticum aestivum* L.) plant. **Int. J. Bio-Resour. Stress Manage**, v. 7, n. 4, p. 653-662, 2016.

ASD - Analytical Spectral Devices. **Manual do Usuário do FieldSpec<sup>®</sup> 3**, Documento ASD 600540 Rev. F; Analytical Spectral Devices, Inc.: Boulder, CO, EUA, 2010.

AUDE, M. I. S. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência rural**, v. 23, p. 241-248, 1993.

AULER, A. C.; PIRES, L. F.; CAIRES, E. F. Surface and incorporated liming effects on clay dispersion, water availability, and aeration capacity of a Dystrudept soil. **Bragantia**, v. 76, p. 433-446, 2017.

AYALA-SILVA, T.; BEYL, C. A. Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency. **Advances in Space Research**, v. 35, n. 2, p. 305-317, 2005.

BARROS, P. P. D. S.; FIORIO, P. R.; DEMATTÊ, J. A. D. M.; MARTINS, J. A.; MONTEZANO, Z. F.; DIAS, F. L. F. Estimation of leaf nitrogen levels in sugarcane using hyperspectral models. **Ciência Rural**, v. 52, 2021.

BELMONTE, R. Z. **Evaluación de la calidad ambiental en suelos de la provincia de Alicante desarrollo y aplicación de diferentes técnicas**. Tese (Doutorado). Elche. 2006.

CASAL, G.; KUTSER, T.; DOMÍNGUEZ-GÓMEZ, J. A.; SÁNCHEZ-CARNERO, N.; FREIRE, J. Assessment of the hyperspectral sensor CASI-2 for macroalgal discrimination on the Ría de Vigo coast (NW Spain) using field spectroscopy and modelled spectral libraries. **Continental Shelf Research**, v. 55, p. 129-140, 2013.

CHAVES, V. A. SANTOS, S. G. D.; SCHULTZ, N.; PEREIRA, W.; SOUSA, J. S.; MONTEIRO, R. C.; REIS, V. M. Desenvolvimento inicial de duas variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 39, p. 1595-1602, 2015.

CHENG, T.; ZHU, Y.; LI, D.; YAO, X.; ZHOU, K. Hyperspectral Remote Sensing of Leaf Nitrogen Concentration in Cereal Crops. In: **Hyperspectral Indices and Image Classifications for Agriculture and Vegetation**. CRC Press, 2018. p. 163-182.

CROFT, H.; CHEN, J. M. **Leaf pigment content. Reference module in earth systems and environmental sciences**, p. 1-22, 2018.

CROFT, H.; CHEN, J. M.; LUO, X.; BARTLETT, P.; CHEN, B.; STAEBLER, R. M. Leaf chlorophyll content as a proxy for leaf photosynthetic capacity. **Global change biology**, v. 23, n. 9, p. 3513-3524, 2017.

CRUSCIOL, C. A. C.; ROSSATO, O. B.; FOLTRAN, R.; MARTELLO, J. M.; NASCIMENTO, C. A. C. D. Soil fertility, sugarcane yield affected by limestone, silicate, and gypsum application. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 48, n. 19, p. 2314-2323, 2017.

ETICHA, D.; KWAIST, A.; SOUZA CHIACHIA, T. R.; HOROWITZ, N.; STÜTZEL, H. Calcium nutrition of orange and its impact on growth, nutrient uptake and leaf cell wall. **Citrus Research & Technology**, v. 38, n. 1, p. 62-70, 2017.

FERWERDA, J. G.; SKIDMORE, A. K. Can nutrient status of four woody plant species be predicted using field spectrometry? **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 62, n. 6, p. 406-414, 2007.

FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. **Bragantia**, v. 66, p. 669-674, 2007.

GALLOWAY, J. N.; TOWNSEND, A. R.; ERISMAN, J. W.; BEKUNDA, M.; CAI, Z.; FRENEY, J. R.; SUTTON, M. A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. **Science**, v. 320, n. 5878, p. 889-892, 2008.

HAMMAD, H. M.; KHALIQ, A.; ABBAS, F.; FARHAD, W.; FAHAD, S.; ASLAM, M.; BAKHAT, H. F. Comparative effects of organic and inorganic fertilizers on soil organic carbon and wheat productivity under arid region. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 10, p. 1406-1422, 2020.

HOU, W.; TRÄNKNER, M.; LU, J.; YAN, J.; HUANG, S.; REN, T. CONG, R. LI, X. Interactive effects of nitrogen and potassium on photosynthesis and photosynthetic nitrogen allocation of rice leaves. **BMC plant biology**, v. 19, n. 1, p. 1-13, 2019.

HOUBORG, R.; FISHER, J. B.; SKIDMORE, A. K. Advances in remote sensing of vegetation function and traits. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 43, p. 1-6, 2015.

JUNGES, A. H.; ALMANÇA, M. A. K.; FAJARDO, T. V. M.; DUCATI, J. R. Leaf hyperspectral reflectance as a potential tool to detect diseases associated with vineyard decline. **Tropical Plant Pathology**, v. 45, n. 5, p. 522-533, 2020.

KHOKHAR, M. S.; CHENG, K.; AYOUB, M.; ERIC, L. K. Muhammad Saddam et al. Multi-Dimension Projection for Non-Linear Data Via Spearman Correlation Analysis (MD-SCA). In: **2019 8th International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT)**. IEEE, 2019. p. 14-18.

LIN, S.; LI, J.; LIU, Q.; LI, L.; ZHAO, J.; YU, W. Evaluating the effectiveness of using vegetation indices based on red-edge reflectance from Sentinel-2 to estimate gross primary productivity. **Remote Sensing**, v. 11, n. 11, p. 1303, 2019.

LIU, Y.; LYU, Q.; HE, S.; YI, S.; LIU, X.; XIE, R.; ZHENG, Y.; DENG, L. Prediction of nitrogen and phosphorus contents in citrus leaves based on hyperspectral imaging. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 2, p. 80-88, 2015.

MAHAJAN, G. R.; PANDEY, R. N.; SAHOO, R. N.; GUPTA, V. K.; DATTA, S. C.; KUMAR, D. Monitoring nitrogen, phosphorus and sulphur in hybrid rice (*Oryza sativa* L.) using hyperspectral remote sensing. **Precision agriculture**, v. 18, n. 5, p. 736-761, 2017.

MAHAJAN, G. R.; SAHOO, R. N.; PANDEY, R. N.; GUPTA, V. K.; KUMAR, D. Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Precision agriculture**, v. 15, n. 5, p. 499-522, 2014.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas -princípios e aplicações**. Piracicaba, Potafos, 1997. 319p.

MOKHELE, T. A.; AHMED, F. B. Estimation of leaf nitrogen and silicon using hyperspectral remote sensing. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 4, n. 1, p. 043560, 2010.

OSBORNE, S.; SCHEPERS, J.; FRANCIS, D.; SCHLEMMER, M. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 1215-1221, 2002.

PACUMBABA, J. R. R. O.; BEYL, C. A. Changes in hyperspectral reflectance signatures of lettuce leaves in response to macronutrient deficiencies. **Advances in Space Research**, v. 48, n. 1, p. 32-42, 2011.

PANG, Z.; TAYYAB, M.; KONG, C.; H. U, C.; ZHU, Z.; WEI, X.; YUAN, Z. Liming positively modulates microbial community composition and function of sugarcane fields. **Agronomy**, v. 9, n. 12, p. 808, 2019.

PENG, Y.; MI, K.; QIN, Y.; QING, F. T.; LIU, W. C.; XUE, D. Y.; LIU, X. H. Spectral reflectance characteristics of dominant plant species at different eco-restoring stages in the semi-arid grassland. **Spectroscopy and Spectral Analysis**, v. 34, n. 11, p. 3090-3094, 2014.

PENG, Y.; ZHANG, M.; XU, Z.; YANG, T.; SU, Y.; ZHOU, T.; WANG, H.; WANG, Y.; LIN, Y. Estimation of leaf nutrition status in degraded vegetation based on field survey and hyperspectral data. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2020.

PONZONI, F.; SHIMABUKURO, Y.; KUPLICH, T. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 176 p.

RAIJ, B. VAN; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1996. 285p.

ROSA, H. J. A.; AMARAL, L. R. D.; MOLIN, J. P.; CANTARELLA, H. Sugarcane response to nitrogen rates, measured by a canopy reflectance sensor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 840-848, 2015.

SCHLEMMER, M.; GITELSON, A.; SCHEPERS, J.; FERGUSON, R.; PENG, Y.; SHANAHAN, J.; RUNDQUIST, D. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 25, p. 47-54, 2013.

SIEDLISKA, A.; BARANOWSKI, P.; PASTUSZKA-WOŹNIAK, J.; ZUBIK, M.; KRZYSZCZAK, J. Identification of plant leaf phosphorus content at different growth stages based on hyperspectral reflectance. **BMC Plant Biology**, v. 21, n. 1, p. 1-17, 2021.

VISCARRA ROSSEL, R. A. ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. *Chemometrics Intelligent Laboratory Systems*, v.90, n.1, p.72-83, 2008.

WEN, P.; SHI, Z.; LI, A.; NING, F.; ZHANG, Y.; WANG, R.; LI, J. Estimation of the vertically integrated leaf nitrogen content in maize using canopy hyperspectral red edge parameters. **Precision Agriculture**, v. 22, n. 3, p. 984-1005, 2021.