UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas

Fluxos de energia na agricultura

**Saldo energético da cana-de-açúcar submetida a níveis de fotoproteção e regimes hídricos**

Iêdo Peroba de Oliveira Teodoro

Prof. Dr. Thiago Libório Romanelli

Piracicaba, SP

Novembro de 2023

**Saldo energético da cana-de-açúcar submetida a níveis de fotoproteção e regimes hídricos**

RESUMO

O Brasil está entre os países com maior produção de açúcar e etanol da cana-de-açúcar, responsável por 18% da produção e 36% do comércio de cana no mundo. O estado de São Paulo cultiva mais de 50% da área nacional de cana-de-açúcar, com produção de 312,9 milhões de toneladas. Entretanto, o saldo energético não é tão explorado e divulgado nas redes de comunicação, visto que há grandes discrepância energética entre a produção dos estados e países. Isso está atrelado a energia de insumo em cada canavial e seu retorno. Dessa forma, estudar diferentes manejos e práticas agrícolas para determinar ações mais sustentáveis e equilibradas é uma alternativa para aumento de saldo energético da cana-de-açúcar. Assim, o objetivo desse trabalho é apresentar o saldo energético de uma cultivar de cana submetida a dois manejos hídricos e três manejos de fotoproteção. Para isso, será executado um experimento no departamento de biossistemas, em outubro de 2023 com a cultivar CTC9002. Em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições e seis tratamentos, correspondentes a um fatorial duplo, sendo: 2 manejos de irrigação (50 e 100% da água disponível) e três níveis do fotoprotetor a base de carbonato de cálcio, sem fotoproteção (SF), recomendação do fabricante (RF) e concentrado (PC), soluções a 0, 3 e 6%, respectivamente. Com esse estudo, pretende-se alcançar resultados promissores e que torne o cultivo da cana-de-açúcar mais sustentável.

# Introdução

A cana-de-açúcar tem origem no Sudeste Asiático, região da Nova Guiné e Indonésia, e posteriormente disseminou-se como produtora de açúcar pelo Oceano Pacífico, na Indochina, no arquipélago da Malásia e na China. Por ser uma planta de clima tropical e com o melhoramento genético, essa cultura tem ampla distribuição geográfica entre as latitudes 35° Norte e 35° Sul. Dentro dessa faixa de ocupação, a cana-de-açúcar é a cultura de maior produção, abrangendo cerca de 100 países (DELGADO; CÉSAR, 1977; DANIELS; ROACH, 1987; FAROOQ; GHEEWALA, 2020). O Brasil está entre os países com maior produção de cana-de-açúcar, responsável por 18% da produção e 36% do comércio de açúcar no mundo. Na safra brasileira de 2022/23 a produção total dessa cultura foi de 610,1 milhões de toneladas. O estado de São Paulo tem destaque na produção, com mais de 50% da área nacional cultivada, produção de 312,9 milhões de toneladas e rendimento médio de 75,4 Mg ha-1 (CONAB, 2023; VIDAL, 2021).

O estado de São Paulo apresenta precipitação irregular e má distribuída, com tendência a maior frequência de eventos extremos (PFAHL; O’GORMAN; FISCHER, 2017). A disponibilidade hídrica afeta diretamente a produtividade das lavouras de cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER.; SMITH, 2005), portanto, para aumentar sua produtividade é essencial buscar estratégias que mitiguem os efeitos do déficit hídrico e assumam maiores saldos energéticos.

Assim, a associação entre o uso da irrigação e estratégias de restrição hídrica planejada auxiliam os produtores de cana-de-açúcar a obter incrementos de produtividade e maiores lucros. O uso de kaolin como fotoprotetor é uma alternativa de atenuação do déficit hídrico. A fotoproteção reduz danos causados pelo excesso de radiação e elevadas temperaturas (BOARI et al., 2016). Partículas de carbonato de cálcio têm efeito semelhante ao kaolin na planta, mas com menor impacto ambiental devido à origem atóxica, reduzindo a contaminação do solo (WANG et al., 2015; SILVA et al., 2019).

As diferentes formas de manejar a cultura e o uso de produtos que amenizam o estresse hídrico proporcionam efeitos no rendimento de açúcar e etanol da cana, o que proporciona diferentes sustentabilidades entre os cultivos. O etanol mais sustentável é aquele que necessita de uma maior relação entre investimento e retorno energético (SILVA, 2013). Essa relação é denominada de saldo energético, que subtrai toda energia consumida no processo de produção pela energia final do produto. Nesse viés, é necessário o estudo das culturas submetidas a diferentes manejos hídricos e produtos que atenuem o estresse hídrico para melhorar o rendimento: físico, econômico e energético das lavouras.

# Materiais e métodos

* 1. Experimento

O experimento será conduzido na casa de vegetação do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, no município de Piracicaba – SP. De acordo com a classificação de Köppen o clima desse município é classificado como “Aw”, clima tropical com inverno seco. As normais climatológicas (1987 - 2016) de precipitação pluvial e temperatura dessa região são: 1.279 mm e 21,7°C, respectivamente. O maior volume de chuva ocorre no mês de Janeiro, com precipitação média, máxima e mínima de 227, 491 e 61 mm. Enquanto os menos volumes precipitados ocorrem nos meses de julho e agosto, com média de 29 mm (ALVARES et al., 2022).

O delineamento experimental será blocos casualizados em esquema fatorial (2 × 3) com oito repetições. Os tratamentos serão a combinação de duas lâminas de irrigação baseadas na depleção de água no solo: 100 e 50% da água disponível, sem déficit e com déficit hídrico, respectivamente. E três doses do fotoprotetor a base de carbonato de cálcio, sem fotoproteção (SF), recomendação do fabricante (RF) e concentrado (PC), soluções a 0%, 3% e 6%, respectivamente.

A variedade CTC9002 de cana-de-açúcar foi selecionada para o plantio, realizado na primeira quinzena de outubro de 2023, sendo 4 mudas pré-brotadas por parcela, distribuídas em covas com profundidade de 15 cm, espaçadas de 0,6 m entre mudas e 0,5 m entre fileiras. Essa variedade apresenta maturação média (colheita de junho a setembro), é apta aos ambientes restritivos (rustica), tolerante à seca, ótimas brotações e alto perfilhamento, assim como, mantém produtividade ao longo dos cortes (CTC, 2021).

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico de textura franco-arenosa (Tabela 1). A adubação será realizada com base no Boletim 100 (CANTARELLA et al., 2022) e na análise química do solo (Tabela 2), realizada 5 meses antes da instalação do experimento. A adubação será dividida em adubação de fundação e duas de cobertura. A adubação de fundação será realizada cinco dias antes do transplantio, depositando no final do sulco: 20 kg ha-1 de ureia (45% de N), 192,6 kg ha-1 de cloreto de potássio (57,8% de K2O) e 212,8 kg ha-1 de fosfato monoamônio (52% de P2O5 e 11% de N). As adubações de cobertura serão realizadas 30 e 60 dias após o transplantio, distribuindo 22 kg ha-1 de ureia, por adubação, entre as plantas e cobrindo para diminuir as perdas por volatilização.

Tabela 1. Atributos físicos do solo da área experimental.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Camada | Areia | Silte | Argila | Da | Ksat\* |
| cm | % | g cm³ | cm h-1 |
| 0-20 | 72,95 | 10,8 | 16,25 | 1,54 | 4,45 |
| 20-40 | 67,98 | 14,46 | 17,56 | 1,66 |

\*Densidade aparente (Da), condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat).

Tabela 2. Resultados da análise química do solo da área experimental, nas profundidades de 0,00 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Prof. | pH | P | Ca | Mg | K | SB | Al | H+Al | CTC | V | M.O |
| cm | - | mg dm-3 | ---------------------- mmolc dm-3 ----------------------- | % | g dm-3 |
| 00-20 | 5,5 | 15 | 19,8 | 7,3 | 2,06 | 29,2 | <0,1 | 17,4 | 46,6 | 63 | 10 |
| 20-40 | 5,4 | 11,4 | 21,4 | 4,3 | 2,71 | 28,4 | <0,1 | 22,7 | 51,1 | 56 | 14,3 |

Nota1:Metodologia Embrapa; Extratores: CaCl2 (pH); Mehlich (P, K, Na, Fe, Cu, Zn, Mn); KCl (Ca, Mg e Al); Oxidação (C); Acetato de Cálcio (H+Al); B (HCl); Sulfato de Cálcio (S); Cálculos: S.B=Ca+Mg+Na+K; CTC=S.B+(H+Al); V%=(S.B/CTC)\*100.

Nota2:Metodologia: IAC; Extratores: Resina (P).

A irrigação será realizada com um sistema de gotejamento (Figura 4) com fitas gotejadoras autocompensantes, com espaçamento de 0,20 m entre emissores, vazão nominal de 1,6 Lh-1 e pressão de serviço de 100 kPa. Em cada parcela serão colocadas duas fitas gotejadoras de 1,3 m, espaçadas a 0,5 m, totalizando 12 emissores por unidade experimental (19,2 L h-1). A intensidade de aplicação desse sistema corresponde a 13,4 mm h-1, essa variável será correlacionada com o tempo de funcionamento do motor-bomba para cada tratamento de reposição hídrica.

O manejo da irrigação será realizado por meio do monitoramento do potencial matricial de água no solo (Ψm, kPa), medido por tensiômetros instalados a 10 cm das touceiras, nas camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4m. Os dados serão coletados com um tensímetro digital de punção e transformados em potencial matricial da água no solo (h), conforme a Equação 1. A umidade volumétrica das duas camadas será determinada através da Equação de Van Genuchten (SEKI; TORIDE; VAN GENUCHTEN, 2023).

|  |  |
| --- | --- |
| $$h=L\_{t}-h\_{c}$$ | (1) |
|  |  |

Em que: h é o potencial matricial da água no solo (kPa); Lt: leitura do tensiômetro (kPa) e hc corresponde a pressão equivalente à altura da coluna d’água no tensiômetro (kPa), 3 e 5 kPa, respectivos às profundidades 0-0,2 e 0,2-0,4 m.

O fotoprotetor à base de carbonato de cálcio foi aplicado mensalmente a partir da fase 3 de desenvolvimento da cultura (crescimento), visto que antes dessa fase não há área foliar significativa para proteção. A aplicação foi realizada com o auxílio de uma bomba de 5 L, por volta das 10:00 h, realizando as diluições para os três tratamentos: 0%, 6% e 12% do produto em água.

A produtividade de etanol (L ha‑1) será obtida através da extrapolação da produção total da parcela (1,1 x 1,3m) para 1 hectare. O etanol será extraído do caldo da cana-de-açúcar conforme a metodologia de Lopes & Borges (2009), resumida na Figura 1.



Figura 1. Fluxograma do processo de fabricação de açúcar e álcool, a partir da cana-de-açúcar.

Fonte: Lopes & Borges (2009).

* 1. Análise energética

Os dados da demanda energética (transporte, fertilizantes, operações agrícolas e irrigação) serão retirados do trabalho de Shelar et al. (2023). Para o insumo energético da irrigação será atribuído 7,18 MJ e 5,98 MJ por litro de etanol para os tratamentos de 50 e 100% da água disponível, respectivamente.

A energia média agregada dos fertilizantes, nitrogênio, potássio e fósforo (MJ kg‑1) serão retirados do trabalho de Teixeira et al. (2005). A energia de entrada do calcário variou em função do tratamento e será atribuído 1,7MJ para cada mil quilogramas de calcário (ROMANELLI, 2007), e será considerado que o carbonato de cálcio apresenta o potencial energético próximo ao do calcário. Os valores da energia de entrada estão descritos na Tabela 3.

Tabela . Valores dos energéticos de entrada dos fertilizantes no sistema em função do tratamento de fotoproteção

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Tratamento | Cálcio | Nitrogênio | Fósforo | Potássio |
| Kg/ha | MJ/kg | Kg/ha | MJ/kg | Kg/ha | MJ/kg | Kg/ha | MJ/kg |
| Sem Produto | 0 | 0,0017 | 64 | 59,46 | 212,8 | 11,96 | 192,6 | 5,89 |
| Recomendação do fabricante | 51 |
| Produto concentrado | 102 |

O litro de etanol, no Brasil, apresenta um conteúdo de 22 MJ (MACEDO et al., 2008). Dessa forma, será aplicado os indicadores de eficiência energética: balanço energético (BE, MJ ha-1 ano-1), energy return over investment (EROI, MJ MJ-1) e a energia incorporada (EI, MJ t-1), conforme as Equações 2, 3 e 4, respectivamente.

|  |  |
| --- | --- |
| $$BE=ES-EE$$ | (2) |
| $$EROI=\frac{ES}{EE}$$ | (3) |
| $$EI=\frac{EE}{P}$$ | (4) |

em que: ES corresponde a energia de saída, EE é a energia de entrada e P representa o valor da produção de biomassa.

* 1. Análise estatística

Os indicadores energéticos serão submetidos à análise de variância no *software RStudio*, pelo teste F à 5% de significância, se significativo, será aplicado o teste de Tukey para agrupar os tratamentos.

# Resultados esperados

Como resultado esperado, tem-se que esse estudo proporcione uma análise abrangente dos saldos energéticos decorrentes do manejo da irrigação e fotoproteção, a fim de definir um manejo mais sustentável para produção de etanol. Com impacto direto na redução de custos de produção, aumento de eficiência do sistema agrícola e gerar informações relevantes acerca da correlação do manejo hídrico e fotoproteção, que servirá de base para tomada de decisão. Para isso, serão apresentadas tabelas com os quadrados médios e a significância dos tratamentos, em seguida, serão apresentados gráficos de barra com os dados de insumo e produção de etanol, diferenciando por cor e letra acima da barra, cada grupo de semelhança estatística.

Referêncial Teórico

ALVARES, C. A., SENTELHAS, P. C., & DIAS, H. B. Southeastern Brazil inland tropicalization: Köppen system applied for detecting climate change throughout 100 years of meteorological observed data. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 149, n. 3-4, p. 1431-1450, 2022.

BOARI, F., DONADIO, A., PACE, B., SCHIATTONE, M.I., CANTORE, V. Kaolin improves salinity tolerance, water use efficiency and quality of tomato. **Agricultural Water Management**. 2016. 167, 29–37. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.021.

CONAB - **Companhia Nacional de Abastecimento**, Acompanhamento da Safra Brasileira. Cana-de-açúcar, v 11 - Safra 2023/24, n. 1 -Primeiro levantamento, Brasília, p. 1 – 55. abril 2023.

CATARELLA, H., QUAGGIO, J. A., MATTOS Jr. D., BOARETTO, R. M., RAIJ, B. V. Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agronômico. 2022. 500 p.

CONSECANA- CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Manual de Instruções. Piracicaba: Consecana, 2006. 112p.

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira. Variedades Bula Técnica. Agosto. 2021.

DANIELS, J; ROACH, B. T. Taxonomy and evolution. In: **Developments in crop science**. Elsevier, 1987. p. 7-84.

DELGADO, A. A.; CÉSAR, M. A. A. **Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana**. Piracicaba: ESALQ, Depto. de Tecnologia Rural, 1977. 364 p.

FAROOQ, N., GHEEWALA, S. H. Assessing the impact of climate change on sugarcane and adaptation actions in Pakistan. **Acta Geophysica**. v. 68, p. 1489–1503, 2020. https://doi.org/ 10.1007/s11600-020-00463-8.

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

LOPES, C. H.; BORGES, M. T. M. R. Introdução à tecnologia agroindustrial. 1. ed. São Carlos: EDUFSCAR, 2009. v. 1. 193p .

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. EA; SILVA, J. EAR. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008.

PFAHL, S.; O’GORMAN, P.A.; FISCHER, E.M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 6, p. 423-427, 2017.https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3287.

ROMANELLI, T . Sustentabilidade energética de um sistema de produção da cultura de eucalipto. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agriculcura Luiz de Queiroz. Tese de Doutorado, 2007.

SEKI, K., TORIDE, N., VAN GENUCHTEN, M, Th. Evaluation of a general model for multimodal unsaturated soil hydraulic properties. J. **Hydrol. Hydromech**. 71(1): 22-34, 2023. <https://doi.org/10.2478/johh-2022-0039>

Shelar, M. N., Matsagar, V. K., Patil, V. S., & Barahate, S. D. Net energy analysis of sugarcane based ethanol production. **Cleaner Energy Systems**, v. 4, p. 100059, 2023.

SILVA, B. F. R. A busca por uma matriz energética sustentável por meio do biodiesel de algas: características, implicações e perspectivas. **Revista Educação Pública**, v. 13, n. 48, 2013.

SILVA, P. S. O., SENA, E. D. O. A., GONZAGA, M. I. S., DE OLIVEIRA JUNIOR, L. F. G., DOS SANTOS MACIEL, L. B., DOS SANTOS, M. P. F., ... & CARNELOSSI, M. A. G. Calcium carbonate particle films and water regimes affect the acclimatization, ecophysiology and reproduction of tomato. **Environmental and Experimental Botany**, 165, 19-29. 2019.

TAIZ, L., ZEIGER, E., MØLLER, I. M., & MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017.

TEIXEIRA, C. A., LACERDA FILHO, A. F. D., PEREIRA, S., SOUZA, L. H. D.; RUSSO, J. R. Balanço energético de uma cultura de tomate. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 429-432, 2005.

VIDAL, M. D. F. Açúcar: cenário mundial e situação de produção no Brasil e no Nordeste brasileiro, 2021.

WANG, Y., LIU, A., YE, R., WANG, W., LI, X. Transglutaminase-induced crosslinking of gelatin-calcium carbonate composite films. **Food Chem**. 166, 414–422. 2015. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.062.