

ARTIGO

Relações hídricas e térmicas com as safras de cana-de-açúcar do sudeste brasileiro

Water and Thermal Relations with Sugarcane Crops in Southeastern Brazil

Luiz Fernando da Silva Nascimento¹ ; Iêdo Peroba de Oliveira Teodoro¹ ; Angelo Tiago Azevedo¹ ; Timóteo Herculino da Silva Barros² ; Leornado Santana Penatti¹ ; Julia Pataro de Oliveira¹ ; Fernando Campos Mendonça¹ 

¹Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), Av. Pádua Dias, 11, Piracicaba, SP 13418-900, Brasil

²Centro de Energia Nuclear na Agricultura – Universidade de São Paulo (CENA/USP), Av. Centenário, 303, Piracicaba, SP 13416-000, Brasil

RESUMO: O Brasil, líder na produção, gerou 610.131,4 mil toneladas na safra 2022/23, e São Paulo contribuiu com 312.879,5 mil toneladas. A produtividade é afetada por demandas hídricas e térmicas. O conhecimento desses fatores permite otimizar o manejo da cultura, crucial para garantir a sustentabilidade agrícola. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi analisar a interação entre o balanço hídrico dos últimos dez anos em Piracicaba e os GDA e as produtividades das últimas dez safras (2013/14 a 22/23), exceto a safra 20/21, com intuito de observar as tendências climáticas e produtivas da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Os dados agrometeorológicos diários (10 anos) foram baixados do posto meteorológico da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, a evapotranspiração referência diária foi calculada pelo método de Penman Monteith em seguida calculou-se os graus-dia acumulados, e separados por safra, considerando o ciclo Setembro a Agosto. Foi realizado o balanço hídrico da cultura, em escala mensal, e correlacionou com os dados de GDA e produtividade (obtidos nos boletins da Conab, 2024). A maior produtividade (81,9 ton ha⁻¹) da cana-de-açúcar dos últimos dez anos foi obtida na safra 13/14, com excesso hídrico de 0 mm e deficiência de 446,72 mm, a menor safra foi de 21/22 (70,94 ton ha⁻¹), com excesso e deficiência hídrica de 242,84 e 314,73 mm, respectivamente. O maior acúmulo (2.710,55 °C dia) térmico ocorreu na safra 14/15 e o menor (2.281,33) na safra 22/23. A análise dos dados mostra a forte influência das condições hídricas e térmicas na produtividade da cultura, crucial para orientar práticas agrícolas e garantir a sustentabilidade em São Paulo.

Palavras-chave: balanço hídrico, GDA, produtividade

ABSTRACT: Brazil, the leading producer, generated 610,131.4 thousand tons of sugarcane in the 2022/23 harvest, with São Paulo contributing 312,879.5 thousand tons. Productivity

is affected by water and thermal demands. Knowledge of these factors allows for the optimization of crop management, which is crucial to ensure agricultural sustainability. Thus, the objective of this study was to analyze the interaction between the water balance of the last ten years in Piracicaba and the accumulated degree days (ADD) and productivity of the last ten harvests (2013/14 to 22/23), except for the 20/21 harvest, in order to observe climate and production trends of sugarcane in the State of São Paulo. Daily agrometeorological data (10 years) were downloaded from the meteorological station of the Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), the daily reference evapotranspiration was calculated using the Penman-Monteith method, and then the accumulated growing degree days were calculated and separated by harvest, considering the cycle from September to August. The crop water balance was performed on a monthly scale and correlated with GDD and productivity data (obtained from Conab bulletins, 2024). The highest productivity (81.9 ton ha⁻¹) of sugarcane in the last ten years was obtained in the 13/14 harvest, with a water surplus of 0 mm and a deficit of 446.72 mm, the lowest harvest was 21/22 (70.94 ton ha⁻¹), with a water surplus and deficit of 242.84 and 314.73 mm, respectively. The highest thermal accumulation (2,710.55°C days) occurred in the 14/15 harvest and the lowest (2,281.33) in the 22/23 harvest. Data analysis shows the strong influence of water and thermal conditions on crop productivity, crucial for guiding agricultural practices and ensuring sustainability in São Paulo.

Keywords: water balance, ADD, yield cane

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, assume um papel de destaque na economia global, com o Brasil liderando a produção na safra 2022/23, atingindo 610,1 milhões de toneladas em 8,3 milhões de hectares (Conab, 2024). Em São Paulo, a produção alcançou 312,9 milhões de toneladas em 4,1 milhões de hectares, com produtividade média de 75,4 t ha⁻¹. Entretanto, a produtividade da cana é intrinsecamente ligada às condições hídricas e térmicas, sendo a evapotranspiração da cultura (ETc) e os Graus-Dia Acumulados parâmetros cruciais nesse contexto.

A ETc, representando a perda de água da cultura por evaporação e transpiração, é influenciada por fatores climáticos e características da planta. Estudos indicam uma ETc média acumulada de 1.300 mm para cana de ano, com média diária de 3,56 mm dia⁻¹ (Vieira et al., 2014). O balanço hídrico, ferramenta essencial para o manejo da irrigação, permite quantificar a água disponível para a cultura, sendo fundamental para otimizar o uso da água e garantir a sustentabilidade da produção (Pereira et al., 2002). O déficit hídrico, por sua vez, impacta negativamente o desenvolvimento da cana-de-açúcar, reduzindo a produtividade e a qualidade da matéria-prima. Santos (2016)

demonstrou o efeito positivo da irrigação na produção de biomassa em variedades de cana, evidenciando a importância do manejo hídrico adequado.

Os GDA, medida que reflete o acúmulo de calor ao longo do ciclo da cultura, também desempenham um papel fundamental na produtividade da cana. A cultura responde de forma diferenciada às variações de temperatura, com temperaturas ótimas em torno de 30°C (Inman-Bamber, 1995; Sinclair et al., 2004; Smit & Singels, 2006).

Diante da complexa interação entre clima e produtividade da cana-de-açúcar, este estudo propõe analisar a relação entre o balanço hídrico, os GDA e a produtividade das últimas dez safras em Piracicaba, São Paulo (2013/14 a 2022/23). O objetivo é identificar tendências climáticas e produtivas, para expandir a importância do desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e resilientes às mudanças climáticas. Adicionalmente, a análise da interação entre o balanço hídrico e os GDA em diferentes safras permitirá avaliar a resiliência da cultura a condições climáticas adversas, como secas e ondas de calor.

METODOLOGIA

Coleta e processamento de dados

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram obtidos do posto meteorológico localizado na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), em Piracicaba-SP (Figura 1). A classificação climática de Piracicaba, segundo a Köppen-Geiger, foi recentemente atualizada de Cwa para Aw, caracterizando um clima tropical com inverno seco (Alvares et al., 2022). Os dados de produtividade agrícola da cana-de-açúcar para as safras de 2013/14 a 2022/23 (exceto 2020/21) foram obtidos dos boletins da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab).

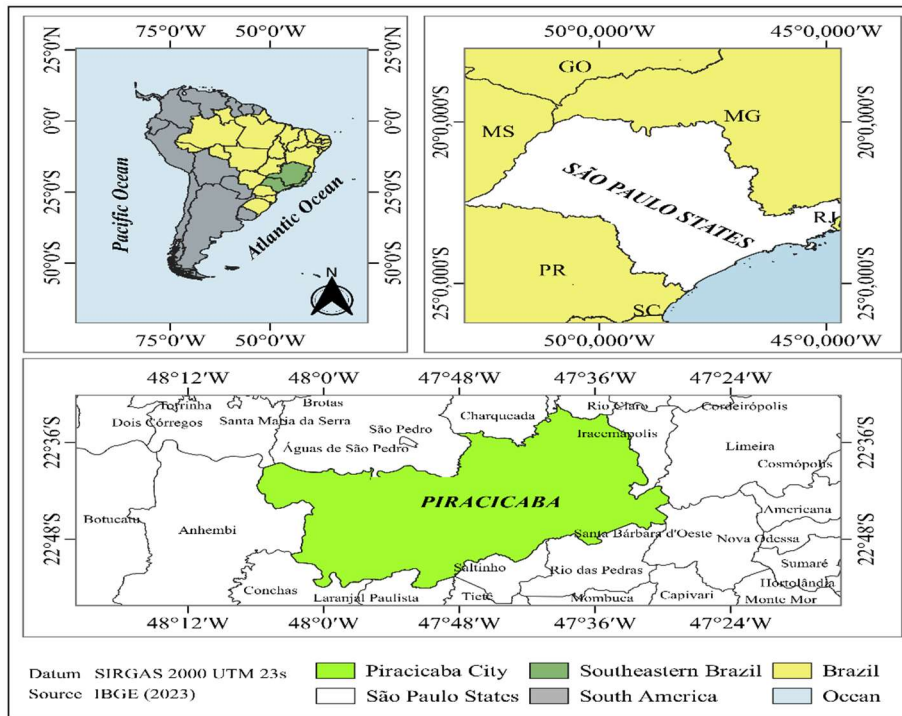


Figura 1. Mapa de localização da cidade de Piracicaba, SP.

Balanço hídrico

O balanço hídrico da cultura, em escala mensal, foi calculado pelo método de Thornthwaite & Mather (1955), adaptado por Lyra et al. (2010) para culturas agrícolas (Figura 2). A fim de parametrizar as análises, considerou a capacidade de água disponível no solo de 60 mm, profundidade do sistema radicular de 0,6 m. A evapotranspiração de referência (ET₀) foi calculada pelo método de Penman-Monteith (Equação 1). A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi obtida pelo produto da ET₀ e do coeficiente da cultura (K_c), cujos valores foram obtidos do Boletim FAO 56 (Allen et al., 1998), considerando as diferentes fases fenológicas da cana-de-açúcar.

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (1)$$

Em que:

ET₀ - Evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹);

Δ - Declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C⁻¹);

γ - Coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹);

T - Temperatura do ar a 2 metros de altura (°C);

u_2 - Velocidade do vento a 2 metros de altura (m s^{-1});

R_n - Saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

G - Densidade de fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

e_s - Pressão de vapor de saturação (kPa); e

e_a - Pressão parcial de vapor (kPa).

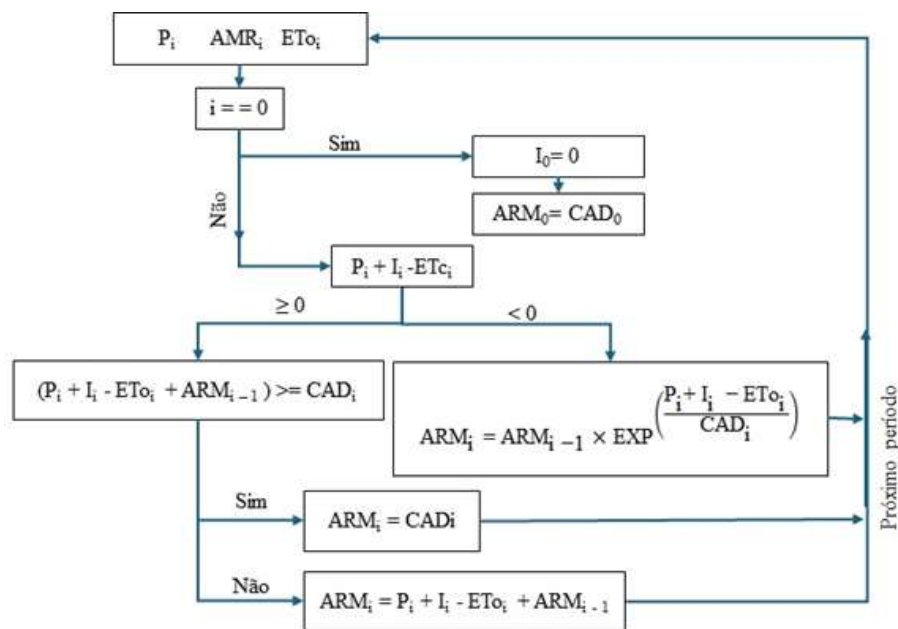


Figura 2. Árvore de decisão do Balanço Hídrico de Thornthwaite & Mather (1955), adaptado por Lyra et al. (2010).

Graus-dia acumulados

Os Graus-Dia Acumulados (GDA) foram calculados com o método proposto por Liu et al. (1998), considerando as temperaturas basal (T_b), ótima (T_o) e de saturação (T_s) de 16 °C, 30 °C e 40 °C, respectivamente, para a cana-de-açúcar (Inman-Bamber, 1995; Sinclair et al., 2004; Smit & Singels, 2006). A estimativa do GDA pelo método citado, leva em consideração as condições as temperaturas sub-ótimas do dia j (GD_{gj} , °C) e o efeito adverso da alta temperatura no dia j considerado (GD_{aj} , °C), conforme as Equações 2 a 5.

$$GDg_j = \begin{cases} \frac{T_{minj} + T_{maxj}}{2}, & Tb \leq T_{minj} \\ \frac{T_{minj} + T_{maxj}}{2} + \frac{(Tb - T_{minj})^2}{2(T_{maxj} - T_{minj})}, & T_{minj} < Tb < T_{maxj} \\ Tb, & Tb \geq T_{maxj} \end{cases} \quad (2)$$

$$GDA = \begin{cases} 0 & T_{maxj} < T_o \\ \frac{(T_s - Tb)(T_{maxj} - T_o)^2}{2(T_s - T_o)(T_{maxj} - T_{minj})} & T_o > T_{minj}; T_{maxj} < T_s \\ \frac{T_{maxj}(T_{maxj} - 2Tb) - T_o(T_s - Tb) + T_s Tb}{2(T_s - T_o)} & T_o > T_{minj}; T_{maxj} \geq T_s \\ \frac{(T_s - Tb)(T_{maxj} + T_{minj} - 2T_o)}{2(T_{maxj} - T_{minj})} & T_o \leq T_{minj} < T_s; T_{maxj} < T_s \\ \frac{T_{maxj} + T_{minj}}{2} - Tb - \frac{(T_o - Tb)(T_s - T_{minj})^2}{2(T_s - T_o)(T_{maxj} - T_{minj})} & T_o \leq T_{minj} < T_s; T_{maxj} < T_s \\ \frac{T_{maxj} + T_{minj}}{2} - Tb & T_{minj} > T_s \end{cases} \quad (32)$$

$$GD_j = GDg_j - GDA_j - Tb \quad (4)$$

$$GDA = \sum GD_j \quad (53)$$

Em que,

T_{minj} - Temperatura mínima do ar no dia j ;

T_{maxj} - Temperatura máxima do ar no dia j ; e

GD_j - Grau-dia do dia j .

Análises estatísticas

As análises estatísticas incluíram a correlação entre o balanço hídrico (déficit e excesso hídrico acumulados e máximos), os GDA e a produtividade da cana-de-açúcar. Adicionalmente, foram realizadas análises de regressão para identificar a influência das variáveis climáticas (balanço hídrico e GDA) na produtividade da cultura. Testes de

Tukey a 5% de probabilidade foram aplicados para verificar a significância estatística das relações observadas. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R, na versão 4.4.1, com o pacote Expedes.pt (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2012; RCore Team, 2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da temperatura revelou uma ampla variação ao longo das safras, com a máxima atingindo 41,24 °C na safra 2020/21 e a mínima chegando a 1,05 °C. A temperatura de saturação (40 °C) foi excedida apenas em alguns dias da safra 2020/21, indicando que, em geral, as condições térmicas não limitaram o desenvolvimento da cultura. As safras apresentaram variações no balanço hídrico, com a safra 2015/16 registrando o maior excesso hídrico acumulado (482,6 mm) e a safra 2022/23 o menor (293,85 mm). A safra 2020/21 se destacou pelo maior déficit hídrico (530,76 mm), principalmente em outubro (127,61 mm). Setembro de 2019 também apresentou um déficit significativo (113,24 mm), afetando a brotação e emergência da cana. A safra 2014/15 apresentou o maior GDA (2710,55 °C dia) e maior produtividade (81,9 t ha⁻¹), conforme ilustrado na Figura 3.

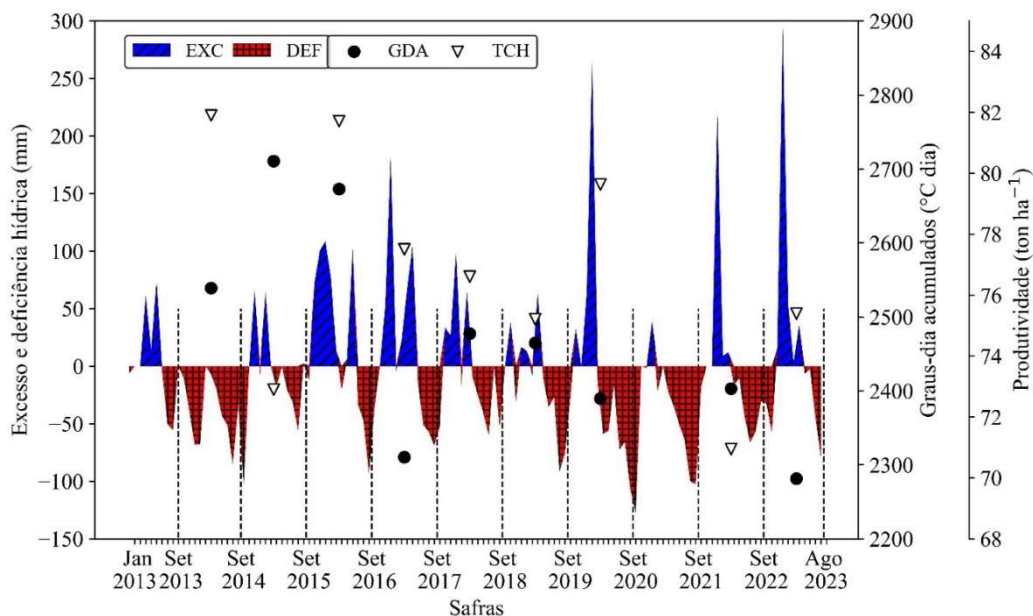


Figura 3. Balanço hídrico, acúmulo de temperatura e produtividade agrícola da cana-de-açúcar do Sudeste brasileiro de 2013 a 2023.

A maior correlação positiva foi de 0,69 entre o excesso acumulado (AEXC) e máximo excesso (BEXC) e a menor foi de 0,08 déficit acumulado (ADEF) e TCH, já

para a correlação negativa, a máxima foi de -0,71 entre GDA e BEXC e mínimo de -0,03 entre BEXC e máxima deficiência (BDEF), conforme apresentado na Figura 4. As correlações negativas entre GDA e EXC, GDA e DEF, e EXC e DEF podem ser explicadas pela dinâmica da evapotranspiração e da precipitação. Em condições de altas temperaturas (GDA), a evapotranspiração é maior, o que pode levar a um aumento do déficit hídrico (DEF) e a uma redução do excesso hídrico (EXC), especialmente em períodos com baixa precipitação.

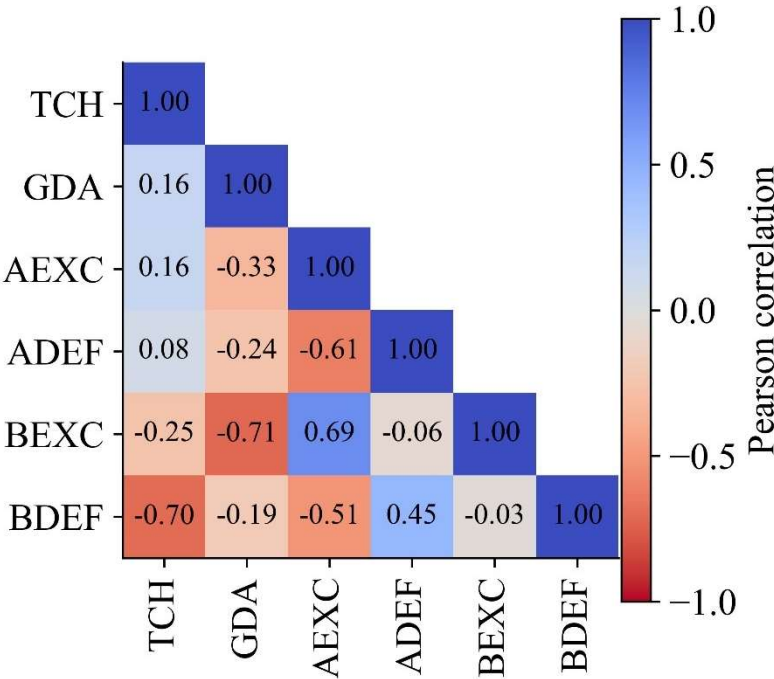


Figura 4. Matriz de correlação.

A correlação positiva fraca e não significativa entre produtividade e GDA contrasta com os resultados de Raza et al. (2019), que destacam o impacto significativo da temperatura no rendimento da cana-de-açúcar. No entanto, é importante ressaltar que a correlação de Pearson mede apenas relações lineares, e a relação entre GDA e produtividade pode ser mais complexa e não linear. Além disso, o estudo de Marin et al. (2019) indica que os impactos das mudanças climáticas na produção de cana-de-açúcar no Brasil podem variar dependendo do cenário de aquecimento global e da região considerada, o que pode explicar a falta de significância na correlação observada na análise.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram as descobertas de Singh et al. (2018) que destacaram a influência multifatorial na produtividade da cana-de-açúcar.

A relação positiva entre os GDA e a produtividade observada em nossa pesquisa, especialmente na safra 2014/15, confirma a importância do acúmulo térmico no desenvolvimento da cultura, como demonstrado por Singh et al. (2018) em diferentes ambientes de cultivo. No entanto, a ausência de uma relação direta entre GDA e produtividade na safra 2022/23, que apresentou o menor GDA mas não a menor produtividade, ressalta a influência de outros fatores cruciais, como a disponibilidade hídrica e o manejo da cultura, como evidenciado por Raza et al. (2019) em seus modelos preditivos. Nossos resultados reforçam a necessidade de considerar a interação complexa entre GDA, disponibilidade hídrica e práticas de manejo para uma compreensão abrangente dos determinantes da produtividade da cana-de-açúcar.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo evidencia a complexa interação entre as variáveis climáticas e a produtividade da cana-de-açúcar no Sudeste brasileiro. A análise do balanço hídrico demonstra a importância do manejo adequado da água, especialmente em períodos de déficit hídrico. A ocorrência de déficits hídricos em momentos críticos do desenvolvimento da cultura, como na fase de brotação e emergência em setembro de 2019, ressalta a necessidade de estratégias de irrigação suplementar para mitigar os efeitos da seca.

Dessa forma, podemos concluir que a necessidade de desenvolver estratégias de manejo mais resilientes às variações climáticas, como o uso de cultivares mais tolerantes ao déficit hídrico e ao calor, adoção de práticas de conservação do solo e água, e aprimoramento dos sistemas de irrigação. Adicionalmente, o monitoramento contínuo das condições climáticas e a utilização de modelos de previsão podem contribuir nas tomadas de decisões mais assertivas, visando otimizar a produtividade e garantir a sustentabilidade da cultura para a região mais estratégica do setor sucroenergético brasileiro.

REFERÊNCIAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Alvares, C.A., Sentelhas, P.C., & Dias, H.B. 2022. Southeastern Brazil inland tropicalization: Köppen system applied for detecting climate change throughout 100 years

- of meteorological observed data. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(3), 1431-1450.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). 2024. *Acompanhamento de safra brasileira de cana-de-açúcar: Safras 2013/14 a 2022/23*. Brasília: CONAB.
- Inman-Bamber, N.G. 1995. Climate and water as constraints to production in the South African Sugar Industry. Proceedings of The Annual Congress of The South African Sugar Technologists Association, 69, 55-59.
- Lyra, G.B., Souza, J.L., & Santos, M.A. 2010. Balanço sequencial de água no solo para o manejo da irrigação de baixa frequência e alta intensidade na cana-de-açúcar. *STAB*, 28, 22-25.
- Marin, F.R., Jones, J.W., Singels, A., Royce, F.S., Assad, E.D., Pellegrino, G.Q., ... & Thorburn, P. J. 2019. The potential impact of climate change on sugarcane production in Brazil. *Global Change Biology Bioenergy*, 11(1), 18-33. doi: [10.1111/gcbb.12546](https://doi.org/10.1111/gcbb.12546)
- Pereira, A.R., Angelocci, L.R., & Sentelhas, P.C. 2002. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária.
- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S.S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. 2019. Impact of climate change on sugarcane yield: A review. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(5), 1014-1027. doi: [10.1016/S2095-3119\(18\)62234-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62234-6)
- Santos, L.D.C. 2016. *Produção de biomassa e eficiência no uso da água para oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento em dois ciclos de cultivo* [Tese de doutorado, Universidade de São Paulo].
- Sinclair, T.R., Gilbert, R.A., Perdomo, R.E., Shine Júnior, J.M., Powell, G., & Montes, G. 2004. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. *Field Crops Research*, 88, 171-178.
- Singh, R.K., Singh, P., Singh, S.P. et al. 2019. Impact of climate change on sugarcane yield: A review. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(5), 1014–1027. [[10.1016/S2095-3119\(18\)62234-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62234-6)]
- Smit, M.A., & Singels, A. 2006. The response of sugarcane canopy development to water stress. *Field Crops Research*, 98, 91-97.
- Thornthwaite, C.W., & Mather, J.R. 1955. *The water balance*. Publications in Climatology. Drexel Institute of Technology.
- Vieira, G.H.S., Mantovani, E.C., Sediyaama, G.C., & Delazari, F.T. 2014. Produtividade e rendimento industrial da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação. *Bioscience Journal*, 30(1), 55-64.