Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE PROBABILIDADE CLIMÁTICA EM ALAGOAS

Sugarcane Productivity as a Function of Climatic Probability in Alagoas

Productividad de la Caña de Azúcar en Función de la Probabilidad Climática en Alagoas

Maria Fernanda da Silva Santos
Programa de Pós-graduação em Agronomia
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
Rio Largo, Alagoas, Brasil
mf31fernada@gmail.com

Francisco Bento da Silva Junior
Programa de Pós-graduação em Agronomia
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
Rio Largo, Alagoas, Brasil
franciscobento787@gmail.com

Jessica Mota Pimenta
Programa de Pós-graduação em Agronomia
Universidade Federal de Alagoas
Rio Largo, Alagoas, Brasil
jessica.mpimenta@gmail.com

José Wanderson Silva dos Santos
Programa de Pós-graduação em Agronomia
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
Rio Largo, Alagoas, Brasil
jose.wanderson@ceca.ufal.br

Ivomberg Dourado Magalhães
Universidade Federal de Alagoas
Rio Largo, Alagoas, Brasil
ivomberg31@hotmail.com

Ricardo Araújo Ferreira Júnior
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
Rio Largo, Alagoas, Brasil
ricardo.junior@ceca.ufal.br

Gustavo Bastos Lyra
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil
gblyra@ufrrj.br

Guilherme Bastos Lyra
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
Rio Largo, Alagoas, Brasil
gbastoslyra@gmail.com

Resumo: A evapotranspiração da cana-de-açúcar é penalizada devido à sazonalidade das chuvas, visto que, para serem alcançados rendimentos produtivos com retorno econômico, a cultura da cana necessita, em média de 1.500 a 2.500 mm de água, distribuídos de forma uniforme durante o ano. Nesse sentido, objetivou-se analisar a relação entre o déficit hídrico e a produtividade da cana de açúcar, comparando-a com condições de irrigação. Por meio de séries climáticas de longo tempo (1988-2023), foi determinada a distribuição prevista dos elementos climáticos de precipitação e evapotranspiração de referência para os percentis de 10, 25, 50, 75, 80, 90 e 95% de probabilidade de ocorrência desses eventos. O balanço hídrico mensal foi calculado considerando 12 cenários de plantio e colheita de cana planta aliado a seis cenários de irrigação para as safras de 2016 a 2023. Com base nesses dados foram estimadas as perdas de produtividade. Os plantios realizados em março com corte em fevereiro, apresentaram os maiores déficits hídricos médios no cultivo de verão, enquanto as menores perdas ocorreram entre dezembro e novembro, com exceção do manejo por gotejamento (4,5 mm). No cultivo de inverno, os plantios realizados em maio, com corte em abril, destacaram-se por apresentarem as maiores perdas de produtividade média, enquanto as menores perdas foram registradas no plantio realizado em setembro, com corte em novembro.

Palavras-chave: Balanço hídrico; Condições climáticas; Cenários de irrigação.

Abstract: Sugarcane evapotranspiration is constrained by the seasonality of rainfall, since achieving economically viable yields requires an average water supply between 1,500 and 2,500 mm, uniformly distributed throughout the year. Therefore, this study aimed to analyze the relationship between water deficit and sugarcane yield, comparing it under rainfed and irrigated conditions. Using long-term climatic records (1988–2023), the expected distribution of the climatic variables—precipitation and reference evapotranspiration—was determined for the 10th, 25th, 50th, 75th, 80th, 90th, and 95th percentiles of probability of occurrence. The monthly water balance was computed considering 12 planting and harvesting schedules for plant cane, combined with six irrigation scenarios, for the 2016–2023 growing seasons. Based on these data, yield reductions were estimated. Plantings established in March and harvested in February exhibited the highest average water deficits during the summer season, whereas the lowest yield losses were observed between December and November, except under drip irrigation management (4.5 mm). For the winter crop, plantings initiated in May and harvested in April showed the greatest average yield reductions, while the lowest losses were recorded for the planting conducted in September with harvest in November.

Keywords: Water balance; Climatic conditions; Irrigation scenarios.

Resumen: La evapotranspiración de la caña de azúcar se ve limitada debido a la estacionalidad de las precipitaciones, ya que, para alcanzar rendimientos económicamente viables, el cultivo requiere en promedio entre 1.500 y 2.500 mm de agua, distribuidos de manera uniforme a lo largo del año. En este contexto, el objetivo fue analizar la relación entre el déficit hídrico y el rendimiento de la caña de azúcar, comparándolo bajo condiciones de secano y de riego. A partir de series climáticas de largo plazo (1988–2023), se determinó la distribución esperada de las variables climáticas —precipitación y evapotranspiración de referencia— para los percentiles de probabilidad de ocurrencia del 10, 25, 50, 75, 80, 90 y 95%. El balance hídrico mensual se calculó considerando 12 fechas de siembra y cosecha de caña planta, combinadas con seis escenarios de riego, para las campañas agrícolas de 2016 a 2023. Con base en estos datos, se estimaron las reducciones de rendimiento. Las siembras establecidas en marzo con cosecha en febrero presentaron los mayores déficits hídricos promedio durante el ciclo de verano, mientras que las menores pérdidas ocurrieron entre diciembre y noviembre, con excepción del manejo por goteo (4,5 mm). En el ciclo de invierno, las siembras realizadas en mayo con cosecha en abril se destacaron por presentar las mayores reducciones promedio de rendimiento, mientras que las menores pérdidas se registraron en la siembra de septiembre con cosecha en noviembre.

Palabras clave: Balance hídrico; Condiciones climáticas; Escenarios de riego.

Submetido em: 12/09/2025
Aceito para publicação em: 17/07/2026
Publicado em: 10/11/2026

1. INTRODUÇÃO

O balanço hídrico específico para uma determinada cultura tem como objetivo contabilizar o armazenamento de água no solo, considerando a condição da vegetação, sua fase de crescimento e desenvolvimento (PEREIRA et al., 2007). Assim, estudar os processos que envolvem o uso da água é de suma importância, visto que no Brasil várias regiões passam por problemas de escassez hídrica (LUZ, 2022).

Para assegurar a produtividade da cultura, independente dos eventos climáticos, e garantir o retorno econômico esperado pelo produtor, é indispensável o fornecimento de água, visto que, a depender da fase fenológica, o estresse hídrico pode impactar na produtividade agrícola (RAMESH, 2000; PIMENTEL, 2004; INMAN-BAMBER & SMITH, 2005). Os sistemas de irrigação fazem parte de um conjunto de técnicas que garantem a segurança na produção economicamente rentável de determinada cultura, além de garantir um manejo adequado dos recursos naturais disponíveis (BERNARDO et al., 2006). Nesse sentido, a reposição hídrica é indispensável quando as condições meteorológicas são desfavoráveis (BALANSIN et al., 2024).

As lavouras de cana-de-açúcar exigem condições climáticas favoráveis. Estudos de Doorembos & Kassam (1994) relatam que, para alcançar rendimentos produtivos com retorno econômico, a cultura da cana-de-açúcar necessita, em média, de 1.500 a 2.500 mm de água, distribuídos de forma uniforme durante o ano. O período de crescimento vegetativo da cana-de-açúcar possui uma exigência hídrica maior para propiciar bom desenvolvimento; porém, antes da colheita, é exigido um período com certa restrição de atendimento hídrico para favorecer o enriquecimento em sacarose, precedendo a colheita (RODRIGUES, 2018).

Para essa cultura, o estudo climatológico das condições hídricas possui significativa relevância, pois seu cultivo se dá predominantemente sem irrigação complementar, estabelecendo uma dependência do regime pluviométrico e, assim, torna-se indispensável conhecer o balanço hídrico para as regiões de cultivo (ALFONSI et al., 1987). No caso da região Nordeste, a precipitação se concentra de maio a julho, o que leva o crescimento vegetativo da cana-de-açúcar a ser afetado pelo déficit hídrico, à medida que a maturação pode ser também prejudicada pelo excesso de chuvas (RODRIGUES, 2018).

Estudos realizados por Gomes (2014) em Petrolina-PE e Teresina-PI demonstram que as produtividades dos colmos da cana-de-açúcar submetidos à reposição hídrica foram sempre superiores em comparação ao cultivo no regime de sequeiro. Nesse sentido, a reposição hídrica sem desperdício pode aumentar a produtividade; no entanto, ainda existem lacunas para as especificidades de cada região, necessitando a validação de modelos preditivos para as condições locais.

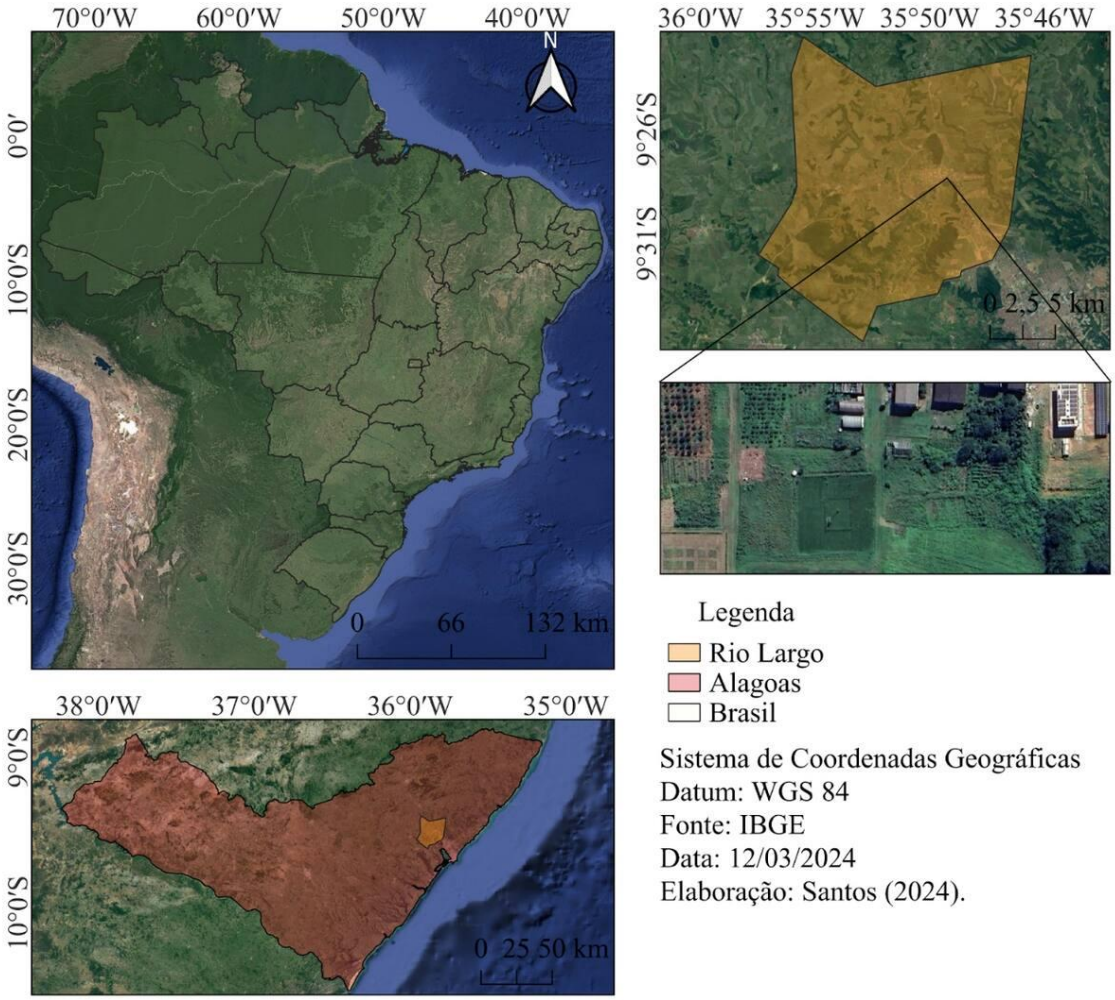
No estado de Alagoas, a produção de açúcar e álcool contribui com aproximadamente 60% da receita proveniente do ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) (RODRIGUES, et al., 2018). A previsão climática, especialmente o regime pluviométrico, para a região produtora de cana-de-açúcar, desde o início da safra 2023/2024, combinada à melhora do mercado de açúcar e etanol, acrescida dos investimentos nas lavouras e da variação positiva do câmbio para exportação, vem gerando expectativas otimistas para os números de produção que serão alcançados no setor, de acordo com os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023).Nessa perspectiva, o objetivo deste trabalho foi analisar a redução da produtividade da cultura da cana-de-açúcar em função de probabilidade climática e da disponibilidade hídrica, considerando diferentes cenários de plantio, colheita e simulações de irrigação.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

Os dados meteorológicos foram obtidos na Estação Agrometeorológica Automática do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), em Rio Largo – AL, com as seguintes coordenadas geográficas 09°28’29,1” S e 35°49’43,6” O, 127 m de altitude. Este fato confere uma alta qualidade e integridade aos dados, uma vez que a manutenção é executada sob rigorosos padrões acadêmicos e técnicos. O clima da região, segundo a classificação de Thornthwaite e Mather (1955) é quente e úmido (B1), megatérmico (A’), com deficiência de água moderada no verão e (s) e grande excesso de água no inverno (w2). Nas falhas de dados, o método empregado consistiu no preenchimento de cada dado faltante pela média histórica do valor observado para o mesmo período nos anos anteriores.

Figura 1 - Localização da área experimental em Rio Largo, Alagoas**.**



Fonte: Autora, 2025.

2.2. Cenários estudados

Foram propostos seis manejos de irrigação para o cultivo da cana-de-açúcar (sequeiro, sistema de deslocamento linear com lâmina de 45 mm e turno de rega a cada 15 dias, e gotejamento com lâminas de 2, 3, 4 e 4,5 mm com turno de rega diário), combinados com doze ciclos de cultivo, conforme tabela 1, gerando 72 cenários produtivos analisados durante as safras de 2016 a 2023.

Tabela 1 - Períodos de manejo da cana-de-açúcar.

Cenário	Manejo de Irrigação	Plantio - Corte	Condição de Plantio	Meses
1	Sequeiro	Outubro - Outubro	Verão	13
2	Sequeiro	Novembro - Novembro		13
3	Sequeiro	Dezembro - Novembro		12
4	Sequeiro	Janeiro - Dezembro		12
5	Sequeiro	Fevereiro - Janeiro		12
6	Sequeiro	Março - Fevereiro		12
7	Sequeiro	Abril - Março	Contorno	12
8	Sequeiro	Maio - Abril		12
9	Sequeiro	Agosto - Novembro		16
10	Sequeiro	Setembro - Novembro		15
11	Sequeiro	Junho - Dezembro	Inverno	18
12	Sequeiro	Julho - Novembro		17
13	Linear	Outubro - Outubro	Verão	13
14	Linear	Novembro - Novembro		13
15	Linear	Dezembro - Novembro		12
16	Linear	Janeiro - Dezembro		12
17	Linear	Fevereiro - Janeiro		12
18	Linear	Março - Fevereiro		12
19	Linear	Abril - Março	Contorno	12
20	Linear	Maio - Abril		12
21	Linear	Agosto - Novembro		16
22	Linear	Setembro - Novembro		15
23	Linear	Junho - Dezembro	Inverno	18
24	Linear	Julho - Novembro		17
25	G2	Outubro - Outubro	Verão	13
26	G2	Novembro - Novembro		13
27	G2	Dezembro - Novembro		12
28	G2	Janeiro - Dezembro		12
29	G2	Fevereiro - Janeiro		12
30	G2	Março - Fevereiro		12

Continuação...

Cenário	Manejo de Irrigação	Plantio - Corte	Condição de Plantio	Meses
31	G2	Abril - Março	Contorno	12
32	G2	Maio - Abril		12
33	G2	Agosto - Novembro		16
34	G2	Setembro - Novembro		15
35	G2	Junho - Dezembro	Inverno	18
36	G2	Julho - Novembro		17
37	G3	Outubro - Outubro	Verão	13
38	G3	Novembro - Novembro		13
39	G3	Dezembro - Novembro		12
40	G3	Janeiro - Dezembro		12
41	G3	Fevereiro - Janeiro		12
42	G3	Março - Fevereiro		12
43	G3	Abril - Março	Contorno	12
44	G3	Maio - Abril		12
45	G3	Agosto - Novembro		16
46	G3	Setembro - Novembro		15
47	G3	Junho - Dezembro	Inverno	18
48	G3	Julho - Novembro		17
49	G4	Outubro - Outubro	Verão	13
50	G4	Novembro - Novembro		13
51	G4	Dezembro - Novembro		12
52	G4	Janeiro - Dezembro		12
53	G4	Fevereiro - Janeiro		12
54	G4	Março - Fevereiro		12
55	G4	Abril - Março	Contorno	12
56	G4	Maio - Abril		12
57	G4	Agosto - Novembro		16
58	G4	Setembro - Novembro		15
59	G4	Junho - Dezembro	Inverno	18
60	G4	Julho - Novembro		17

Continuação....

Cenário	Manejo de Irrigação	Plantio - Corte	Condição de Plantio	Meses
61	G4,5	Outubro - Outubro	Verão	13
62	G4,5	Novembro - Novembro		13
63	G4,5	Dezembro - Novembro		12
64	G4,5	Janeiro - Dezembro		12
65	G4,5	Fevereiro - Janeiro		12
66	G4,5	Março - Fevereiro		12
67	G4,5	Abril - Março	Contorno	12
68	G4,5	Maio - Abril		12
69	G4,5	Agosto - Novembro		16
70	G4,5	Setembro - Novembro		15

Nota: G – Sistema de irrigação por gotejamento. **Fonte:** Autora, 2025.

2.3. Cálculos das probabilidades

O percentil (α P) corresponde ao valor da variável meteorológica contínua (X), associado à porcentagem da área sob a curva da função de distribuição (F) (LYRA et al., 2020). A probabilidade de 25% é comumente utilizada para dimensionar projetos de irrigação, e 50% representam um evento com ocorrência a cada dois anos. Com base nos dados meteorológicos dos últimos 35 anos, foi determinada a distribuição esperada de evapotranspiração de referência, para os percentis de 10, 25, 50, 75, 80, 90 e 95%, de acordo com a equação 1, buscando representar a variabilidade climática local ao longo dos anos, permitindo identificar condições de baixa, média e alta demanda evaporativa:

$$Prob = (X \leq \alpha P) = F(\alpha P) \quad (1)$$

ondr, αP são os valores previstos de determinado elemento climático e p (%) representa a probabilidade.

2.4. Classificação dos anos secos e úmidos

Os dados anuais de precipitação total (mm) foram utilizados para classificar os anos de 2016 a 2023, de acordo com a metodologia proposta por Nery et al. (2002), em que:

- Ano muito seco: precipitação < $\mu - 1{,}5 \times \sigma$;
- Ano seco: $\mu - 1{,}5 \times \sigma \leq$ precipitação < $\mu - 0{,}5 \times \sigma$;

- Ano normal: μ - 0,5 *x* σ ≤ precipitação ≤ μ + 0,5 *x* σ;
- Ano úmido: μ + 0,5 *x* σ < precipitação ≤ μ + 1,5 *x* σ;
- Ano muito úmido: precipitação > μ + 1,5 *x* σ.

em que: μ corresponde à média e σ ao desvio padrão.

2.5. Balanço hídrico diário

A precipitação foi medida por um pluviômetro automático (TB3, Hydrological Services PTY. LTD., Sydney, Austrália), instalado a 1,5 m acima da superfície do solo. A temperatura e a umidade relativa do ar foram mensuradas por meio de um termohigrômetro automático (HMP45C, Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA), instalado a 2,0 m acima da superfície do solo. A irradiância solar global (Rg, W m^{-2}) foi obtida por um piranômetro (Eppley, modelo 848, B&W), com faixa espectral de 305 a 2.800 nm. A velocidade do vento, a 2 m de altura, foi obtida por anemômetro automático. Todos os sensores estavam interligados a um sistema de aquisição de dados, que realizava medições a cada 10 segundos e armazenava médias a cada 10 minutos (Micrologger – 21 CR1.000, Campbell Scientific, Logan, Utah).

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi estimada pelo método de Penman-Monteith (equação 1), parametrizado pela FAO (ALLEN et al., 1998). Tal método é amplamente empregado em estudos agrometeorológicos e, para a sua aplicação, são requeridos dados de temperatura do ar (T), velocidade do vento a 2 m de altura (U_2), umidade relativa do ar (UR) e do saldo de radiação (Rn). Contudo, essas informações nem sempre estão disponíveis, sendo necessária a estimativa de uma ou mais variáveis, conforme metodologias sugeridas por Allen et al. (1998) (Equação 2).

$$ET_0 = \frac{0{,}408\,\Delta\,(R_n - G) + \left(\Upsilon \frac{900}{T+273}\right) U_2 (e_S - e_a)}{\Delta + \Upsilon\,(1 + 0{,}34\,U_2)} \qquad (2)$$

Onde: Δ é a declividade da curva de pressão de vapor (kPa°C^{-1}); Rn é o saldo de radiação (MJ $m^{-2}dia^{-1}$); G é o fluxo calor no solo (MJ $m^{-2}dia^{-1}$); γ é a constante psicrométrica (kPa°C^{-1}); U_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa); e_a é a pressão de vapor atual (kPa); T é a temperatura do ar média (°C). Os valores diários de Rn foram obtidos a partir de sua relação com a irradiação solar global diária (Rg) medida na

estação, considerando que Rn corresponde a 57,2% de Rg. O valor de G foi considerado igual a (zero) na escala diária (FERREIRA JÚNIOR, 2013).

A evapotranspiração da cultura (ET_C) foi determinada por meio do produto da ET_0 pelo coeficiente da cultura K_c, calculado pelo método do coeficiente de cultura "dual" (K_C = Kcb+Ke), conforme detalhado no Boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998), o qual propõe a divisão do ciclo da cultura em quatro fases fenológicas: inicial, desenvolvimento, intermediária e final. Com o intuito de automatizar o processo, foi elaborado um *script* em linguagem Python para aplicar a interpolação linear entre os valores de K_c correspondentes às fases da cultura.

Para os cálculos do balanço hídrico, foram considerados os seguintes valores e unidades de medida: capacidade de campo (CC) de 35% (base volumétrica), ponto de murcha permanente (PM) de 27% (base volumétrica), densidade do solo (Ds) de 1,25 g cm^{-3}, profundidade efetiva do sistema radicular (Z) de 0,60 m e fator de disponibilidade de água no solo (f), conforme Bernardo, Soares e Mantovani (2006). Para fruteiras e forrageiras, o valor de f recomendado é 0,5. Desse modo, considerando que a cana-de-açúcar também é uma gramínea, assim como as forrageiras, adotou-se esse fator.

Com base nas informações obtidas por meio do balanço hídrico, e utilizando o modelo descrito por Doorenbos e Kassam (1979), com a adoção do valor de 0,66 como fator de resposta à água (Ky), a produtividade foi estimada por meio da equação 3:

$$\left(1 - \frac{\mathrm{Yr}}{\mathrm{Ym}}\right) = \mathrm{Ky}\left(1 - \frac{\mathrm{Etr}}{\mathrm{Etm}}\right) \qquad (3)$$

onde: Yr é a produtividade real colhida (t ha^{-1}); Ym é a produtividade máxima colhida (t ha^{-1}); Ky é o coeficiente de resposta à água; Etr é a evapotranspiração real (mm); e ETm é a evapotranspiração máxima (mm).

A partir dos déficits hídricos obtidos pelo balanço hídrico, foram determinadas as perdas no rendimento produtivo relativas a cada condição de manejo. O cálculo das perdas de produtividade foi realizado por meio da comparação com as produtividades do cultivo em sequeiro. Desse modo, foi possível estimar a redução no rendimento da cultura em função da disponibilidade de água, considerando os diferentes períodos de cultivo.

3. Resultados e Discussão

3.1. Probabilidade climática dos eventos de precipitação

A análise da probabilidade climática dos eventos de precipitação mensais e anuais durante o período de estudo revelou os padrões pluviométricos, nos quais os percentis indicam desde eventos mais raros e extremos (probabilidade de 10% de ocorrência) até os mais prováveis (50% de probabilidade), constituindo-se como uma ferramenta importante no planejamento agrícola. As tabelas que utilizam uma escala de cores representam os diferentes níveis de disponibilidade hídrica: os tons em vermelho indicam situação de escassez, enquanto os tons mais claros e em branco representam uma transição, e os tons em azul refletem valores sem déficit.

O cenário de 50% de probabilidade, que possui um tempo de retorno a cada dois anos, caracteriza-se como o cenário mais provável, no qual se observou maior concentração de chuvas nos períodos de maio a agosto. O mês de julho pode ser considerado o pico da estação chuvosa, em um evento raro e seco (10%), pode ocorrer 208,60 mm de chuva, enquanto em um evento raro e úmido, a ocorrência pode ser de 662,90 mm de precipitação. Os meses de novembro e dezembro são os que apresentam menores valores de precipitação, sendo então considerados os meses menos úmidos do ano, o que corrobora com o estudo de Carvalho et al. (2013), no qual afirmam que os meses de setembro a março foram caracterizados com a estação seca.

A precipitação anual acumulada variou de 1.619,90 mm (10% de probabilidade) a 2.822,10 mm (95% de probabilidade), com uma média provável de 2.020,30 mm (50% de probabilidade). Conforme a classificação de Thornthwaite e Mather (1955), o clima é quente e úmido (B1), megatérmico (A’), com deficiência de água moderada no verão (s) e grande excesso de água no inverno (w2). Desse modo, a variação da precipitação indicou que, para garantir o crescimento das culturas, são necessárias estratégias de reposição hídrica, considerando que a evapotranspiração da cultura acumulada durante todo o ciclo de cultivo em condições adequadas de água no solo é de aproximadamente 1.950,00 mm, distribuídos ao longo do ciclo da cultura (LYRA et al., 2007).

3.2. Probabilidade climática dos eventos de evapotranspiração

O estudo da probabilidade climática dos eventos de evapotranspiração mensais e anuais em milímetros sob diferentes probabilidades de ocorrência indicaram que, durante o período analisado (35 anos), há uma variabilidade desse processo em função das condições climáticas e ambientais da região, permitindo inferir tendências e embasar a tomada de decisão do uso eficiente de água.

Ao ser considerada a probabilidade de 10%, que representa um evento raro de alta evapotranspiração de 1.356,60 mm anual e pode ocorrer em anos atípicos de estiagem severa, com temperaturas elevadas e baixa umidade, os sistemas de irrigação devem ser dimensionados para atender a necessidade hídrica da cultura. Assim, a probabilidade de 50%, que representa a média da distribuição dos eventos de evapotranspiração, pode ser considerada como um indicativo de condição típica da região dos Tabuleiros Costeiros, sendo um parâmetro que pode auxiliar na determinação de lâminas de irrigação.

3.3. Classificação dos anos em função da probabilidade

A probabilidade de eventos de 90% indica eventos de chuvas excepcionais que causam inundações a cada 10 anos, como os eventos observados nos anos 2000 e 2010. No ano 2000, o posto fluviométrico localizado na Fazenda Boa Fortuna em Rio Largo, Alagoas, registrou uma enchente que atingiu a cota de 10,50 mm e uma vazão estimada em 1.092,00 $m^3 s^{-1}$ (REIS; SILVA JÚNIOR; PEDROSA, 2000). De maneira semelhante, entre os dias 17 e 19 de junho de 2010, ocorreram cheias nas bacias do rio Mundaú, que perpassa a cidade de Rio Largo (OLIVEIRA; SOUZA; FRAGOSO JÚNIOR, 2014). Nesse sentido, a partir da análise das probabilidades de precipitação, foi possível identificar os padrões climáticos e suas possíveis implicações no manejo dos anos estudados (tabela 2).

Tabela 2 - Classificação dos anos-safras por probabilidade climática de precipitação.

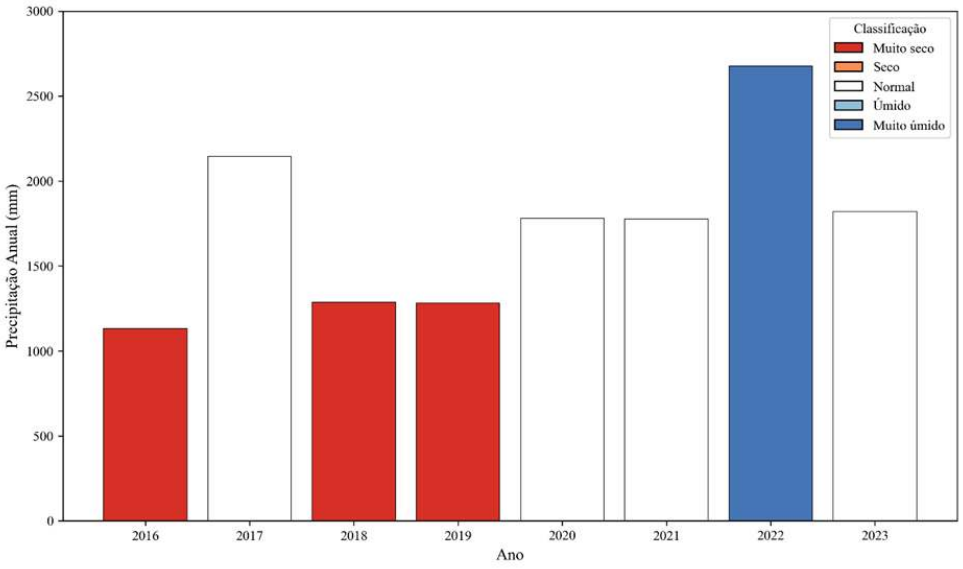
Ano	Precipitação (mm)	Probabilidade (%)
2016	1.130,05	10
2017	2.144,27	75
2018	1.286,02	10
2019	1.280,92	10
2020	1.780,32	50
2021	1.776,79	50
2022	2.677,18	95
2023	1.820,92	50

Fonte: Autora, 2024.

3.4. Classificação dos anos secos e úmidos

A figura 2 evidencia a classificação dos anos de 2016 a 2023 com base na precipitação, de acordo com a metodologia descrita por Nery et al., (2002). Os anos de 2016, 2018 e 2019 foram classificados como muitos secos, por apresentarem precipitações inferiores a 1.300,00 mm. Os anos de 2017, 2020, 2021 e 2023 foram classificados como normais, com totais pluviométricos situados na faixa de 1.700,00 a 1.850,00 mm. O ano de 2022 foi classificado como muito úmido, registrando precipitação acima de 2.600,00 mm.

Figura 1 - Classificação dos anos por volume de precipitação



Fonte: Autora, 2024

3.5. Perda de produtividade por déficit hídrico

A análise dos impactos causados pela restrição hídrica na cultura da cana-de-açúcar permite identificar os momentos mais sensíveis à disponibilidade de água. No sistema de sequeiro, nos manejos realizados durante o verão, o período de março a fevereiro da safra 2016/2017 (tabela 3) apresentou a maior perda de produtividade, chegando a 83,99%. Observou-se também que, na mesma condição de manejo (sequeiro), nos plantios realizados durante o inverno e condições de contorno, especialmente no plantio de maio e corte em abril e no plantio em abril com corte em março, as perdas foram elevadas, o que inviabiliza o cultivo.

Tabela 3 - Perda de produtividade (%) por déficit hídrico em diferentes manejos (verão, inverno e condições de contorno) na safra 2016/2017.

Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - verão								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Outubro	Outubro	13	45,42	8,58	14,46	7,31	2,87	1,49
Novembro	Novembro	13	40,90	6,70	9,57	4,19	1,73	1,05
Dezembro	Novembro	12	32,01	5,50	6,90	2,80	0,78	0,46
Janeiro	Dezembro	12	46,04	7,84	12,27	5,93	1,88	0,60
Fevereiro	Janeiro	12	62,12	11,14	17,61	9,27	3,84	1,95
Março	Fevereiro	12	83,99	13,82	23,22	12,34	5,62	3,20
Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - contorno e inverno								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Abril	Março	12	100	16,19	29,58	15,81	7,42	4,49
Maio	Abril	12	100	18,95	33,58	18,71	9,20	5,62
Agosto	Novembro	16	60,61	11,67	18,96	10,33	4,89	2,93
Setembro	Novembro	15	56,49	9,90	16,10	8,51	3,53	1,67
Junho	Dezembro	18	65,63	13,60	22,86	12,44	5,89	3,52
Julho	Novembro	17	63,44	13,12	21,75	12,14	5,76	3,49

Fonte: Autora, 2024.

No sistema de deslocamento linear, as perdas de produtividade devido à disponibilidade hídrica foram drasticamente reduzidas. Nos cultivos realizados durante o verão a maior perda foi de 13,82% (plantio realizado em março e corte em fevereiro). Nos sistemas de gotejo, a lâmina que distribui 2 mm diários propiciou a maior perda (23,22% no plantio realizado em março e corte em fevereiro). Na lâmina de 3 mm diários de gotejo, a maior perda foi de 12,34% (plantio realizado em março e corte em fevereiro). Nesse viés, as

lâminas de 4 e 4,5 mm de gotejo as maiores perdas de produtividade, sendo de 5,62 e 3,20% respectivamente, no plantio realizado em março e corte em fevereiro.

Nos cultivos realizados durante o inverno e em condições de contorno, o sistema linear apresentou o maior déficit de 18,95% (plantio realizado em maio e corte em abril). Nos sistemas irrigados por gotejo, as maiores perdas foram de entre 5,62% (lâmina de 4,5 mm) a 33,58% (lâmina de 2,0 mm), no cultivo em que o plantio é realizado em maio e o corte em abril.

Na safra 2017/2018 (tabela 4), os impactos causados pelo déficit hídrico indicaram uma perda de 34,83% no cultivo de sequeiro para o plantio realizado em janeiro e corte em dezembro das plantas cultivadas durante o verão. Para as plantas cultivadas durante o inverno e em condições de contorno, o maior valor de déficit foi encontrado no plantio realizado em junho e corte em dezembro, com uma perda de 44,09%. No sistema de deslocamento linear, as perdas de produtividade no verão foram de 7,52% (plantio realizado em março e corte em fevereiro) e de 10,26% (plantio realizado em maio e corte em abril) para as condições de contorno e inverno.

Tabela 4 - Perda de produtividade (%) por déficit hídrico em diferentes manejos (verão, inverno e condições de contorno) na safra 2017/2018.

Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - verão								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Outubro	Outubro	13	31,01	6,40	5,54	2,32	0,93	0,58
Novembro	Novembro	13	31,79	5,85	7,05	2,81	0,75	0,35
Dezembro	Novembro	12	30,46	5,22	7,29	2,82	0,72	0,33
Janeiro	Dezembro	12	34,83	6,35	9,40	4,01	1,03	0,38
Fevereiro	Janeiro	12	24,39	5,53	7,94	3,50	0,93	0,31
Março	Fevereiro	12	27,83	7,52	10,51	5,33	1,96	1,08
Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - contorno e inverno								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Abril	Março	12	32,87	9,07	12,66	6,80	2,80	1,71
Maio	Abril	12	36,70	10,26	13,89	7,55	3,24	2,01
Agosto	Novembro	16	42,16	7,82	10,58	4,82	1,87	1,14
Setembro	Novembro	15	38,90	7,01	8,64	3,52	1,22	0,71
Junho	Dezembro	18	44,09	8,85	12,51	5,88	2,36	1,41
Julho	Novembro	17	43,30	8,19	11,70	5,52	2,38	1,47

Fonte: Autora, 2024.

Nesse sentindo, nos plantios de verão os maiores valores de perdas variaram de 10,51 a 1,08% respectivamente, todos correspondendo ao plantio realizado em março com corte em fevereiro. Para o período de inverno e condições de contorno, os maiores valores de perda obtidos variaram de 13,89 (lâmina de 2 mm) a 2,01% (lâmina de 4,5 mm), que correspondeu ao plantio realizado em maio com corte em abril.

Na safra 2018/2019 (tabela 5), as perdas de produtividade relacionadas ao déficit hídrico indicaram que, no cultivo de sequeiro, para as plantas cultivadas durante o verão, a maior perda encontrada foi de 47,71% (plantio realizado em março e corte em fevereiro). Enquanto no cultivo de inverno e condições de contorno, o maior valor obtido foi de 65,29% (plantio realizado em maio e corte em abril). No sistema de deslocamento linear, os maiores valores obtidos foram de 9,48% durante o verão (plantio realizado em março e corte em fevereiro) e de 10,86% durante o inverno e em condições de contorno (plantio realizado em maio e corte em abril).

Tabela 51 - Perda de produtividade (%) por déficit hídrico em diferentes manejos (verão, inverno e condições de contorno) na safra 2018/2019.

Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - verão								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Outubro	Outubro	13	30,20	5,14	4,81	2,14	0,77	0,37
Novembro	Novembro	13	31,14	5,23	6,78	2,57	0,67	0,29
Dezembro	Novembro	12	31,41	4,80	6,71	2,33	0,41	0,16
Janeiro	Dezembro	12	38,02	6,70	10,42	4,30	0,95	0,17
Fevereiro	Janeiro	12	41,52	8,10	11,95	5,83	2,12	1,08
Março	Fevereiro	12	47,71	9,48	13,91	6,99	2,81	1,49
Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - contorno e inverno								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Abril	Março	12	59,42	10,39	16,11	7,97	3,23	1,72
Maio	Abril	12	65,26	10,86	17,33	8,62	3,52	1,85
Agosto	Novembro	16	45,87	6,39	8,67	3,07	0,93	0,47
Setembro	Novembro	15	24,78	5,10	6,11	2,71	0,83	0,41
Junho	Dezembro	18	54,86	7,91	13,62	5,95	1,88	0,91
Julho	Novembro	17	48,90	7,37	10,89	4,60	1,36	0,68

Fonte: Autora, 2024.

Para os cultivos irrigados por gotejo, durante o verão, os maiores valores de perdas de produtividade em razão da disponibilidade hídrica variaram de 9,48 (lâmina de 2,0 mm), e

1,49% (lâmina de 4,5 mm), respectivamente, correspondendo ao plantio realizado em março e corte em fevereiro. Para o cultivo realizado durante o inverno e em condições de contorno, os maiores valores obtidos do sistema de gotejamento variaram de 10,86 (lâmina de 2,0 mm) a 1,85% (lâmina de 4,5 mm), respectivamente, correspondendo ao plantio realizado em maio e corte em abril.

Durante a safra 2019/2020 (tabela 6), as perdas de produtividade em razão da disponibilidade hídrica indicaram que cultivos manejados sem irrigação, ou seja, em sequeiro, durante o verão, obtiveram perdas de até 56,52% para o plantio realizado em março e corte em fevereiro, e durante o inverno e em condições de contorno, de até 74,05% no plantio realizado em maio e corte em abril. Nesse sentido, no manejo irrigado por sistema de deslocamento linear, a maior perda apresentou o valor de 10,80% no plantio realizado em março e corte em fevereiro, e nas condições de contorno e inverno, de 15,64% no plantio realizado em maio e corte em abril.

Tabela 6 - Perda de produtividade (%) por déficit hídrico em diferentes manejos (verão, inverno e condições de contorno) na safra na safra 2019/2020.

Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - verão								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Outubro	Outubro	13	34,76	6,67	8,12	3,68	1,36	0,81
Novembro	Novembro	13	31,19	5,17	5,69	2,07	0,58	0,32
Dezembro	Novembro	12	23,25	4,03	4,57	1,82	0,52	0,26
Janeiro	Dezembro	12	26,40	4,52	7,09	2,61	0,63	0,21
Fevereiro	Janeiro	12	50,32	8,81	15,54	7,35	2,41	0,99
Março	Fevereiro	12	56,52	10,80	19,29	9,85	4,07	1,97
Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - contorno e inverno								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Abril	Março	12	66,47	13,32	22,93	12,35	5,61	3,12
Maio	Abril	12	74,05	15,64	25,53	14,12	6,71	3,96
Agosto	Novembro	16	47,39	8,96	14,11	7,30	2,97	1,61
Setembro	Novembro	15	43,63	7,37	11,30	5,15	1,70	0,95
Junho	Dezembro	18	55,56	10,76	17,28	9,05	3,99	2,33
Julho	Novembro	17	50,38	10,18	16,22	8,70	3,93	2,36

Fonte: Autora, 2024.

Para os cultivos irrigados por gotejo, no verão, as perdas de produtividade variaram de 10,80 (lâmina de 2,0 mm) a 1,97% (lâmina de 4,5 mm), que correspondeu ao período de

plantio realizado em março com corte em fevereiro. Durante o inverno e condições de contorno, o plantio realizado em maio com corte em abril apresentou os valores de déficit variaram de 25,53 (lâmina de 2,0 mm) a 3,96% (lâmina de 4,5 mm).

No período que compreende a safra 2020/2021 (tabela 7), as perdas de produtividade no cultivo de sequeiro durante o verão alcançaram o seu maior índice de 45,81%, correspondente ao plantio realizado em março com corte em fevereiro. Para o cultivo de sequeiro durante o inverno e condições de contorno, o maior valor de perda obtido foi de 65,84%, correspondente ao plantio realizado em maio e corte em abril. No sistema de deslocamento linear, durante o verão, o maior valor de perda apresentou o valor de 8,32% também correspondente ao período de plantio em março e corte em fevereiro. Para a o cultivo de inverno e em condições de contorno, o maior valor de perda foi de 10,68%, que correspondente ao plantio realizado em maio e corte em abril.

Tabela 7 - Perda de produtividade (%) por déficit hídrico em diferentes manejos (verão, inverno e condições de contorno) na safra 2020/2021.

Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - verão								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Outubro	Outubro	13	29,82	5,06	7,26	2,69	0,90	0,53
Novembro	Novembro	13	28,17	4,92	5,49	2,16	0,60	0,35
Dezembro	Novembro	12	23,59	3,92	4,41	1,48	0,49	0,27
Janeiro	Dezembro	12	28,31	5,05	8,12	3,32	0,91	0,38
Fevereiro	Janeiro	12	34,97	6,18	10,88	4,67	1,39	0,62
Março	Fevereiro	12	45,81	8,32	13,94	6,68	2,30	1,03
Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - contorno e inverno								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Abril	Março	12	58,26	9,81	17,27	8,41	3,21	1,42
Maio	Abril	12	65,64	10,68	20,11	9,73	3,86	1,76
Agosto	Novembro	16	43,06	6,65	11,62	4,48	1,43	0,73
Setembro	Novembro	15	39,58	6,07	9,00	3,59	0,99	0,51
Junho	Dezembro	18	47,21	8,24	14,40	6,70	2,27	1,00
Julho	Novembro	17	45,62	7,70	13,61	6,17	1,84	0,82

Fonte: Autora, 2024.

Para os cultivos irrigados por gotejo, durante o verão, os maiores valores de perdas de produtividade relacionadas à disponibilidade hídrica variaram de 13,94% (lâmina de 2,0 mm) a 1,03% (lâmina de 4,5 mm), correspondendo ao plantio realizado em março com corte em

fevereiro. Para os cultivos manejados durante o inverno e em condições de contorno, os maiores valores de perdas obtidos para os sistemas irrigados por gotejo variaram de 10,68% a 1,76%, correspondendo ao plantio realizado em maio e corte em abril.

Durante a safra 2021/2022 (tabela 8), as perdas de produtividade relacionadas à disponibilidade hídrica durante o verão, no cultivo de sequeiro, chegaram a até 36,01% (plantio em março e corte em fevereiro). Já para o cultivo de inverno e em condições de contorno, o maior índice de perda obtido no cultivo de sequeiro foi de 47,52% (plantio realizado em maio e corte em abril). No sistema de deslocamento linear o maior valor obtido de perda de produtividade durante o verão foi de 7,08%, correspondente ao período de plantio realizado em março e corte em fevereiro. Para o cultivo de inverno e em condições de contorno, o maior valor foi de 11,18% (plantio realizado em maio e corte em abril).

Tabela 82 - Perda de produtividade (%) por déficit hídrico em diferentes manejos (verão, inverno e condições de contorno) na safra 2021/2022.

Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - verão								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Outubro	Outubro	13	24,14	5,81	6,25	3,40	1,74	1,18
Novembro	Novembro	13	17,37	5,09	5,34	2,82	1,42	0,98
Dezembro	Novembro	12	13,27	3,38	3,84	1,63	0,52	0,28
Janeiro	Dezembro	12	12,19	3,43	2,99	1,06	0,22	0,05
Fevereiro	Janeiro	12	26,22	4,96	7,81	3,62	1,09	0,50
Março	Fevereiro	12	36,01	7,08	10,61	5,40	1,90	1,06
Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - contorno e inverno								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Abril	Março	12	42,61	9,30	13,02	6,91	2,71	1,59
Maio	Abril	12	47,52	11,18	15,12	8,10	3,48	2,13
Agosto	Novembro	16	30,09	7,21	9,05	4,70	2,08	1,25
Setembro	Novembro	15	26,33	6,02	7,16	3,40	1,63	1,08
Junho	Dezembro	18	31,74	8,13	10,84	5,75	2,55	1,66
Julho	Novembro	17	32,16	7,98	10,79	5,51	2,70	1,77

Fonte: Autora, 2024.

Nos cultivos irrigados por gotejo, durante o verão, os maiores valores de déficit obtidos variaram de 10,61% (lâmina de 2,0 mm) a 1,06% (lâmina de 4,5 mm), correspondendo ao período de plantio em março e corte em fevereiro. Enquanto para os cultivos de inverno e em

condições de contorno, os maiores valores variaram de 11,18% a 2,13%, correspondendo ao período de plantio realizado em maio e corte em abril.

Ao analisar as perdas de produtividade da safra 2022/2023 (tabela 9), observou-se que, durante o ciclo de verão, no cultivo de sequeiro, a maior perda obtida foi de 20,04%, correspondente ao período com plantio realizado em novembro e corte em novembro. Para o cultivo de inverno e em condições de contorno, verificou-se que a maior perda no cultivo de sequeiro foi de 29,08%, referente ao plantio realizado em maio e corte em abril. No sistema de deslocamento linear, nota-se que a maior perda durante o verão foi de 4,79%, observada no ciclo com plantio realizado em março e corte em fevereiro. Para o cultivo de inverno e condições de contorno, a maior perda foi de 5,81%, correspondente ao período com plantio realizado em maio e corte em abril.

Tabela 9 - Perda de produtividade (%) por déficit hídrico em diferentes manejos (verão, inverno e condições de contorno) na safra 2022/2023.

Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - verão								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Outubro	Outubro	13	17,89	3,99	4,46	1,72	0,48	0,27
Novembro	Novembro	13	20,04	3,92	4,07	1,48	0,32	0,16
Dezembro	Novembro	12	19,01	3,75	3,61	1,11	0,26	0,13
Janeiro	Dezembro	12	18,84	4,19	4,36	1,27	0,18	0,02
Fevereiro	Janeiro	12	15,73	4,12	3,88	1,42	0,30	0,08
Março	Fevereiro	12	18,26	4,79	4,97	1,99	0,49	0,14
Perda de produtividade (%) por déficit hídrico - contorno e inverno								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Abril	Março	12	24,97	5,24	6,70	2,83	0,81	0,32
Maio	Abril	12	29,08	5,81	8,02	3,48	1,08	0,45
Agosto	Novembro	16	24,67	5,44	5,71	2,41	0,68	0,35
Setembro	Novembro	15	24,17	4,98	5,53	2,19	0,54	0,27
Junho	Dezembro	18	27,84	4,82	6,50	2,51	0,67	0,33
Julho	Novembro	17	26,30	5,03	5,86	2,42	0,72	0,36

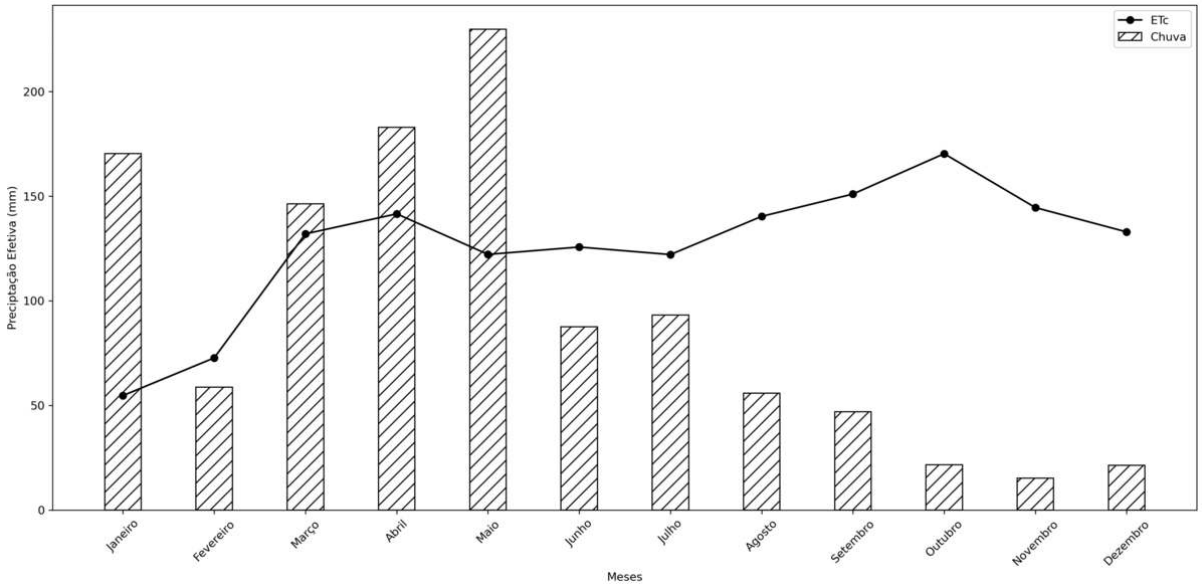
Fonte: Autora, 2024.

Nos cultivos irrigados por gotejamento, observou-se que, durante o cultivo de verão, os maiores valores de perda de produtividade variaram de 4,79% (lâmina de 2,0 mm) a 0,49% (lâmina de 4,5 mm), respectivamente, correspondendo ao plantio realizado em março e corte em fevereiro. No entanto, para a lâmina de 4,5 mm diários, o maior valor obtido foi de 0,27%,

referente ao período com plantio em outubro e corte em outubro. Nos cultivos conduzidos durante o inverno e em condições de contorno, os maiores índices de perdas variaram de 8,02% a 0,45%, correspondentes ao plantio realizado em maio e corte em abril.

Devido às características contrastantes de disponibilidade hídrica, foram selecionadas as safras 2016/2017 (ano muito seco) e 2022/2023 (ano úmido). Nesse sentido, durante a safra 2016/2017, registrou-se a ocorrência do fenômeno *El Niño*, o qual influenciou diretamente nos valores elevados de déficit hídrico e de perdas de produtividade relacionadas à demanda hídrica da cultura. Nesse período, observou-se menor precipitação e maior demanda evaporativa (figura 3), resultando em estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar (BRASIL, 2016).

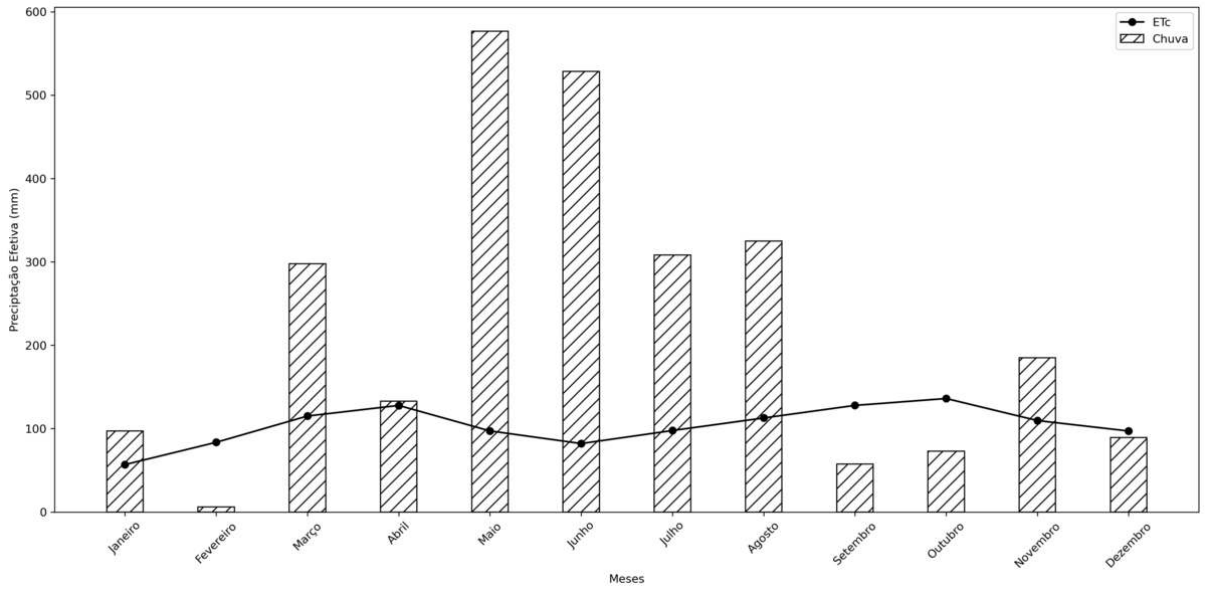
Figura 2 - Distribuição temporal da precipitação efetiva e da evapotranspiração da cultura (ET_C) na safra 2016/2017 (Tabuleiros Costeiros, Alagoas).



Fonte: Autora, 2024.

Em contrapartida, a safra 2022/2023 (figura 4) foi marcada pela incidência do fenômeno *La Ninã*, cujos efeitos resultaram em um regime hídrico mais favorável, proporcionando maior disponibilidade de água ao longo de todo o ciclo da cultura (BRASIL, 2023). Nesse viés, foram favorecidas as funções fisiológicas e ecológicas da planta, incluindo o alongamento das células meristemáticas e a sustentação dos tecidos ou órgãos por meio da turgência das células adultas (TAIZ & ZEIGER, 2017).

Figura 3 - Distribuição temporal da precipitação efetiva e da evapotranspiração da cultura (ET_C) na safra 2022/2023 (Tabuleiros Costeiros, Alagoas).

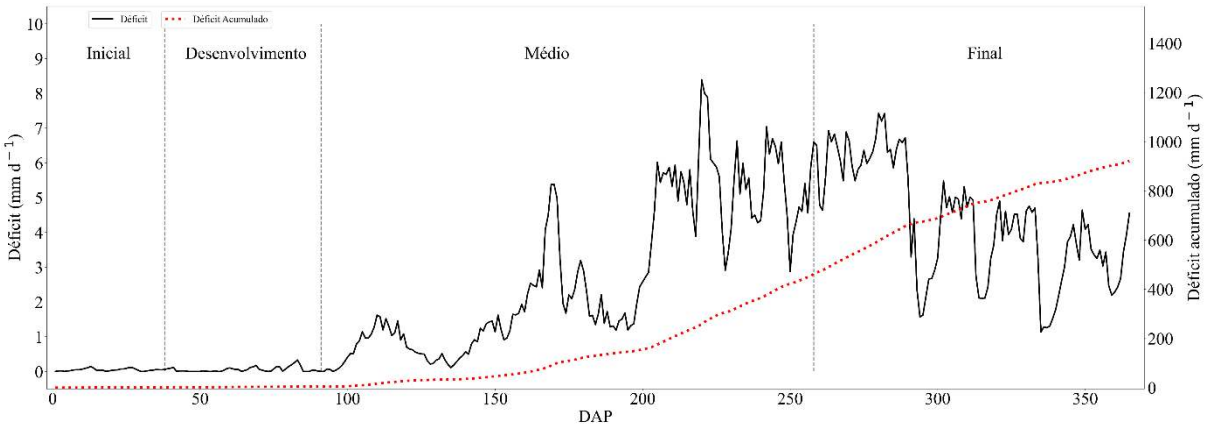


Fonte: Autora, 2024.

A variação da disponibilidade de água ao longo do ciclo da cultura é apresentada nas figuras 5 e 6, para as safras 2016/2017 e 2022/2023, respectivamente, de acordo com as fases do coeficiente da cultura (K_c). Durante a fase inicial, o valor do K_c é menor, desse modo, a demanda hídrica da cultura é reduzida quando comparada com as demais fases. No K_c de desenvolvimento e no médio, à medida que a cultura cresce, sua demanda hídrica aumenta, o que resulta em déficits quando a cultura não é suprida por precipitação ou irrigação. Na fase final, o K_c diminui, reduzindo a demanda hídrica.

A figura 4 apresenta o déficit hídrico diário e acumulado, dividido ao longo das fases do K_c, conforme o método FAO 56 para a cultura da cana-de-açúcar. Nesse sentido, observou-se que o déficit diário oscila em função da demanda hídrica e atmosférica.

Figura 4 - Déficit hídrico diário e acumulado na cultura da cana-de-açúcar na safra 2016/2017 (Tabuleiros Costeiros, Alagoas).

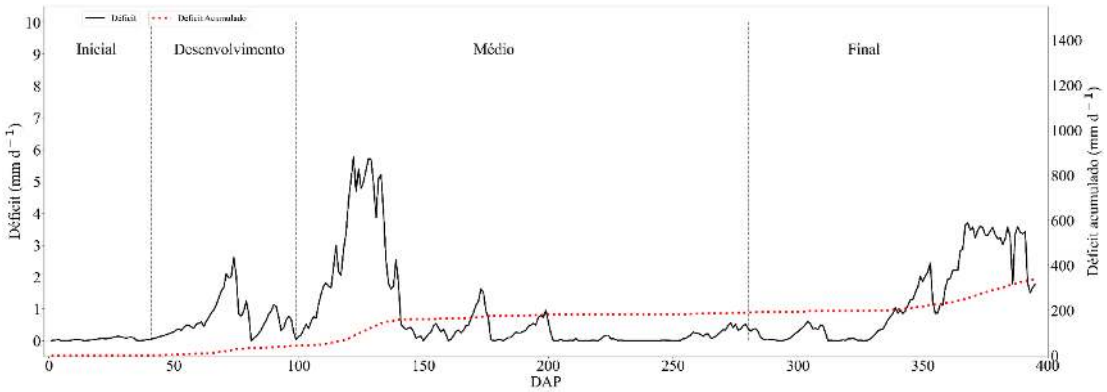


Fonte: Autora, 2024.

Na safra 2016/2017, notou-se que o período que corresponde à fase de crescimento intermediário (K_c médio) apresentou índices elevados de déficit acumulado (169,43 mm). Isso ocorreu devido ao crescimento vegetativo exigir maior demanda por água, em razão do aumento da área foliar e da taxa de transpiração. Nesse viés, quando não é realizada a reposição hídrica, a planta pode enfrentar restrições no alongamento dos colmos, o que impacta diretamente no acúmulo de biomassa e, consequentemente, na produtividade final. Nesse sentido, em seus estudos, Silva e seus colaboradores (2012) afirmam que o momento em que ocorre a reposição hídrica sujeita-se não só à fase de crescimento, como também às condições meteorológicas.

Apesar de, na fase final do coeficiente da cultura, a cultura entrar em fase de maturação e ocorrer atividade vegetativa reduzida, foram observados índices diários elevados de déficit hídrico, que podem comprometer a produtividade e qualidade final da cultura.

Figura 5 - Déficit hídrico diário e acumulado na cultura da cana-de-açúcar na safra 2022/2023 (Tabuleiros Costeiros, Alagoas).



Fonte: Autora, 2024.

Na safra 2022/2023, os níveis de déficits hídricos durante a fase inicial de desenvolvimento podem não causar impactos significativos na produtividade final da cultura. Ademais, déficits moderados nesse período podem estimular o crescimento radicular mais profundo, o que favorece a absorção de água e nutrientes. Quando o déficit ocorre no início da fase do K_c médio, déficits leves podem ser tolerados sem grandes prejuízos para o acúmulo de biomassa e potencial produtivo da cultura.

Dependendo da infraestrutura da empresa e das médias de perdas observadas, observou-se variação destas em função do período de cultivo e do sistema de manejo adotado, evidenciando a importância de um planejamento estratégico para maximizar o rendimento da cultura (tabela 10):

Tabela 30. Médias das perdas de produtividade (%) por déficit hídrico nas safras estudadas.

Média da perda de produtividade (%) por déficit hídrico - verão								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Outubro	Outubro	13	30,46	5,95	7,27	3,32	1,29	0,75
Novembro	Novembro	13	28,66	5,27	6,28	2,59	0,87	0,50
Dezembro	Novembro	12	24,71	4,37	5,33	2,00	0,53	0,27
Janeiro	Dezembro	12	29,23	5,44	7,81	3,21	0,83	0,26
Fevereiro	Janeiro	12	36,47	6,98	10,80	5,09	1,73	0,79
Março	Fevereiro	12	45,16	8,83	13,78	6,94	2,74	1,42

Média da perda de produtividade (%) por déficit hídrico - contorno e inverno								
Manejo		Meses	Sequeiro	Linear	Gotejo (mm)			
Plantio	Corte				2	3	4	4,5
Abril	Março	12	56,02	10,48	16,90	8,73	3,68	2,05
Maio	Abril	12	62,88	11,91	19,08	10,04	4,44	2,54
Agosto	Novembro	16	41,98	7,73	11,24	5,30	2,12	1,21
Setembro	Novembro	15	36,27	6,63	9,12	4,15	1,49	0,80
Junho	Dezembro	18	46,70	8,90	14,00	6,90	2,80	1,59
Julho	Novembro	17	44,30	8,51	12,97	6,44	2,67	1,56

Fonte: Autora, 2024.

Ao analisar as médias, notou-se que os plantios e cortes realizados no verão, de modo geral, apresentaram perdas menores em comparação aos cortes realizados no inverno e em condições de contorno, o que pode estar associado a melhores condições climáticas para o desenvolvimento da cultura. Dessa forma, a definição da melhor estratégia deve considerar o

calendário de plantio e corte e a capacidade operacional da empresa. Esse planejamento pode resultar em maior eficiência e aumento da rentabilidade econômica.

O estudo dos déficits hídricos médios ao longo das safras de 2016 até 2023 permitiu determinar as épocas de plantio e corte associadas às maiores e menores perdas na produtividade da cana-de-açúcar, considerando diferentes regimes de reposição hídrica. No cultivo de verão, os plantios realizados em março, com corte em fevereiro, evidenciam os maiores valores médios de déficit hídrico. Por sua vez, as menores perdas são verificadas entre dezembro e novembro, com exceção do manejo por gotejamento de 4,5 mm, em que o menor déficit foi registrado no plantio iniciado em janeiro, com corte em dezembro.

No cultivo de inverno, os plantios realizados em maio, com corte em abril, destacam-se por apresentarem as maiores perdas de produtividade média ao longo das safras analisadas. Nessa perspectiva, as menores perdas ocorrem no plantio realizado em setembro, com corte em novembro, destacando-se a importância de estratégias de manejo hídrico sobre a cultura.Embora os resultados deste estudo forneçam subsídios para o manejo hídrico, é imperativo reconhecer as limitações impostas pela restrição no acesso a dados complementares de validação devido à negativa de fornecimento de dados operacionais e de campo por parte da indústria sucroalcooleira local.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia (LIA), ao Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, e à Universidade Federal de Alagoas. Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ALFONSI, R. R.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, U. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização.** Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 42–55.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

BALANSIN, A.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; BOTTEGA, E. L. Recomendação da necessidade de supervisão para a cultura da soja utilizando intervalos de balanço hídrico observados e ferramentas de simulação. **Brazilian Journal of Development,** Curitiba, v. 6, p. 1–16, 2024. DOI: 10.34117/bjdv10n6-023.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação.** 8. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2006.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. **Fenômeno La Niña chega ao fim após três anos de duração.** Brasília, DF: INMET, 2023. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/noticias/fen%C3%B4meno-la-ni%C3%B1a-chega-ao-fimap%C3%B3s-tr%C3%AAs-anos-de-dura%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 10 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instituto Nacional de Meteorologia. **Panorama geral das condições meteorológicas e os principais eventos extremos significativos ocorridos no Brasil em 2016.** Brasília, DF: INMET, 2016. Disponível em: http://www.inmet.gov.br. Acesso em: 10 abr. 2025.

CARVALHO, A. L.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; PORFIRIO, A. C. S. Ocorrência de períodos secos na região de Rio Largo, Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia,** São Paulo, v. 28, n. 2, p. 173–180, 2013.

CARVALHO, J. F.; JESUS, C. G.; ALMEIDA, G. L. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, Ê. F. F. Utilização de diferentes métodos para determinação do balanço hídrico da cultura do repolho no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 24, n. 3, p. e003, 2020. DOI: 10.34188/bjaerv3n4-003.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar.** v. 11, safra 2023/2024, n. 3, nov. 2023.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas.** Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

GOMES, A. W. A.; SAAD, J. C. C.; BARROS, A. C. Simulação da produtividade de cana-de-açúcar (**Saccharum officinarum** L.) na região nordeste do Brasil, utilizando o modelo DSSAT. **Irriga,** Botucatu, v. 19, n. 1, p. 160–173, jan./mar. 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2014v19n1p160.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research,** v. 92, p. 185–202, 2005.

LUZ, G. G.; GALVINCIO, J. D. Balanço hídrico superficial da bacia hidrográfica do riacho Milagres-PE, utilizando o SUPer. **Revista Brasileira de Geografia Física,** v. 2, p. 1094–1107, 2022.

LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; MAIA, S. M. F. Evapotranspiração da cultura da

cana-de-açúcar na região de Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas: coeficiente da cultura “dual” padrão Boletim FAO-56. **STAB – Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil,** v. 25, n. 5, 2007.

LYRA, G. B. et al. Caracterização bioclimática de microrregiões do Estado de Alagoas para o cultivo do mamoeiro. **Agrometeoros,** v. 28, 2020.

NERY, J. T.; MARTINS, M. de L. O. F.; SANT’ANA, J. L. N. Variabilidade da precipitação no Brasil Meridional. **Acta Scientiarum,** Maringá, v. 24, n. 6, p. 1687–1695, 2002.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia agrícola.** Piracicaba: ESALQ, 2007.

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science,** v. 185, p. 83–89, 2000.

REIS, L. G. M.; SILVA JÚNIOR, O. B.; PEDROSA, V. A. Análise da cheia de agosto de 2000 no Rio Mundaú em Alagoas. In: **SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE,** 5., 2000, Natal. **Anais [...].** Porto Alegre: ABRH, 2000. p. 729–740.

SILVA, T. G. F. et al. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 1, p. 64–71, 2012.

SMITH, J. P.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 92, p. 169–183, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal.** 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.