

ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE NÃO OBTIDA DEVIDO ÀS FALHAS EM CANAVIAIS

MURILO OLIVEIRA CARDOSO¹, EUDOCIO RAFAEL OTAVIO DA SILVA², RICARDO CANAL FILHO³, JOSÉ PAULO MOLIN⁴

¹ Estudante de Eng^o Agrônômica, Lab. de Agricultura de Precisão, Depto. Engenharia de Biossistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP, Fone: (11) 940165634, oliveira.murilo@usp.br

² Eng^o Agrícola e Ambiental, Doutorando, Lab. de Agricultura de Precisão, Depto. Engenharia de Biossistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP

³ Eng^o Agrônomo, Doutorando, Lab. de Agricultura de Precisão, Depto. Engenharia de Biossistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP.

⁴ Eng^o Agrícola, Professor Titular, Lab. de Agricultura de Precisão, Depto. Engenharia de Biossistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP.

Apresentado no
Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão e Digital - ConBAP 2024
Porto Alegre, RS, 02 a 04 de julho de 2024

RESUMO: A cana-de-açúcar apresenta custo de produção elevado, o que torna relevante obter informações relativas ao alcance das produtividades obtidas ao longo das safras para uma eficaz gestão da lavoura. Um dos desafios enfrentados na produção são as falhas (espaçamento entre plantas) nas fileiras, que afetam diretamente a produtividade do cultivo e são crescentes ao longo das safras. O objetivo do presente estudo foi utilizar um método estabelecido na literatura para obter mapas de produtividade em resolução de fileira de cana-de-açúcar e estimar a produtividade não obtida devido às falhas na fileira. Utilizando dados de colheita da cana em dois talhões comerciais, de falhas e de fileiras reconstituídas por veículo aéreo não tripulado em uma abordagem de mapeamento com polígonos de Voronoi, foram gerados mapas em resolução de fileira e estimada a produção de cana não obtidas devido às falhas. Como resultados, foram identificados 5,71 e 2,00 ha de falhas e estimados em 465,16 e 163,42 Mg a produção não obtida para os talhões 1 e 2, respectivamente. Foram identificados locais de alta e baixa produtividade em distâncias curtas na fileira e este mesmo padrão foi verificado para a falha na fileira. Tamanhos similares de comprimentos de falhas podem ocasionar perdas de produtividade diferentes devido os diferentes potenciais produtivos na região. Portanto, a abordagem possui potencial para o monitoramento e tomada de decisão no canavial.

PALAVRAS-CHAVES: cana-de-açúcar, polígono de Voronoi, veículo aéreo não tripulado

ESTIMATION OF NON-OBTAINED YIELD DUE TO ROW GAPS IN SUGARCANE FIELDS

ABSTRACT: Sugarcane has a high production cost, which makes it important to obtain information regarding yield obtained throughout the harvest for effective crop management. One of the challenges faced in the field are the row gaps (space between plants), which directly affect crop yield and presents a growing tendency throughout the seasons. The objective of the present study was to use a method established in the literature to obtain yield maps at sugarcane row resolution and estimate the yield not obtained due to these row gaps. Using data from sugarcane harvests of two commercial fields, rows and gaps reconstituted by Unmanned Aerial Vehicle in a mapping approach with Voronoi polygons, maps were generated at row resolution and the production not obtained due to row gaps were estimated. As a result, 5.71 and 2.00 ha of failures were identified and non-obtained production was estimated at 465.16 and 163.42 Mg for fields 1 and 2, respectively. Locations of high and low yield were identified at short distances in the row and this same pattern was verified for row gaps. Similar fault lengths can cause different yield losses due to the different yield potentials in the region. Therefore, the approach has potential for monitoring and aid the decision-making in the sugarcane production.

KEYWORDS: sugarcane, Voronoi polygons, unmanned aerial vehicle

INTRODUÇÃO: Desde o século XVI, a cana-de-açúcar tem desempenhado um papel crucial na economia brasileira, liderando a produção mundial de açúcar, álcool e outros derivados (CONAB, 2022). O monitoramento dos canaviais tornou-se essencial para aplicar estratégias de otimização de recursos e tomar decisões específicas. Uma dessas abordagens é a resolução espacial em nível de fileira, com a predominante

utilização de colhedoras embarcadas com Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) de posicionamento acurado e veículos aéreos não tripulados (UAV) para reconstituir as fileiras da cana e medir os espaçamentos entre plantas, conhecidos como falhas (BARBOSA JÚNIOR et al., 2021). As falhas, caracterizadas como espaçamentos entre colmos onde não houve desenvolvimento de plantas (STOLF, 1986), representam um desafio para os gestores, pois indicam perda de produção na fileira. Monitorar esses dados juntamente com a investigação da variabilidade da produtividade em alta resolução espacial permite analisar como as falhas afetam a produtividade da cultura (MALDANER et al., 2024). Estudos recentes têm explorado o uso de dados de produtividade combinados com a reconstituição das fileiras de cana, para gerar mapas de produtividade em resolução de fileira (MALDANER & MOLIN, 2020). No entanto, são poucos os estudos que exploram a obtenção das falhas nessas situações e as relacionam com esses conjuntos de dados. A hipótese deste estudo é que é possível utilizar dados de produtividade e associá-los com dados de falhas na fileira, obtidos de UAV, para gerar informação sobre a não obtenção de biomassa de cana. Portanto, o objetivo deste estudo foi utilizar um método estabelecido na literatura para obter mapas de produtividade em resolução de fileira de cana-de-açúcar e estimar a produtividade não obtida devido às falhas na fileira.

MATERIAL E MÉTODOS: Os dados foram obtidos de um campo comercial de cana-de-açúcar localizado no estado de São Paulo, Brasil. A região possui clima tropical de inverno seco, caracterizada como Aw, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger. As áreas de estudo correspondem a dois talhões com 30,08 ha e 12,89 ha, cultivados com a variedade RB966928, de maturação precoce. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho álico (SANTOS et al., 2018).

A colheita foi realizada em 2021, terceiro corte da área, por colhedora de fileira única embarcada com GNSS de posicionamento acurado. A produtividade foi obtida de um sistema sensor comercial (Solinftec, São Paulo, Brasil), que avalia a produtividade com base no peso total da cana colhida nas áreas de estudo, levando em consideração as variações de pressão de propulsão no sistema de picagem da colhedora (MALDANER et al., 2022).

A aquisição dos dados de reconstituição de linhas e de falhas no canavial foi realizada por uma empresa prestadora de serviços utilizando um UAV, modelo eBee S.O.D.A, utilizando câmera RGB Sensefly S.O.D.A. O momento do voo foi baseado na altura média das plantas, cerca de 0,60 a 1,20 m de crescimento da cana, e na visibilidade da entrelinha, com resolução de pixel de 3,00 cm. Para identificar as falhas, foram obtidos os espaçamentos entre as plantas iguais ou maiores que 0,58 m, conforme extraído do ortomosaico gerado pelas imagens do UAV.

O conjunto de dados de produtividade de cada talhão foram filtrados visando remover os dados discrepantes. Foi realizada análise exploratória e a estatística descritiva dos dados de produtividade e do comprimento de falhas, em que foram obtidos os valores médios, mínimos, máximos, mediana, coeficiente de variação (CV) e desvio padrão (DP). Utilizando a Equação 1 foram quantificados a porcentagem de falhas (G%) em resolução de fileira de cana-de-açúcar no talhão (MOLIN & VEIGA, 2016).

$$G\% = \frac{d_i}{D} \times 100 \quad (1)$$

em que: G% - porcentagem de falhas; d_i - comprimento da falha em determinado local i ; D - comprimento da fileira de cana existente no talhão.

Para a elaboração dos mapas de produtividade em resolução de fileira utilizou-se como referência o trabalho de Maldaner e Molin (2020). Neste estudo, os autores utilizaram ferramentas de geoprocessamento e dados vetoriais em Sistema de Informação Geográfica (SIG), especificamente dados de produtividade, em geometria de pontos, para a construção de polígonos de Voronoi e os associaram à geometria de linhas, que representavam as fileiras da cana. O polígono de Voronoi subdivide o plano em n células (ou polígonos) envolvendo a parte do plano que está mais próxima de cada ponto, de tal forma que as bordas de polígonos adjacentes se encontram equidistantes de seus respectivos pontos geradores (ZENGIN & SEZER, 2021). Isso produz um mosaico que cobre todo o plano.

Para cada talhão do presente estudo, foi gerado o polígono de Voronoi a partir dos dados de produtividade e realizada a intersecção desta camada com as que representam a reconstituição das fileiras e de falhas na fileira da cana. Para isto, utilizou-se a ferramenta “Intersecção” do QGIS. Seja $P_{(x,y)}$ a função de produtividade em um determinado ponto (x, y) do espaço, as fileiras reconstituídas do plantio de cana-de-açúcar podem ser representadas por uma função $f_{(x,y)}$ que descreve a distribuição das fileiras. Os polígonos de Voronoi podem ser representados por uma função $V_{(x,y)}$, que atribui a cada ponto (x, y) do espaço o identificador do polígono

de Voronoi correspondente. Cada polígono de Voronoi possui um valor de produtividade associado, denotado por P_v . Dessa forma, a intersecção entre as fileiras reconstituídas e os polígonos de Voronoi pode ser representada pela função de intersecção $I_{(x,y)}$, definida como (Equação 1):

$$I_{(x,y)} = \begin{cases} P_v, & \text{se } f_{(x,y)} \text{ e } V_{(x,y)} \text{ se intersectam} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

Assim, a função de intersecção $I_{(x,y)}$ atribui um valor de produtividade P_v a cada ponto do espaço onde as fileiras reconstituídas e os polígonos de Voronoi se intersectam, e 0 aos demais pontos, gerando o mapa de produtividade em resolução de fileiras. Ainda, utilizando os mesmos termos da Equação 1, mas substituindo $f_{(x,y)}$ por uma função de distribuição das falhas nas fileiras de cana-de-açúcar $f_{falhas_{(x,y)}}$, obtém-se o mapa de comprimento de falhas com a estimativa do que deixou de ser produzido (Equação 2):

$$I_{(x,y)} = \begin{cases} P_v, & \text{se } f_{falhas_{(x,y)}} \text{ e } V_{(x,y)} \text{ se intersectam} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

Na Figura 1, estão ilustradas as etapas para geração dos mapas de produtividade a nível de fileiras de cana-de-açúcar, e da produção que deixou de ser obtida devido às falhas nas fileiras. Nota-se que, neste último, obtém-se a produtividade dos locais sem plantas (falhas) assumindo que, nessas falhas, a produtividade seria semelhante à dos seus vizinhos na fileira, que possuem plantas.

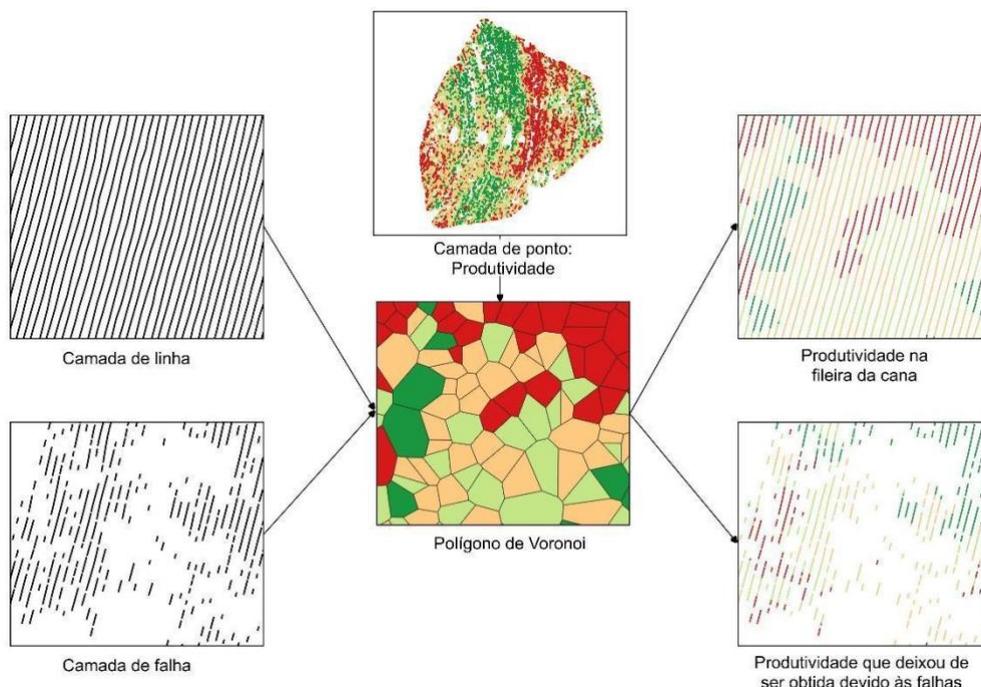


FIGURA 1. Etapas desenvolvidas utilizando ferramentas de geoprocessamento e as camadas de pontos de produtividade georreferenciados, falhas e reconstituição de fileiras da cana.

Destaca-se que, ao realizar a intersecção, ocorreram casos de falhas que estavam sob dois polígonos de Voronoi, recortando-as e sendo geradas duas falhas. Logo, o comprimento das falhas precisou ser calculado novamente para fazer a correção dos novos tamanhos de falhas. A estimativa da produção de cana não obtida devido às falhas foi obtida pela multiplicação das variáveis: produtividade que deixou de ser obtida devido às falhas, área do talhão, comprimento da falha e comprimento da fileira da cana.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Em ambos os talhões, os valores de CV e DP da produtividade indicam a amplitude de variação dos dados, o que demonstra variabilidade da produtividade no canavial (Tabela 1). Em determinadas regiões dos talhões, foram verificados valores de baixa e de alta produtividade em locais próximos, o que corrobora com Maldaner e Molin (2020) em que verificaram mudanças nos valores de produtividade em pequenas distâncias na fileira. Os valores médios de produtividade dos talhões 1 e 2, correspondentes a 83,00 e 85,60 Mg ha⁻¹, respectivamente, e foram superiores aos da média nacional para esta

colheita, de 70,36 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2022), sendo talhões com adequado desempenho de produção para aquela safra.

TABELA 1. Estatística descritiva dos dados de produtividade e comprimento de falhas dos talhões 1 e 2.

Talhão	Variáveis	Méd	Medi	Máx	Mín	DP	CV	N falhas por comprimento (m)			
								Mg ha ⁻¹	%	Total	≤1,50
1	Prod (Mg ha ⁻¹)	83,00	81,76	151,15	28,80	17,30	20,00	-	-	-	-
	Comp. Falhas (m)	1,50	1,00	27,00	0,58	1,40	49,00	34.632	22.009	10.627	1.996
2	Prod (Mg ha ⁻¹)	85,60	84,70	144,23	46,10	16,50	19,00	-	-	-	-
	Comp. falhas (m)	1,63	1,10	19,95	0,58	1,53	93,00	11.336	6.489	4.008	839

Méd: Média; Medi: Mediana; Máx: Máximo; Mín: Mínimo; DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação; Prod: Produtividade; Comp. falhas: Comprimento de falhas; N falhas: Número de falhas; <1,50: ocorrência de comprimento de falha menor ou igual a ≤1,50 m; 1,50-5,00: ocorrência de comprimento de falha entre 1,50 e 5,00 m; > 5,00: ocorrência de comprimento de falha maior ou igual a ≥5,00 m.

Em relação aos comprimentos de falhas, foi verificado valores mínimos e máximos que variaram de 0,58 a 27,00 m para o talhão 1, enquanto no talhão 2 foi observada amplitude de dados de 0,58 a 19,95 m. As maiores ocorrências de comprimentos de falhas foram para os menores valores desta variável, onde 63% das falhas da área 1 e 57% da área 2 apresentaram comprimento menor ou igual a 1,50m, padrão que corresponde ao observado em Stolf (1986). Os valores de CV foram de 49,00 e 93,00%, nos talhões 1 e 2, respectivamente, o que indica heterogeneidade e alta variação do comprimento das falhas na fileira.

A estimativa da produtividade que deixou de ser obtida devido às falhas apresentou valores similares aos dados de produtividade gerados no polígono de Voronoi. Isto faz sentido porque a camada da falha foi interseccionada com a do polígono. Ainda, esse resultado é coerente em vista de que se houvessem plantas nos locais falhados, provavelmente estas plantas deveriam apresentar valores similares aos seus vizinhos na fileira. Importante mencionar que essa estimativa não considera, para falhas maiores de que 0,58 m, possíveis compensações de biomassa de plantas próximas a locais em que não há plantas (STOLF, 1989).

Foram identificados locais de alta e baixa produtividade em distâncias curtas. Isto pode ser visto pela distribuição de frequências e caracterização espacial da produtividade em resolução de fileiras na Figura 2A-B. As regiões em vermelho são as de menor produtividade, já as em verde as de maior produtividade, dentro do mesmo talhão. A caracterização da variabilidade espacial do que deixou de ser obtido de produtividade devido às falhas para os talhões 1 e 2 é apresentada na Figura 2C. As regiões em amarelo correspondem às de maiores estimativas de produtividade não obtida devido às falhas, enquanto as em violeta as de menores estimativas.

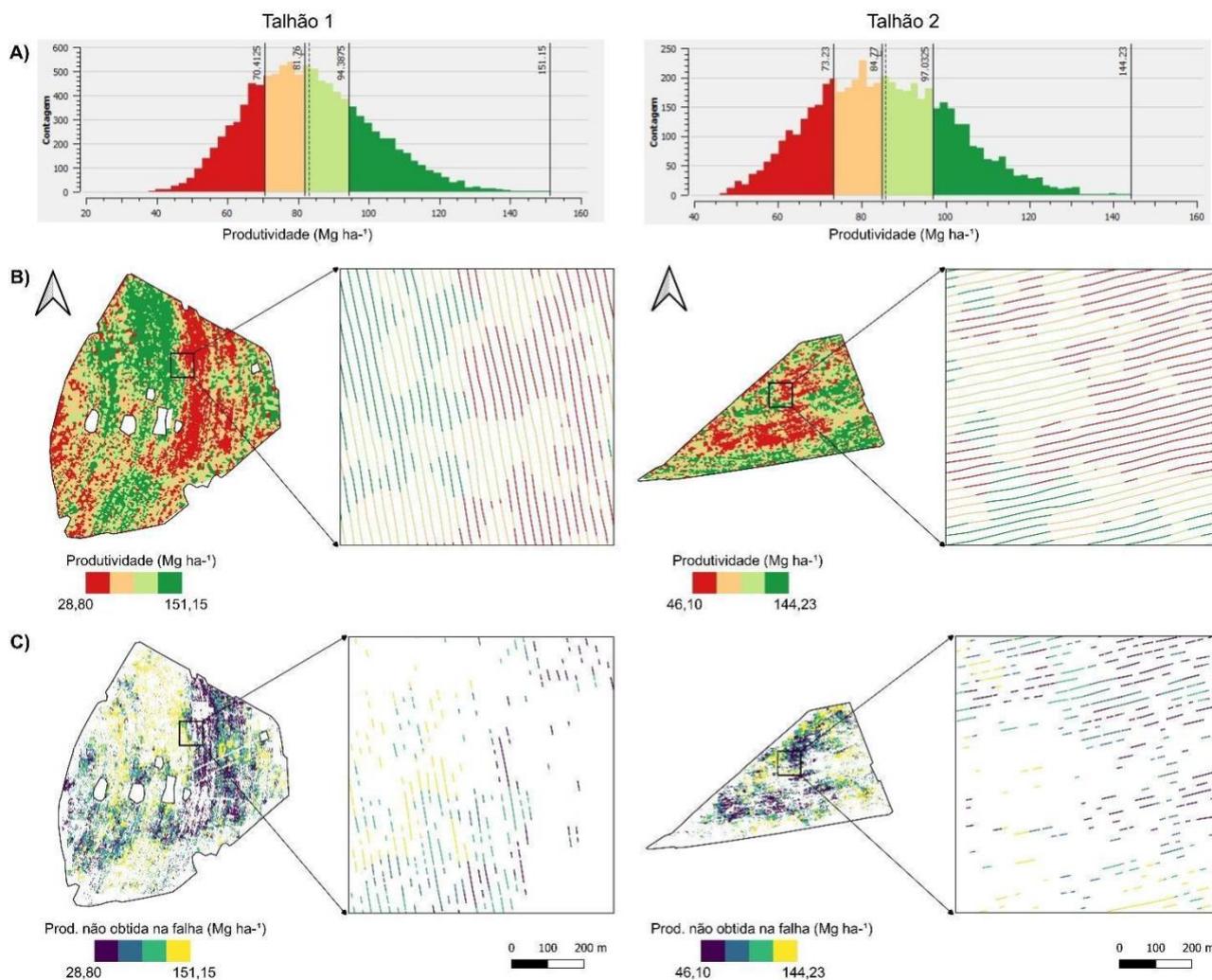


FIGURA 2. Distribuição de frequência da produtividade da cana (A), caracterização espacial da produtividade em resolução de fileira (B) e produtividade não obtida devido à falha na fileira (C) para os talhões 1 e 2.

Os talhões 1 e 2 apresentaram 19,28% e 15,05% de falhas, respectivamente. Isto representa que para o talhão 1, que possui 30,08 ha, cerca de 5,71 ha correspondem às falhas no canal, ou seja, são 5,71 ha sem plantas e que deixaram de produzir biomassa de cana-de-açúcar. Para o talhão 1, a perda de produção foi estimada em 465,16 Mg. No talhão 2, de 12,89 ha, cerca de 2,00 ha correspondem à ocorrência de falhas na fileira da cana, com estimativa de perda de produção correspondente a 163,42 Mg. Isto é relevante porque o monitoramento indicando onde há ou não a presença de plantas apoiado a este tipo de mapa em resolução de fileiras, podem colaborar na tomada de decisão, permitindo a otimização de insumos, reduzindo custos e minimizando impactos ambientais (BARBOSA JÚNIOR et al., 2021).

Observou-se também que, no mesmo talhão, tamanhos similares de comprimentos de falhas podem ocasionar produtividades não obtidas diferentes devido os diferentes potenciais produtivos na região. As falhas podem possuir o mesmo tamanho, porém dependendo da sua localização no canal, podem indicar estimativas diferentes de não obtenção de biomassa. Ressalta-se que as interações existentes entre plantas dentro da fileira da cana, assim como a presença de falhas, são complexas e demandam mais investigações. Onde futuros trabalhos podem dizer o que proporcionou tamanha variação dentro de uma mesma área.

CONCLUSÃO: Utilizando um método estabelecido na literatura, foi possível gerar mapas em resolução de fileira da cana-de-açúcar e estimar a produtividade não obtida devido às falhas. Foram identificados locais de alta e baixa produtividade em distâncias curtas na fileira e este mesmo padrão foi verificado para a falha na fileira. Tamanhos similares de comprimentos de falhas podem ocasionar perdas de produtividade diferentes devido os diferentes potenciais produtivos na região. Falhas de mesmo tamanho podem indicar estimativas diferentes de não obtenção de biomassa, a depender do potencial produtivo da região do talhão. Portanto, a abordagem possui potencial para o monitoramento e tomada de decisão no canal.

AGRADECIMENTOS: À Solinftec pelo suporte na obtenção dos dados.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA JÚNIOR, M. R.; TEDESCO, D.; CORRÊA, R. G.; MOREIRA B. R. A.; SILVA, R. P.; ZERBATO, C. Mapping Gaps in Sugarcane by UAV RGB Imagery: The Lower and Earlier the Flight, the More Accurate. **Agronomy**, v. 11, n. 12, 2021.
- CONAB. Boletim da safra de cana-de-açúcar. 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em Jan 2024.
- MALDANER, L. F.; MOLIN, J. P.; SILVA, E. R. O. Spatial–Temporal Analysis to Investigate the Influence of in-Row Plant Spacing on the Sugarcane Yield. **Sugar Tech**, v. 26, p. 194-206, 2024.
- MALDANER, L. F.; CANATA, T. F.; MOLIN, J. P. An Approach to Sugarcane Yield Estimation Using Sensors in the Harvester and ZigBee Technology. **Sugar Tech**, v. 24, n. 3, p. 813-821, 2022.
- MALDANER, L. F.; MOLIN, J. P. Data processing within rows for sugarcane yield mapping. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 5, p. 1-8, 2020.
- MOLIN, J. P.; VEIGA, J. P. S. Spatial variability of sugarcane row gaps: measurement and mapping. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 3, p. 347–355, 2016. <https://doi.org/10.1590/1413-70542016403046915>..
- SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.
- STOLF, R. Um modelo explicativo da competição entre colmos de um canavial e o vale da morte. **STAB**, v. 8, n. 2, p. 27-34, 1989.
- STOLF, R. Methodology for gap evaluation on sugarcane lines. **STAB**, v. 4, n. 6, p.12–20, 1986.
- ZENGIN, R. S.; SEZER, V. A novel point inclusion test for convex polygons based on Voronoi tessellations. **Applied Mathematics And Computation**, v. 399, 126001, 2021