

GEORGE DO NASCIMENTO ARAÚJO JÚNIOR

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTE DA CULTURA E ÍNDICES
AGROMETEOROLÓGICOS DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO COM PALMA
E OUTRAS PLANTAS FORRAGEIRAS EM AMBIENTE SEMIÁRIDO**

RECIFE - PE

FEVEREIRO DE 2023

GEORGE DO NASCIMENTO ARAÚJO JÚNIOR

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTE DA CULTURA E ÍNDICES
AGROMETEOROLÓGICOS DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO COM PALMA
E OUTRAS PLANTAS FORRAGEIRAS EM AMBIENTE SEMIÁRIDO**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

Orientador: Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva

Co-orientadores: Prof. Dra. Luciana Sandra Bastos de Souza e Dr. José Edson Florentino de Moraes

RECIFE – PE
FEVEREIRO DE 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Universidade Federal Rural de
Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A663e Araújo Júnior, George do Nascimento

EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTE DA CULTURA E ÍNDICES
AGROMETEOROLÓGICOS DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO COM PALMA
E OUTRAS PLANTAS FORRAGEIRAS EM AMBIENTE SEMIÁRIDO /
George do Nascimento Araújo Júnior. – Recife: O autor, 2023.
209 f.: il.

Orientador: Thieres George Freire da Silva.

Coorientadores: Luciana Sandra Bastos de Souza e Jose Edson Florentino de
Morais. Inclui referências.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2023.

1. Balanço de água no solo. 2. Cobertura morta. 3. Consórcio. 4. Regimes
hídricos. 5. *Nopalea* spp. e *Opuntia* spp.

I. da Silva, Thieres George Freire, orient. II. de Souza, Luciana Sandra Bastos e
Morais, Jose Edson Florentino, coorient. III. Título

CDD 630

GEORGE DO NASCIMENTO ARAÚJO JÚNIOR

Engenheiro Agrônomo

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTE DA CULTURA E ÍNDICES
AGROMETEOROLÓGICOS DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO COM PALMA E
OUTRAS PLANTAS FORRAGEIRAS EM AMBIENTE SEMIÁRIDO**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

DEFENDIDA e APROVADA em 28 de fevereiro de 2023

Banca Examinadora

Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva – UFRPE/UAST

Presidente/Orientador

Prof^a. Dra. Luciana Sandra Bastos de Souza – UFRPE/UAST

Examinadora externa ao programa

Prof. Dr. Sérvulo Mercier Siqueira e Silva – IPA

Examinador externo à instituição

Prof. Dr. Antonio José Steidle Neto – UFSJ

Examinador externo à instituição

Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra – UFRRJ

Examinador externo à instituição

Às minhas avós, Isabel Alves (Vó Santa) (*in memoriam*) e Maria Rosa (Vó Nevinha) pelas bênçãos e todo apoio oferecido durante o meu processo de formação.

Aos meus pais, Maria das Graças da Silva (Dona de casa) e George do Nascimento Araújo (Motorista), meus maiores exemplos de vida, pelo amor e carinho, por acreditarem junto comigo que seria possível, por toda dedicação, esforço e coragem que me fizeram chegar até aqui. É, e sempre será vocês os meus maiores motivos para nunca desistir.

DEDICO

Às minhas irmãs,
Natália e Juliane,
Pelo carinho, incentivo e torcida.

Às minhas sobrinhas,
Sophia e Ayla Cecília,
Ao meu sobrinho e afilhado,
Antônio Lucas,
que sem dúvidas fizeram meus dias melhores
ao longo dessa caminhada.
Que Deus os abençoe com saúde, paz e amor.

À minha compaheira, Fabiana Torres Gomes (Fabi),
pelo amor, carinho, apoio e compreensão.
Por caminhar ao meu lado pela estrada da vida.

À todos meus familiares,
pelo apoio oferecido.

Aos meus amigos(as),
Pelas alegrias, incentivo, apoio e momentos especiais.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o nosso grande pai, pelo dom da vida, pela luz que ilumina meus passos, e por ter me dado saúde e força para seguir firme na caminhada. Por conseguinte, agradeço ao meu pai Oxóssi (Okê Arô), a Dona Lafongira (Larôyê) e a Seu Zé Pelintra (Larôyê) pela proteção, por abrir meus caminhos, pelos livramentos, e por se fazerem tão presentes na minha e na vida da minha família.

Ao professor Thieres George, pela orientação, apoio e confiança. Agradeço por ter acreditado em mim desde 2013, sem dúvidas a sua confiança me fez crescer como pessoa e como profissional. Obrigado pelas oportunidades, por toda dedicação, responsabilidade, ensinamentos e paciência desprendida.

Aos professores Luciana Sandra Bastos de Souza, Sérvulo Mercier Siqueira e Silva, Antonio José Steidle Neto e Gustavo Bastos Lyra por aceitarem o convite para avaliarem o trabalho e pelas ótimas considerações para melhoria.

À professora Luciana Sandra, pela orientação, ensinamentos e pelas valiosas contribuições ao longo de todo meu processo de formação.

Ao doutor José Edson Florentino de Moraes, pela orientação, apoio, prestatividade e todo conhecimento partilhado ao longo da pesquisa. Um exemplo de profissional.

A todos que fazem parte do Grupo de Agrometeorologia no Semiárido - GAS, pelos momentos compartilhados, contribuições, responsabilidades, risos, conversas e por terem se tornando uma verdadeira família ao longo desses anos. Vocês foram indispensáveis para a condução e conclusão dessa pesquisa.

Aos colegas e amigos do PGEA, em especial à Alexandre Jardim, Raliuson Silva, Geraldo de Cangela, Kenny Montalvo, Anderson Santos, Elves Obede, Jesiele Divíncula e Edclécio pela amizade, apoio e momentos vivenciados, principalmente, nos finais de semana que nos reuníamos para estudar.

Aos amigos(as) Marcelo Silva, Laamon Simões, Marcelino Raweny, Cleber Alves, Luiz Fernando, João Pedro, Kaique Salvador, Maria Aparecida, Marisa Silva e Paulo Roberto pela amizade, incentivo e prestatividade. Agradeço a Hygor Alves pela amizade e moradia oferecida em Recife.

Às famílias Torres e Santos Moraes, pelo amor, carinho e vibrações positivas.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco – SEDE e à Unidade Acadêmica de Serra Talhada – UAST pela infraestrutura oferecida e oportunidade para desenvolvimento desse estudo.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola – PGEA pelas inúmeras oportunidades de crescimento profissional. À todos os professores do PGEA pelo comprometimento, ensinamentos e contribuições ao longo desses anos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Brasil - CAPES pela concessão da bolsa de estudos (Finance Code 001).

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco - FACEPE (APQ-1159-1.07/14, APQ-0300-5.03/17, APQ-0639-5.01/21), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (421003/2018-9, 309421/2018-7, 402622/2021-9, 309558/2021-2), ao Instituto Agrônômico de Pernambuco – IPA e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (2017/22269-2) pelos auxílios financeiros.

A todos, a minha sincera gratidão!

Ser grato a Deus é entender que a vida é um dom divino, que somos afortunados por ter família, amigos, saúde, abrigo e alimento. É aceitar as bênçãos e também os obstáculos com o coração aberto, sabendo que o tempo de Deus nem sempre é o nosso tempo. Ser grato a Deus é ter a certeza de que ele está cuidando de nós e fazendo sempre o melhor.

Seja grato!

BIOGRAFIA

GEORGE DO NASCIMENTO ARAÚJO JÚNIOR – Filho de Maria das Graças da Silva e George do Nascimento Araújo, nasceu em Juazeiro – BA, em 29 de novembro de 1991. cursou todo o ensino básico em escola pública, sendo o ensino fundamental nas escolas Jacob Ferreira e Nossa Senhora Rainha do Anjos – CAIC e, o ensino médio, na Escola de Referência Clementino Coelho – EREMCC, todas na cidade de Petrolina – PE. Em dezembro de 2012, ingressou no curso de Bacharelado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, na cidade de Serra Talhada – PE. A partir de março de 2013 começou a integrar o Grupo de Agrometeorologia no Semiárido – GAS, coordenado pelo professor Dr. Thieres George Freire da Silva, no qual foi bolsista de iniciação científica durante três anos. Graduou-se Engenheiro Agrônomo em 2017. Em março de 2017 iniciou a Pós-graduação no curso de Mestrado em Produção Vegetal pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, na cidade de Serra Talhada – PE, findando em fevereiro de 2019, com a dissertação intitulada “*Respostas morfo-fenológicas, agronômicas e benefícios econômicos de clones de palma forrageira sob deficit hídrico controlado*”. Em março de 2019 iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola pela universidade Federal Rural de Pernambuco, na cidade de Recife – PE. Durante todo seu processo de formação, permaneceu como membro pesquisador do GAS, sob a orientação do professor Dr. Thieres George Freire da Silva. Durante o doutorado, concentrou seus estudos na melhoria do uso da água em sistemas de produção com palma e outras plantas forrageiras. A defesa da Tese, intitulada “*Evapotranspiração, coeficiente da cultura e índices agrometeorológicos de sistemas de produção com palma e outras plantas forrageiras em ambiente semiárido*”, ocorreu em fevereiro de 2023.

Araújo Júnior, George do Nascimento. **Evapotranspiração, coeficiente da cultura e índices agrometeorológicos de sistemas de produção com palma e outras plantas forrageiras em ambiente semiárido**. 2023. 209f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.

RESUMO GERAL

Melhorar a gestão dos recursos hídricos na prática de irrigação requer, entre outros fatores, o conhecimento sobre o uso da água pelas culturas e suas respostas agrônomicas sob distintas condições de cultivo. Dessa forma, a determinação acurada da evapotranspiração da cultura (ET_c) e dos coeficientes da cultura ($K_c = K_{cb} + K_e$) podem auxiliar os produtores na redução da quantidade de água aplicada na irrigação e, assim, melhorar a eficiência do uso da água do sistema de produção. Objetivou-se determinar a ET_c , K_c e índices agrometeorológicos de distintos arranjos de cultivo com palma e milho em ambiente semiárido. Os estudos foram conduzidos em dois sítios experimentais localizados no município de Serra Talhada, PE, durante o período de 2012 a 2020. Ao longo desses anos foram quantificados os componentes do balanço de água do solo (BAS) cultivados com clones de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) em distintas condições de cultivo: diferentes regimes hídricos, exclusivo, consorciado e uso de cobertura morta (WM) sobre o solo. A partir do BAS foram quantificados a ET_c , e o K_c foi determinado para as condições ótimas de crescimento e desenvolvimento. Monitorou-se também o crescimento e a produtividade das plantas. Com esse último, e considerando os dados de ET_c e da quantidade de água irrigada, quantificou-se a eficiência do uso da água de cada sistema estudado. Os valores de ET_c e K_c dos clones de palma variaram em função dos sistemas produtivos, da demanda atmosférica, dos regimes hídricos (chuva e irrigação) e da dinâmica de crescimento das espécies estudadas. Em média, as espécies *Opuntia* apresentaram maior demanda hídrica quando comparadas às *Nopalea*. A adoção do consórcio palma/milho aumenta a ET_c desse sistema, mas reduz a evaporação do solo em até 58% em relação ao cultivo exclusivo do milho. O uso da cobertura morta resultou em maiores valores de ET_c e K_c , e reduziu a perda por evaporação em até 13%. Os indicadores de eficiência mostraram que o cultivo da *Opuntia* é mais viável, e seu cultivo em sistema WM e, ou consorciado favorece maior retorno produtivo-econômico ao produtor. Fatores como a espécie consorciada (i.e., milho) e as condições de cultivo devem ser considerados na determinação de parâmetros de consumo de água de sistemas de produção que incluem a palma, de modo a melhorar o manejo de irrigação e a eficiência no uso da água.

Palavras-chave: Balanço de água no solo, cobertura morta, consórcio, *Nopalea* spp., *Opuntia* spp., regimes hídricos.

Araújo Júnior, George do Nascimento. **Evapotranspiration, crop coefficient and agrometeorological indices of production systems with cactus and other forage plants in semiarid environment.** 2023. 209f. Thesis (Ph.D. in Agricultural Engineering) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.

GENERAL ABSTRACT

Improving the management of water resources in the practice of irrigation requires, among other factors, knowledge about the use of water by crops and their agronomic responses under different growing conditions. Thus, the accurate determination of crop evapotranspiration (ET_c) and crop coefficients ($K_c = K_{cb} + K_e$) can help growers to reduce the amount of water applied in irrigation and, thus, improve the efficiency of using water from the production system. Therefore, the objective was to determine ET_c , K_c , and agrometeorological indices of different cultivation arrangements with cactus and millet in a semi-arid environment. The studies were conducted in two experimental sites located in the municipality of Serra Talhada, PE, from 2012 to 2020. Over these years the components of the soil water balance (SWB) cultivated with forage cactus clones (*Opuntia* and *Nopalea*) under different cultivation conditions: different water regimes, exclusive, intercropping and use of mulch (WM) in the soil. ET_c was quantified from BAS, and K_c was determined for optimal growth and development conditions. Plant growth and productivity were also monitored. With the latter, and considering the ET_c data and the amount of irrigated water, the water uses the efficiency of each studied system was quantified. The ET_c and K_c values of the cactus tree clones varied according to the productive systems, atmospheric demand, water regimes (rainfall and irrigation), and growth dynamics of the studied species. On average, the *Opuntia* species had a higher water demand when compared to *Nopalea*. The adoption of the cactus/millet intercropping increases the ET_c of this system but reduces soil evaporation by up to 58% concerning the exclusive cultivation of millet. The use of mulch resulted in higher values of ET_c and K_c and reduced evaporation loss by up to 13%. Efficiency indicators showed that the cultivation of *Opuntia* is more viable, and its cultivation in WM and intercropping system favors a greater economic-productive return to the producer. Factors such as intercropped species (i.e., millet) and growing conditions should be considered when determining water consumption parameters of production systems that include cactus, to improve irrigation management and water use efficiency.

Keywords: Intercropping, mulch, *Nopalea* spp., *Opuntia* spp., soil water balance, water regimes.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES E REVISÃO DE LITERATURA	15
1. INTRODUÇÃO GERAL	15
2. OBJETIVOS	18
2.1. Objetivo Geral.....	18
2.2. Objetivos específicos	18
3. HIPÓTESES	18
4. REVISÃO DE LITERATURA	19
4.1 Sistema de produção de palma forrageira	19
4.2 Evapotranspiração e coeficientes de cultivo simples e duplo	24
4.3 Indicadores de eficiência do uso da água, nutrientes, radiação e da terra.....	28
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
CAPÍTULO II: SISTEMAS DE PRODUÇÃO COM PALMA FORRAGEIRA E MILHETO EM AMBIENTE SEMIÁRIDO: PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTES DA CULTURA E INDICADORES DE EFICIÊNCIA	47
1. INTRODUÇÃO	47
2. MATERIAL E MÉTODOS	49
2.1 Descrição da área de estudo	49
2.2 Material vegetal, implantação do experimento e tratamentos aplicados.....	49
2.3 Características morfológicas e produtivas das culturas	51
2.4 Evapotranspiração e coeficientes da cultura	53
2.5 Indicadores de eficiência do uso da água, radiação e nutrientes.....	54
2.6 Índices de eficiência biológica e benefícios econômicos do sistema consorciado	56
2.7 Análise estatística.....	57
3. RESULTADOS	57
3.1 Condições ambientais, irrigação e umidade do solo	57
3.2 Produtividade dos sistemas de produção com palma e milheto	58
3.3 Evapotranspiração e seus componentes transpiração e evaporação.....	59
3.4 Coeficiente da cultura simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e).....	62
3.5 Indicadores de eficiência do uso da água, radiação e nutrientes.....	64
3.6 Índices de eficiência biológica e benefícios econômicos do sistema consorciado	66
4. DISCUSSÃO	67
4.1. Produtividade dos sistemas de produção com palma e milheto	67
4.2. Evapotranspiração e seus componentes transpiração e evaporação.....	69
4.3. Coeficiente da cultura simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e).....	71
4.4. Indicadores de eficiência do uso da água, radiação e nutrientes.....	72

4.5. Índices de eficiência biológica e benefícios econômicos do sistema consorciado	75
5. CONCLUSÕES	76
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
CAPÍTULO III: EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTES DE CULTURA SIMPLES E DUPLO E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA DA PALMA FORRAGEIRA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CULTIVO	95
1. INTRODUÇÃO	95
2. MATERIAL E MÉTODOS	96
2.1. Descrição da área de estudo	96
2.2 Material vegetal, implantação dos experimentos e tratamentos aplicados	97
2.2.1 Sítio I	97
2.2.1.1. Experimento I do Sítio I – Lâminas e frequências de irrigação	98
2.2.1.2. Experimento II do Sítio I – Palma forrageira sob diferentes regimes hídricos e condições de cultivo	98
2.2.1.3. Manejo de irrigação e tratos culturais	99
2.2.2. Sítio II	100
2.2.2.1. Experimento I do Sítio II – Cultivo de clones de palma forrageira sob diferentes regimes hídricos	100
2.2.2.2. Experimento II do Sítio II – Cultivo irrigado de clones de palma forrageira com e sem cobertura morta e frequências de irrigação	101
2.2.2.3. Manejo de irrigação e tratos culturais	102
2.3. Características morfológicas e produtivas da cultura	102
2.4. Evapotranspiração e coeficientes da cultura	103
2.5. Indicadores de eficiência no uso da água	105
2.6. Fator de resposta de produção (Ky)	106
2.7. Análise estatística	106
3. RESULTADOS	106
3.1. Condições ambientais	106
3.1.1. Experimentos do Sítio I	106
3.1.2. Experimentos do Sítio II	108
3.2. Rendimento de matéria fresca (FMY) e seca (DMY) e conteúdo de matéria seca (DMC)	109
3.2.1. Experimentos do Sítio I	109
3.2.2. Experimentos do Sítio II	112
3.3. Fenofases dos clones de palma forrageira	114
3.3.1. Experimentos do Sítio I	114
3.3.2. Experimentos do Sítio II	118

3.4. Umidade do solo, evapotranspiração da cultura (ET_c) e coeficientes de cultura simples (K_c) e duplo (K_{cb} and K_e)	126
3.4.1. Experimentos do Sítio I.....	126
3.4.2. Experimentos do Sítio II	129
3.5. Indicadores de eficiência do uso da água.....	134
3.6. Fator de resposta de produção (K_y)	137
4. DISCUSSÃO.....	138
4.1. Produtividade da cultura	138
4.2. Evapotranspiração da cultura (ET_c) e coeficiente da cultura simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e)	139
4.3. Indicadores de eficiência do uso da água.....	142
4.4. Fator de resposta de rendimento (K_y).....	142
5. CONCLUSÃO.....	143
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	144
CAPÍTULO IV: EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTES DA CULTURA E EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA DE CLONES DE PALMA FORRAGEIRA EM AMBIENTE SEMIÁRIDO	157
1. INTRODUÇÃO.....	157
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	158
2.1. Descrição das áreas de estudo.....	158
2.2. Material vegetal, implementação dos experimentos e tratamentos aplicados.....	159
2.2.1. Sítio I.....	159
2.2.1.1. Experimento do Sítio I – Clones de palma forrageira irrigados.....	159
2.2.2. Sítio II	161
2.2.2.1. Experimento I do Sítio II – Cultivo de clones de palma forrageira sob diferentes regimes hídricos	161
2.2.2.2. Experimento II do Sítio II – Cultivo irrigado de clones de palma forrageira	162
2.2.2.3. Manejo de irrigação e tratos culturais	163
2.3. Características morfológicas e produtivas da cultura.....	164
2.4. Evapotranspiração e coeficientes da cultura	165
2.5. Indicadores de eficiência no uso da água.....	167
2.6. Análise estatística.....	168
3. RESULTADOS	168
3.1. Condições ambientais	168
3.2. Produtividade e fenofases da cultura	171
3.2.1. Produtividade em matéria fresca, seca e conteúdo de matéria seca.....	171
3.2.2. Fenofases.....	173
3.3. Evapotranspiração e coeficientes da cultura	183

3.4. Eficiência no uso da água	195
4. DISCUSSÃO	197
4.1. Produtividade da cultura	197
4.2. Fenofases.....	198
4.2. Evapotranspiração e coeficientes da cultura	199
4.3. Eficiência no uso da água	201
5. CONCLUSÃO	202
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	202

CAPÍTULO I

**INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES E REVISÃO DE
LITERATURA**

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES E REVISÃO DE LITERATURA

1. INTRODUÇÃO GERAL

Reduzir a vulnerabilidade da agricultura à variação interanual das condições meteorológicas e às mudanças climáticas, aumentar a eficiência dos sistemas de produção e diminuir os riscos à segurança alimentar, implica, entre outros fatores, na adequada gestão integrada dos recursos hídricos locais, que inclui o alto desempenho, a produtividade e conservação da água (PEREIRA, PAREDES & JOVANOVIC, 2020; RALLO, et al., 2021). Para tal, o auxílio de organizações institucionais, associado a intervenções de políticas públicas e a adoção de novas tecnologias podem contribuir na melhoria do manejo de água e, assim, alcançar o uso sustentável e eficiente dos recursos hídricos, sobretudo, em regiões onde a escassez hídrica é questão importante (RALLO et al., 2021). Além disso, o desenvolvimento de pesquisas sobre a necessidade de água das culturas é fundamental (PEREIRA, 2017; RALLO et al., 2021).

Nesse contexto, a estimativa acurada da evapotranspiração (ET) é essencial, visto que, em ambiente vegetados, esse processo corresponde a necessidade de água pela cultura (i.e., evapotranspiração da cultura - ET_c). Em cultivos comerciais, quando a lavoura é cultivada em condições de sequeiro, a ET_c precisa ser atendida pela chuva, enquanto em condições irrigadas, a combinação da chuva e irrigação é fundamental para atender a demanda de água das culturas (PAYERO & IRMAK, 2013). A ET é determinada por meio de técnicas e, ou instrumentos de campo, como por exemplo, o balanço de água do solo (BAS), micrometeorologia e lisímetros, respectivamente (PEREIRA et al., 2015). A ET_c é normalmente modelada usando dados meteorológicos, por meio da evapotranspiração de referência (ET_0), e o do coeficiente de cultura (K_c), que representa a relação entre a ET_c e ET_0 , sendo característico para cada cultura (RALLO et al., 2021). Para tal, o método frequentemente adotado é o de Penman-Monteith parametrizado no boletim de Irrigação e Drenagem N° 56 da Food and Agriculture Organization - FAO-56 (ALLEN et al., 1998).

O K_c varia ao longo do ciclo e, sofre influências do (i) estágio de crescimento e desenvolvimento da cultura, quantidade e tipo de vegetação; (ii) data de plantio, duração e final do ciclo; (iii) espaçamento de plantio, altura das plantas e arquitetura do dossel; (iv) disponibilidade de água no solo, salinidade do solo e da água e (v) frequência de

irrigação (PEREIRA et al., 2015; PEREIRA et al., 2021a). Devido a isso, normalmente é usada uma aproximação linear de múltiplos estágios para representar a curva padrão do K_c , em que se define valores para o estágio inicial ($K_{c\ ini}$), intermediário ($K_{c\ med}$) e final ($K_{c\ fim}$) da cultura (PAÇO et al., 2019). Contudo, esse procedimento pode, em algumas situações, gerar curvas contraditórias em relação às definições adotadas na FAO-56 (PEREIRA et al., 2021a). Além disso, o uso de um mesmo K_c para distintas regiões e climas pode resultar estimativas equivocadas sobre a real necessidade de água das plantas, visto que seus valores podem variar conforme a frequência de precipitação e, ou irrigação, e ainda com tipo de irrigação praticada (PEREIRA et al., 2015; HAN et al., 2021).

Para contornar esse problema, a FAO56 introduziu o conceito de coeficiente de cultivo duplo ($K_c\ dual$), que tem a vantagem de particionar a ET_c em transpiração da cultura, representada pelo coeficiente basal da cultura (K_{cb}) e, evaporação da água do solo, descrita pelo coeficiente K_e , o que torna a estimativa mais precisa, e favorece melhor entendimento do funcionamento do ecossistema quando comparado ao K_c único (PEREIRA et al., 2015; PAREDES et al., 2018; PEREIRA et al., 2021b; SOUSA et al., 2021).

Nos sistemas produtivos com palma forrageira (*Opuntia* ssp. e *Nopalea* ssp.) do Semiárido brasileiro, os produtores não utilizam dados das necessidades de água da cultura para o manejo de água dentro da propriedade rural. Isso resulta na utilização excessiva ou deficitária de água, que muitas vezes, é aplicada em momentos indevidos durante o ciclo das culturas, prática essa, que reduz o uso eficiente dos recursos hídricos. Além disso, impactos negativos no rendimento da lavoura, que reflete em baixo aporte forrageiro na região e, diminuição na lucratividade das unidades produtivas também são observados.

Por esse motivo, além do conhecimento prévio da exigência hídrica das culturas, é essencial avaliar a eficiência dos sistemas produtivos utilizados, tanto em termos de gestão de água quanto ao lucro obtido na propriedade (QUEIROZ et al., 2016; FERNÁNDEZ et al., 2020). Utilizar diferentes arranjos de cultivo (e.g. exclusivo/consórcio) associados a práticas de resiliência agrícola (e.g. cobertura morta, manejo de água, clones, adubação, adensamento de plantas.) pode potencializar a produção de forragem, como também, melhorar o uso dos recursos hídricos dentro da propriedade. Dessa forma, é indispensável índices agrometeorológicos que avaliem a eficiência do uso da água (EUA), a produtividade da água aplicada às culturas (PA_c),

assim como a produtividade econômica da água da cultura (PEA_c) e da irrigação (PEA_i) (FERNÁNDEZ et al., 2020), de modo a melhorar as estratégias dos irrigantes.

Alguns estudos mostraram a demanda hídrica e K_c para a palma forrageira em ambiente Semiárido. Por exemplo, em estudo conduzido por Queiroz et al. (2016), os autores observaram uma ET média igual a $2,59 \text{ mm dia}^{-1}$ e K_c de 0,52 para *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. durante 380 dias de cultivo, sob condições irrigadas no semiárido brasileiro. Utilizando o método lisimétrico para determinação de ET e K_c , Divíncula et al. (2019) obtiveram valores iguais a $4,22 \text{ mm dia}^{-1}$ e 0,72, respectivamente, para *Opuntia ficus-indica* L. (Mill.) durante cinco meses de cultivo. Alves et al. (2022) em cultivo de *Opuntia stricta* sob diferentes sistemas, com e sem cobertura morta, relataram valor médio de K_c igual a 0,50. No consórcio palma/sorgo, Alves et al. (2019) obtiveram, em média, ET igual a $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$, sendo os valores de K_c do sistema iguais a 0,40, 0,68, 0,90 e 0,52 para as fases I, II, III e IV de desenvolvimento da cactácea, respectivamente. Valores de ET variando de 889 a 1070 mm ano^{-1} foram observados por Lima et al. (2018a) em sistemas de palma exclusiva e consorciada com sorgo sob diferentes lâminas de irrigação. Esses autores ainda obtiveram valor médio da ET/ET_0 igual 0,50, independente do regime hídrico e do sistema de cultivo, mostrando que com a adoção do consórcio palma/sorgo não há necessidade de alterar o manejo de irrigação da cactácea.

Em sistemas consorciados, a ET é geralmente maior em comparação aos sistemas exclusivos (YIN et al., 2020). Contudo, em configurações usando a palma forrageira e gramíneas (e.g., milho), essa tendência pode não ser verificada devido aos distintos metabolismos fotossintéticos das espécies, que por sua vez, pode favorecer um efeito compensatório no uso da água do sistema (LIMA et al., 2018a). Enquanto a palma apresenta o metabolismo ácido das crassuláceas (MAC), que favorece as trocas gasosas à noite, o milho apresenta metabolismo C4, em que o processo de ET é predominante no período diurno (LIMA et al., 2018b).

Valores de ET e K_c para todo o ciclo da cultura, com a distinção entre as fases de desenvolvimento da planta (i.e., fenofases e/ou fases fenológicas), para a palma forrageira e milho são escassos, principalmente, quando essas culturas são submetidas a diferentes configurações de cultivo (i.e., consórcio) e práticas resilientes (e.g., uso de cobertura). Do mesmo modo, pouco se sabe sobre a necessidade de água de clones de palma forrageira quando submetidos a diferentes práticas e/ou manejos dentro do sistema de produção (e.g., uso de cobertura, adensamento de plantas, regimes hídricos). Além disso, valores

de K_{cb} e K_e e de indicadores agrometeorológicos são escassos para essas culturas (i.e., palma e milho).

Ainda que favoreçam o uso eficiente dos recursos naturais do local, e otimizem a produtividade (PINHEIRO et al., 2021; SALVADOR et al., 2021), a adoção dessas práticas, assim como a escolha das espécies utilizadas e o conteúdo de água no solo afetam o consumo de água das plantas (PEREIRA et al., 2015; PEREIRA et al., 2021b). Nesse estudo, considerou-se uma série de 8 anos (2012 a 2020) de dados de respostas morfológicas e produtivas de palma forrageira e milho, do conteúdo de água no solo, de necessidade de água (ET e K_c , K_{cb} e K_e) e de eficiência do uso da água dessas culturas cultivadas sob diferentes práticas e manejos no sistema de produção, de modo a fornecer informações pertinentes para cada condição de cultivo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Determinar a ET_c , K_c e índices agrometeorológicos de distintos arranjos de cultivo com palma forrageira para subsídio à serviços em agrometeorologia.

2.2. Objetivos específicos

Quantificar os componentes do balanço de água no solo em diferentes sistemas de produção que incluem as culturas da palma forrageira e milho;

Avaliar o consumo de água (ET_c , K_c e suas relações com ET_0) de distintos arranjos de cultivo com clones de palma forrageira;

Particionar a ET nos componentes de transpiração e evaporação e, por conseguinte, os valores de K_c simples e K_c duplo dos sistemas de cultivo ao longo dos seus ciclos produtivos;

Analisar índices agrometeorológicos de sensibilidade hídrica, eficiência do uso da água e de nutrientes, e dos benefícios financeiros da água dos diferentes arranjos produtivos com palma forrageira.

3. HIPÓTESES

A eficiência do uso da água e dos nutrientes, e dos benefícios econômicos em propriedades rurais do Semiárido brasileiro pode ser melhorada a partir da adoção inteligente de arranjos produtivos com palma forrageira e outras plantas forrageiras sob

diferentes práticas agrometeorológicas, o que melhora o planejamento e a tomada de decisão da produção de forragem para as Cadeias Produtivas Agropecuárias e a alocação mais precisa dos recursos hídricos.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Sistema de produção de palma forrageira

A palma (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) é um recurso forrageiro importante para as regiões Áridas e Semiáridas do Mundo. Apesar da baixa concentração de matéria seca (5 - 15% MS), proteína bruta e fibras, atributos como alta digestibilidade, altos níveis de carboidratos solúveis e reserva de água, fazem dessa cultura uma alternativa alimentar viável para os rebanhos dessas regiões (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021b; DUBEUX JÚNIOR et al., 2021). Devido as suas características morfofisiológicas, essa planta apresenta capacidade de adaptação a condições com elevadas temperaturas do ar e escassez hídrica, mantendo boa produção de fitomassa verde mesmo durante períodos de longa estiagem (GARCÍA-NAVA et al., 2015; QUEIROZ et al., 2015). Seu metabolismo fotossintético, denominado ácido das crassuláceas (MAC), lhe confere excelente eficiência no uso da água, pois a captação de CO₂ ocorre a noite, quando a temperatura do ar é menor e a perda de água pela transpiração é mínima (SCALISI et al., 2016). Além disso, seus caules suculentos (i.e., cladódios), responsáveis pela fotossíntese e com alta capacidade de acumular água; baixa quantidade de estômatos; cutícula espessa, e um sistema radicular adaptado, são outras características que a faz adaptar-se a condições adversas (HASSAN et al., 2019).

O conjunto desses fatores adaptativos propiciam a palma forrageira elevado potencial de produção de fitomassa, principalmente nas épocas secas decorrentes no ano. Produtividades em matéria verde iguais a 163; 124,3 e 117,5 Mg ha⁻¹ foram relatadas por Silva et al. (2015) para os clones Orelha de Elefante Mexicana; Miúda e IPA Sertânia, respectivamente, cultivados durante dois anos em condição de sequeiro no Semiárido brasileiro. Em termos de matéria seca, esses autores obtiveram uma produtividade média de 12,3 Mg ha⁻¹, que apesar de ser baixa, quando comparado com outros estudos (40 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (OLIVEIRA et al., 2018) e, aproximadamente, 20 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (SANTOS et al., 2017), ainda é superior ao potencial forrageiro de algumas espécies do bioma Caatinga normalmente utilizadas na alimentação animal (MORAES et al., 2019).

No Semiárido brasileiro (SAB) as espécies comumente cultivadas são a Orelha de Elefante Mexicana - OEM (*Opuntia stricta* Haw. (Haw.)), IPA Sertânia - IPA (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck) e Miúda - MIU (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck), devido, principalmente, a resistência a cochonilha do carmim (*Dactylopius opuntiae* Cockerrell, 1929, Hemiptera: Dactylopidae) (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a). Tradicionalmente, essas espécies são cultivadas de forma marginal, ou seja, sem a utilização de práticas de manejo adequadas, o que reflete em reduzida produtividade e baixo valor nutritivo da forragem produzida (SILVA et al., 2015a; SANTOS; PERES-MARIN & SARMENTO, 2018; LIMA et al., 2018b). Por outro lado, estudos mostram que o emprego de práticas resilientes propiciam melhores resultados sobre o desenvolvimento e produtividade dessa cactácea (QUEIROZ et al., 2016; SILVA et al., 2017; ROCHA et al., 2017; SANTOS et al., 2017; ARAÚJO JÚNIOR, 2021a; ARAÚJO JÚNIOR, 2021b; SOUZA et al., 2021).

O uso mínimo e regular de água é uma prática que pode incrementar o rendimento da palma forrageira (SILVA et al., 2017; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a). Para as condições do Semiárido pernambucano, Araújo Júnior et al. (2021a), em um ano que choveu 1005 mm, não observaram influência significativa do uso de irrigação com déficit hídrico controlado baseado na evapotranspiração da cultura - ET_c , sobre a produtividade de clones de palma forrageira OEM (312 Mg ha^{-1}); MIU (191 Mg ha^{-1}) e IPA (83 Mg ha^{-1}). Todavia, os resultados encontrados foram superiores aos reportados em estudos para condições de sequeiro (SILVA et al., 2015a; JARDIM et al., 2021a). Embora não encontrado efeito significativo de lâminas de irrigação e da condição de sequeiro sobre a produtividade de clones de palma forrageira para as condições estudadas, os autores recomendam o uso da irrigação complementar onde a precipitação pluvial seja menor do que 647 mm ano^{-1} . Por outro lado, Queiroz et al. (2015) citaram que, lâminas de irrigação variando entre 1048 e 1090 mm ano^{-1} promoveram melhores respostas produtivas da cultura. Já em estudo desenvolvido no Semiárido baiano, em um ano que choveu 345 mm, Campos et al. (2021), com manejo de irrigação baseado no potencial matricial entre -1 e -3 atm , correspondente a 94 mm ano^{-1} e 52 mm ano^{-1} , respectivamente, observaram aumento no crescimento e na produtividade de clones de palma forrageira. Com esses resultados, nota-se que ainda há dúvidas sobre a real necessidade de água da palma em diferentes condições climáticas e de manejo.

Além de favorecer maior rendimento, o uso de irrigação complementar influencia significativamente a quantidade e duração das fases fenológicas da palma, antecipando o

seu momento de colheita quando comparado ao cultivo em sequeiro (AMORIM et al., 2017; ARAÚJO JÚNIOR, et al. 2021b). Araújo Júnior et al. (2021b) constataram que o regime hídrico de 80% da ET_c , equivalente a 667 mm ano⁻¹, favoreceu maior emissão de cladódios e, conseqüentemente, maior número de fenofases nos clones MIU e IPA. Esses autores ainda concluíram que, para as condições do semiárido brasileiro, o cultivo irrigado com regime de água de 40% da ET_c (313 mm ano⁻¹) para o clone OEM, e 80% da ET_c para os clones IPA e MIU, antecipa o momento de corte em cinco e sete meses, respectivamente, em relação aos 24 meses mencionados na literatura para o cultivo de sequeiro. A antecipação da colheita da palma forrageira é importante para a oferta de forragem aos rebanhos, assim como para a obtenção de mudas para novos plantios e, ou comercialização (ROCHA et al., 2017).

Outra prática que tem sido utilizada nos sistemas de produção dessa cactácea é a adoção de cobertura morta sobre o solo. Para outras culturas foi evidenciado os benefícios dessa prática com a diminuição da necessidade de irrigação, devido à redução da evapotranspiração; diminuição da amplitude térmica do solo e aumento do teor de matéria orgânica no solo, o que favorece o incremento produtivo (YIN et al., 2017; SILVA et al., 2017; YIN et al., 2020). Para a palma forrageira, Souza et al. (2021) observaram que o uso de cobertura incrementou o acúmulo de matéria seca ao longo do ciclo, a taxa de crescimento relativo e a taxa de assimilação líquida dos clones OEM, MIU e IPA. Em estudo realizado por Amorim et al. (2017), o uso da cobertura morta favoreceu o incremento da taxa de acúmulo mensal de matéria seca do clone OEM, além de aumentar a emissão de cladódios de 2º ordem e reduzir, significativamente, a duração da fenofase III. Em ambos os estudos, os autores concluíram que a presença da cobertura morta possibilitou a manutenção da umidade e a baixa amplitude térmica do solo, e o aumento da ciclagem e conteúdo de nutrientes no meio edáfico e, assim contribuiu para o desenvolvimento da cultura. Além disso, o uso de cobertura morta em sistemas de produção de palma forrageira diminui a taxa de evapotranspiração da planta e, conseqüentemente, a variação do conteúdo de água do solo (CARVALHO et al., 2017).

Embora muito utilizada na alimentação de ruminantes, os baixos índices de matéria seca, proteína bruta e fibra presentes na palma (DUBEUX JÚNIOR et al., 2021) podem causar problemas gastrointestinais nos animais quando fornecida de forma isolada, além de aumentar os custos para o produtor que busca a suplementação adequada para o rebanho (SILVA et al., 2017; JARDIM et al., 2021a). Desse modo, o uso de consórcio entre a palma e outras culturas forrageiras é importante na gestão sustentável da atividade

agropecuária local (DINIZ et al., 2017; LIMA et al. 2018a). Para tal, a escolha da cultura a ser consorciada é extremamente importante e, características como tolerância ao déficit hídrico e boa produção de forragem, devem ser consideradas para o cultivo no SAB (LIMA et al., 2018b; JARDIM et al., 2021a).

A adoção dessa prática em sistemas produtivos de palma forrageira foi reportada em estudos desenvolvidos no SAB. Lima et al. (2018b) ao conduzirem o consórcio palma-sorgo nas condições climáticas de Serra Talhada, PE, sob irrigação com água salina, observaram maiores produtividades de matéria seca ($\sim 20 \text{ Mg ha}^{-1}$) em relação ao sistema de monocultivo ($\sim 9 \text{ Mg ha}^{-1}$), devido, principalmente, ao rendimento do sorgo. No entanto, reduções na produtividade de matéria fresca foi evidenciado no consórcio, o que pode ser reflexo da competição entre as espécies (DINIZ et al., 2017; LIMA et al., 2018a; LIMA et al., 2018b). Jardim et al. (2021a) ao avaliarem os clones OEM, MIU e IPA consorciados com três cultivares de sorgo (467, SF11 e IPA-2502), observaram produtividades de $221,73 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $47,04 \text{ Mg ha}^{-1}$, em matéria fresca e seca, respectivamente, sendo 47% superior em relação ao sistema exclusivo da palma.

No arranjo palma-sorgo, devido aos distintos metabolismos fotossintéticos das espécies, espera-se que a cactácea (MAC), em comparação ao sorgo (C4), extraia mais água do solo durante a noite, ao passo que o sorgo consuma mais água no período diurno, havendo, desse modo, um efeito compensatório no uso da água no sistema (LIMA et al., 2018b; JARDIM et al., 2021a). Essa hipótese foi confirmada por LIMA et al. (2018a), que ao estudarem o consórcio utilizando o clone de palma OEM e o sorgo cv. IPA-2502, verificaram que esse sistema propiciou melhor eficiência no uso da água do que o sistema exclusivo da cactácea, com valores iguais a $18,9 \pm 7,4 \text{ kg de MS ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ e $8,4 \pm 3,4 \text{ kg de MS ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, respectivamente.

Efeitos significativos no crescimento e desenvolvimento da palma cultivada em sistema consorciado foram reportados por alguns autores. Souza et al. (2021) observaram que a adoção do consórcio palma-milheto irrigado, promoveu a redução da fenofase II e avanço da fenofase III da palma, sem influência no rendimento das culturas. Para essa condição, o momento ideal de colheita da OEM foi maior em relação ao monocultivo. Em contrapartida, em estudo com diferentes cultivares de sorgo consorciados com clones de palma forrageira, Jardim et al. (2021b) reportaram que o consórcio causou reduções nas taxas de crescimento da palma e, o tempo para colheita da cactácea foi menor quando comparado ao sistema exclusivo. Desse modo, fica evidente que as respostas

morfológicas dessa cactácea quando consorciada, variam de acordo com a cultura secundária e as práticas adotadas no sistema.

Além das práticas citadas anteriormente, a modificação da densidade populacional, por meio da redução ou aumento do espaçamento entre fileiras e, ou, plantas, e a orientação de plantio em cultivos de palma forrageira têm incrementado o rendimento da cultura (SILVA et al., 2014c; PEIXOTO et al., 2018). Silva et al. (2014c), relataram que a palma em cultivo adensado com até 80.000 plantas ha⁻¹ tem resposta produtiva positiva, com a espécie Miúda se destacando em relação à Gigante e a Redonda. Além das características genéticas de cada espécie, a alteração da densidade populacional de plantas influencia no aproveitamento dos recursos disponíveis, tais como água, nutrientes e radiação solar, o que favorece o incremento produtivo da cultura (SILVA et al., 2014c; SIADAT-JAMIAN et al., 2019). Vale ressaltar que a densidade ideal de plantio e a resposta produtiva da cultura ao espaçamento utilizado variam conforme o local de cultivo (ZHANG et al., 2022). Para Nyakudya e Stroosnijder (2014) a adoção de altas densidades de plantio é recomendada para locais onde existe boa disponibilidade hídrica, enquanto a baixa densidade populacional é melhor aplicada às regiões secas. Logo, a disponibilidade de água no solo é um dos fatores importantes para a seleção da densidade ótima de cultivo (ZHANG et al., 2022).

A orientação de plantio, por sua vez, está diretamente relacionada a interceptação da radiação solar, com efeitos significativos nos níveis de sombreamento da cultura e, conseqüente eficiência fotossintética da planta (CORRÊA et al., 2019). Para a palma (*Opuntia ficus-indica* (L.) P. Mill) foi possível observar que a posição de plantio afetou, significativamente, o rendimento e o conteúdo de fibra em detergente ácido da cultura (PEIXOTO et al., 2018). Para esses autores, o plantio na orientação Leste-Oeste nas condições estudadas favoreceu uma maior produção em massa verde, devido a maior exposição à radiação solar.

De modo geral, a implantação de um sistema produtivo de palma, seja exclusiva ou consorciada, mostra-se viável, não só em termos produtivos, mas também econômicos para os produtores do SAB. Estudos como o de Lima et al. (2018b) e Araújo Júnior et al. (2021a), reforçam a ideia que esse tipo de empreendimento pode garantir, além de segurança alimentar para os rebanhos, renda para os produtores a partir da venda do produto final, ou seja, forragem ou semente (i.e., venda do cladódio para plantio). Contudo, é importante avaliar a viabilidade da adoção de práticas dentro do sistema, de modo a melhorar o desempenho produtivo da cultura e o aporte forrageiro da propriedade.

4.2 Evapotranspiração e coeficientes de cultivo simples e duplo

A evapotranspiração (ET) é um importante processo envolvido nos sistemas ecohidrológicos em todo o mundo, e em regiões secas, pode corresponder a até 95% do balanço hídrico. É também um componente essencial nos ciclos de energia e carbono e, pode ser utilizado como indicador de variações hidrológicas e de calor em ambientes sob mudanças climáticas e interferência humana. A ET é composta por dois componentes individuais, a evaporação da água do solo (E) e a transpiração da planta (T) e, em algumas situações, a evaporação da água interceptada pelo dossel das plantas e, ou pela camada de serapilheira, pode contribuir no processo (PAYERO & IRMAK, 2013; KOOL et al., 2014; ZHANG, ZHAO & ZHENG, 2020).

Nos sistemas de produção agrícola, a ET corresponde a necessidade de água pelas culturas (ET_c) e, estima-la de forma acurada é essencial para a adoção de práticas de gestão hídrica, assim como determinar o regime hídrico empregado nos cultivos e projetar sistemas de irrigação, de modo a melhorar a produtividade e a eficiência do uso da água (PAYERO e IRMAK, 2013; KOOL et al., 2014; WANG et al., 2021). Além disso, informações precisas da ET possibilitam melhor entendimento sobre o rendimento das culturas (PAYERO e IRMAK, 2013) ou assimilação de carbono (HUANG et al., 2010) devido à forte correlação entre eles.

Tendo em vista a crescente escassez de água para irrigação em várias regiões do mundo, principalmente em regiões áridas e semiáridas, seja devido a fatores intrínsecos, como as frequentes secas, ou pelo o aumento da competição com usuários não agrícolas (e.g., doméstico e industrial), há necessidade iminente de encontrar maneiras de conservação e uso eficiente da água, e informações concretas da ET e de seus componentes devem ser preconizadas, sobretudo, em sistemas agrícolas que utilizam diferentes práticas de manejo de solo e de água (AGAM et al., 2012; IRMAK & KUKAL, 2019a; WANG et al., 2020; HAN et al., 2021).

O processo de ET, assim como o comportamento de T e E, têm sido o foco de alguns estudos em diversas zonas agroclimáticas e tipos de cobertura vegetal (HADRIA et al., 2021; WANG et al., 2021). Técnicas como o balanço hídrico, métodos micrometeorológicos (e.g., *eddy covariance* e balanço de energia de razão de Bowen) e sensoriamento remoto têm sido utilizados na determinação da ET (IRMAK et al., 2019b; PEREIRA, PAREDES e JOVANOVIC, 2020; RANDOW et al., 2020; SOUSA et al.,

2021). O uso de microlisímetros (JAMSHIDI et al., 2020) e da técnica do balanço de calor sensível do solo (WANG et al., 2017) são opções para medir E, ao passo que o método do fluxo de seiva é um exemplo para a determinação de T (WANG et al., 2021). Vale ressaltar que as peculiaridades de cada uma dessas técnicas podem causar variações nos valores de ET e, portanto, na sua partição (WANG et al., 2021).

A adoção de diferentes práticas agrícolas também pode refletir significativamente no consumo hídrico das plantas, devido a variação da disponibilidade de água do solo (PADOVAN et al., 2018; IRMAK e KUKAL, 2019a). Por exemplo, o emprego da prática de consorciação de culturas pode melhorar a produção do sistema por meio do uso eficiente de nutrientes, água e radiação, todavia, o consumo de água pelas plantas é maior quando comparado à sistemas exclusivos (YIN et al., 2020). Ao avaliar o uso da água do milho e trigo, em sistema consorciado e exclusivo, numa região árida da China, Wang et al. (2015) observaram aumento de 25% (ET_c média = 570,9 mm) no consumo de água no consórcio em relação ao monocultivo.

Embora seja maior quando comparado ao sistema exclusivo, o consumo de água em sistemas consorciados pode variar conforme as condições ambientais, espécies utilizadas, manejo de irrigação e a configuração espacial adotada (YIN et al., 2020). Em cultivo consorciado de palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.) com sorgo no Semiárido brasileiro, Lima et al. (2018a) não observaram efeito significativo do sistema de cultivo sobre a ET, no entanto, a maior disponibilidade hídrica ocasionada pelo aumento das lâminas de irrigação, foi fator responsável pela variação do consumo hídrico das culturas. Os distintos metabolismos presentes na palma (ácido das crassuláceas - MAC) e no sorgo (C4), podem ter influenciado para tal resultado, uma vez que o metabolismo MAC propicia as trocas gasosas no período noturno e, o metabolismo C4 favorece as trocas gasosas durante o dia, reduzindo, dessa forma, os valores de ET_c no sistema de cultivo palma-sorgo (LIMA et al., 2018a). Alves et al. (2019) também observaram aumento da evapotranspiração real (ET_r) do sistema palma/sorgo com o aumento das lâminas de irrigação (0, 25, 50, 75 e 100% da ET_0), com valores variando de 1,5 mm dia⁻¹ a 3,5 mm dia⁻¹.

Além da consorciação, o uso de cobertura no solo altera a dinâmica da ET, seja devido à redução da componente evaporação do solo ou, no caso do uso de culturas de cobertura, a melhoria da infiltração de água e, ou sua demanda hídrica podem resultar no aumento ou diminuição do armazenamento de água no solo, respectivamente (YIN et al., 2020; CAO et al., 2021). Em contraste, o uso de cobertura morta pode aumentar a

transpiração, ocasionando perdas por ET semelhantes ou até maiores em comparação com a prática sem cobertura (DING et al., 2018). No geral, a influência do uso de cobertura morta depende de fatores como eventos de precipitação e frequência de irrigação; tipo de cobertura; espessura da cobertura; sistema de produção, entre outros, que podem resultar em uma menor ou maior disponibilidade de água no solo (ZRIBI et al., 2015).

Para a palma forrageira, Alves et al. (2022a) observou redução de 1,38% na ET_c da espécie *Opuntia stricta* Haw. (Haw.) no sistema com cobertura em relação ao sem cobertura. O autor atribui a baixa diferença entre os sistemas ao efeito compensatório da componente T sobre a ET, o que pode ser devido ao maior crescimento da cultura, principalmente do índice de área do cladódio, resultando em maior consumo de água pela planta (SILVA et al., 2015b). Apesar desse resultado, para cultivos de palma forrageira poucos são os relatos da influência da cobertura sobre a dinâmica da ET, sendo mais frequente informações referentes aos efeitos sobre o crescimento e produtividade da cultura (AMORIM et al., 2017; SOUZA, 2019a). Dessa forma, pesquisas nesse sentido devem ser desenvolvidas.

Melhorar a gestão dos recursos hídricos na prática de irrigação em regiões áridas e semiáridas, requer o conhecimento sobre a utilização da água pelas culturas e as suas respostas agrônômicas sob condições de estresse hídrico (HAN et al., 2021). Além do mais, o aporte de água da região deve ser considerado na determinação dos requisitos de irrigação (JAMSHIDI et al., 2020; WANG et al., 2020). Desde a sua publicação, em 1998, o boletim de irrigação e drenagem da FAO N° 56 (ALLEN et al., 1998), tornou-se uma das publicações com mais citações no campo das relações solo-água-planta-atmosfera, sendo, até hoje, utilizada por vários pesquisadores na determinação das necessidades de água das culturas, para as mais diversas condições de cultivo (PEREIRA et al., 2015). Nesta abordagem, o procedimento K_c-ET_0 é aplicado para estimar, de forma prática, as necessidades de água da cultura ($ET_c = K_c \times ET_0$), em que o K_c representa a influência da cultura sobre a ET total, e a ET_0 reflete os efeitos primários do clima no consumo de água pela planta (ALLEN et al., 2011; PEREIRA et al., 2015; WANG et al., 2020).

O coeficiente de cultura único (K_c), estimado pela razão entre a ET_c e a evapotranspiração de referência (ET_0), inclui efeitos da evaporação do solo e transpiração das plantas e, é um indicador importante para a avaliação das características de uso da água da cultura (WANG et al., 2015; PEREIRA et al., 2021b). O boletim 56 da FAO disponibilizou valores de K_c para uma variedade de culturas sob condições de clima padrão (ALLEN et al., 1998). Contudo, esses valores podem variar conforme o tipo de

cultivo e práticas utilizadas dentro do sistema de produção, assim como pelas características edafoclimáticas do local de cultivo (PEREIRA et al., 2015; ALVES et al., 2022a). Por esse motivo, a transferência de valores de K_c único para diferentes locais pode resultar em incertezas sobre a real necessidade de água das culturas (HAN et al., 2021).

Para contornar esse problema, a FAO-56 introduziu o conceito de coeficiente duplo ou dual, representado por $K_{c \text{ duplo}} = K_{cb} + K_e$, em que K_{cb} é o coeficiente de cultura basal e representa a transpiração da planta; e K_e é o coeficiente de evaporação do solo (PEREIRA et al., 2015). Portanto, a estimativa da ET_c passa a ser calculada por: $ET_c = (K_{cb} + K_e) * ET_0$. Com o uso do K_c duplo, espera-se melhores estimativas da ET, devido a melhor precisão da aferição da evaporação do solo (KOOL et al., 2014), como também possibilita melhor estimativa do rendimento das culturas, uma vez que a transpiração está diretamente relacionada ao desempenho produtivo das plantas (PAREDES et al., 2014; UNKOVICH et al. 2018).

Para a palma forrageira alguns estudos mostraram os requisitos de água da cultura durante o ciclo produtivo, destacando os efeitos da prática de irrigação sobre a ET da cultura. Silva et al. (2015b) não observaram diferença para ET entre os clones OEM, IPA e MIU cultivados em condição de sequeiro no Semiárido brasileiro. A ET média observada durante 499 dias de cultivo foi igual a 1173 mm, com valor médio diário de 2,35 mm. Em condições irrigadas, Queiroz et al. (2016) observaram uma ET média do clone *Opuntia stricta* Haw. (Haw.) de 2,59 mm dia⁻¹, com um total de 985,77 mm ao longo de 380 dias de cultivo. Utilizando os clones OEM, IPA e MIU, em condições irrigadas, no Semiárido brasileiro, Pereira et al. (2017) não verificaram diferença no consumo de água entre os clones, com média de 1,50 mm dia⁻¹. Embora não constatada diferença, foi visto que para condições com maior disponibilidade de água no solo e maior demanda atmosférica, o clone MIU diminui o consumo de água mais rápido quando comparado aos clones OEM e IPA, o que talvez confira ao clone MIU menor adaptabilidade ao ambiente semiárido (SILVA et al., 2015a; PEREIRA et al., 2017).

Valores de K_c para a palma forrageira para o Semiárido brasileiro foram relatados em alguns estudos. Queiroz et al. (2016) encontraram um K_c médio igual a 0,52 para os clones IPA, MIU e OEM cultivados em sistema exclusivo, no semiárido pernambucano. Para o estado de Alagoas, Divíncula et al. (2019) utilizando os métodos de Penman-Monteith, Hargreaves-Samani e FAO-irradiação, obtiveram K_c médios iguais a 0,72; 0,84 e 0,48, respectivamente, para a espécie *Opuntia cochenillifera*. Aplicações do K_c duplo

para clones de palma forrageira são escassos na literatura e, considerando sua importância para o manejo de irrigação em diferentes zonas agroclimáticas, é necessário o desenvolvimento de pesquisas com esse viés, a fim de melhorar a gestão de água em sistemas de produção de palma no Semiárido pernambucano.

4.3 Indicadores de eficiência do uso da água, nutrientes, radiação e da terra

O uso racional e a conservação dos recursos hídricos são temas importantes que têm sido debatidos ao longo das últimas décadas (PIOUCEAU et al., 2014). Em todo o mundo, a água para irrigação está cada vez mais escassa, e a busca pelo equilíbrio entre a demanda e oferta de água na agricultura tem crescido, principalmente, em regiões Áridas e Semiáridas, onde os recursos hídricos são limitados (SILVA et al., 2014; ALBERTO et al., 2014; QUEIROZ et al., 2016; PEREIRA, PAREDES & JOVANOVIC, 2020).

Garantir uma gestão de água adequada, que permita a produção de alimentos e lucros para o produtor, ao passo que danos ao ambiente sejam evitados, é um dos grandes desafios atuais na agricultura irrigada (COSGROVE & LOUCKS, 2015). Devido às limitações de água no Semiárido brasileiro, a adoção de sistemas de produção agrícola irrigados induz a necessidade do conhecimento prévio, não apenas da exigência hídrica das culturas, mas também da eficiência do sistema produtivo em questão (QUEIROZ et al., 2016). Para tal, a avaliação da eficiência do uso da água e da análise econômica de irrigação são úteis para a tomada de decisão referente ao uso ou não de irrigação na propriedade (LEVIDOW et al., 2014).

Existem diferentes indicadores que identificam a eficiência do uso da água (EUA) dentro do sistema de produção (PEREIRA, CORDERY & IACOVIDES, 2012), e outros que avaliam a produtividade da água aplicada à cultura (PA_c) e, ainda, a produtividade econômica da água da cultura (PEA_c) e da irrigação (PEA_i) (FERNÁNDEZ et al., 2020). De acordo com Fernández et al. (2020), essa diversidade de indicadores causa contradições por meio dos pesquisadores, sobretudo, na interpretação dos resultados, uma vez que não há consenso sobre as definições e adequações de como eles devem ser usados. Isso acontece, pois, a EUA e PA_c são confundidas e, em muitas situações, são aplicadas de maneira equivocada (HALSEMA & VINCENT, 2012). O termo EUA indica uma razão entre a quantidade de água usada pela cultura e a quantidade total de água recebida pelo sistema, seja via precipitação pluvial e, ou irrigação, enquanto a PA_c , estabelece a

relação entre a produção e a quantidade de água utilizada (HEYDARI et al., 2014; FERNÁNDEZ et al., 2020).

O conceito de PA_c pode se referir ao rendimento obtido no sistema de produção ou ao seu valor comercial, contudo, para Fernández et al. (2020), um termo mais adequado para o último é PEA_c e, no caso do uso de irrigação, PEA_i , pois se refere aos produtos obtidos, em termos monetários, a partir da quantidade de água recebida pela cultura. Desse modo, a PEA_c e a PEA_i se mostram indicadores de grande importância prática, uma vez que possibilitam mensurar o incremento produtivo e o retorno econômico alcançado, em função do uso da água no sistema de produção (SILVA et al., 2014a). Outro indicador do uso da água é a eficiência do uso de nutrientes (EUN), que corresponde à capacidade de a cultura absorver nutrientes presentes na solução do solo, em função da ET ou recebida no sistema de produção via irrigação e/ou precipitação pluvial (SILVA et al., 2014a).

Algumas aplicações de indicadores do uso da água em cultivos de palma forrageira foram realizadas. Para as condições do Semiárido brasileiro, Silva et al. (2014a) observaram que o clone Orelha de Elefante Mexicana apresentou maior PA_c (104,8 kg massa verde $ha^{-1} mm^{-1}$), com base no volume de água recebido via precipitação, em relação aos clones IPA Sertânia (80,0 kg massa verde $ha^{-1} mm^{-1}$) e Miúda (75,6 kg massa verde $ha^{-1} mm^{-1}$). Para a PA_c em massa seca, e considerando o volume de água evapotranspirada pela cultura, os autores não observaram diferença entre os clones estudados. Resultado semelhante foi observado para a PEA_c , assumindo os preços dos cladódios e o ganho bruto por área cultivada, onde diferenças entre os clones não foram significativas (SILVA et al., 2014a). A adoção de práticas agronômicas como a aplicação adequada de fertilizantes, controle de pragas e doenças, densidade de cultivo, escolha da espécie vegetal e arranjos de cultivo, podem influenciar o uso eficiente da água pelas culturas (DUBEUX JR et al., 2006; TURNER, 2004; SILVA et al., 2014a). Por exemplo, a adoção do sistema consorciado palma-sorgo sob condições irrigadas no Semiárido brasileiro, propiciou maior PA_c quando comparado ao sistema exclusivo dessas culturas (LIMA et al., 2018a).

Em termos de EUN, Silva et al. (2014a) observaram diferença entre clones dos gêneros *Opuntia* e *Nopalea* para o uso do magnésio e sódio, com base na ET e na precipitação, respectivamente. Em média, esses autores encontraram $EUN_{(Mg)}$ iguais a 111,4 g $mg ha^{-1} mm^{-1}$ e 77,4 g $mg ha^{-1} mm^{-1}$, e $EUN_{(Na)}$ de 4854,3 $mg ha^{-1} mm^{-1}$ e 3383,6 $mg ha^{-1} mm^{-1}$ para *Opuntia* e *Nopalea*, respectivamente. Embora seu uso não seja

frequente em sistemas de produção de palma e outras plantas forrageiras, seus valores é um bom indicativo para analisar a extração de nutrientes da solução do solo, com base na água efetivamente utilizada pela cultura no processo de ET ou no volume de água recebido via irrigação e/ou precipitação.

Além da eficiência do uso da água, outro indicador é o de eficiência do uso da radiação (EUR), que corresponde a capacidade que a cultura tem em converter a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (PARinter) em biomassa seca. Essa eficiência varia entre as espécies e os sistemas de produção adotados, visto que está diretamente atrelada as características morfológicas das plantas, que por sua vez, sofre influência das condições de cultivo (TEIXEIRA et al., 2015; SUÁREZ et al., 2022). Tal eficiência pode ser melhorada a partir da adoção de práticas, como por exemplo, a consorciação de culturas (FAN et al., 2019; NWOKORO et al., 2022). Contudo, essa prática pode ocasionar mudanças na dinâmica de uso dos recursos naturais disponíveis, o que pode gerar incertezas sobre a sua viabilidade (DINIZ et al., 2017; LIMA et al., 2018a). Logo, a utilização de índices biológicos do uso da terra (e.g., razão equivalente de terra - LER, razão de equivalência área-tempo - ATER, coeficiente de equivalência de terra - LEC, índice de produtividade do sistema - SPI e índice de vantagem monetária – MAI) ajuda a entender a competitividade das culturas, os benefícios econômicos e as melhores configurações de cultivo, como já relatado para cultivos consorciados com palma forrageira e gramíneas (e.g., sorgo e milho) (JARDIM et al., 2021a; ALVES et al., 2022b; SOUZA et al., 2022).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGAM, N.; EVETT, S. R.; TOLK, J. A.; KUSTAS, W. P.; COLAIZZI, P. D.; ALFIERI, J. G.; MCKEE, L. G.; COPELAND, K. S.; HOWELL, T. A.; CHÁVEZ, J. L. Evaporative loss from irrigated interrows in a highly advective semi-arid agricultural area. **Advances in Water Resources**, v. 50, p. 20-30, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.07.010>

ALBERTO, M. C. R.; QUILTY, J. R.; BURESH, R. J.; WASSMANN, R.; HAIDAR, S.; CORREA JUNIOR, T. Q.; SANDRO, J. M. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler

irrigation. **Agricultural Water and Management**, v. 136, p. 1-12, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.005>

ALENCAR, A. V. O.; GOMES, T. R.; NASCIMENTO, G. A. J.; FREITAS, E. R.; WATANABE, P. H.; NEPOMUCENO, R. C. Performance of brown-egg laying pullets fed diets with sunflower meal and enzyme complex. **Livestock Science**, 104776, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104776>

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 899-920, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Dranaige Paper, 56).

ALVES, H. K. M. N.; SILVA, T. G. F.; JARDIM, A. M. R. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, C. A. A.; MOURA, M. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; CAMPOS, F. S.; CRUZ NETO, J. F. The use mulch in cultivating the forage cactus optimizes yield in less time and increases the water use efficiency of the crop. **Irrigation and Drainage**, p. 1-15, 2022a. <https://doi.org/10.1002/ird.2758>

ALVES, C. P.; JARDIM, A. M. R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; SOUZA, C. A. A.; SALVADOR, K. R. S.; LEITE, R. M. C.; PINHEIRO, A. G.; SILVA, T. G. F. How to enhance the agronomic performace of cactus-sorghum intercropped system: planting configuration, density and orientation. **Industrial Crops and Products**, v.184, p. 115059, 2022b.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115059>

AMORIM, D. M.; SILVA, T. G. F.; PEREIRA, P. C.; SOUZA, L. S. B.; MINUZZI, R. B. Phenophases and cutting time of forage cactus under irrigation and cropping systems. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 1, p. 62-71, 2017.
<http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632016v4742746>

ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SILVA T. G. F.; SOUZA L. S. B.; SOUZA M. S.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA M. S. B.; SANTOS, J. P. A. S.; JARDIM, A. M. R.F.; ALVES, C. P.; ALVES H. K. M. N. Productivity, bromatological composition and economic benefits of using irrigation in the forage cactus under regulated deficit irrigation in a semiarid environment. **Bragantia**, v.80, e1221. 2021a. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200390>

ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B.; ALVES, C. P.; SALVADOR, K. R. S.; SOUZA, C. A. A.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, M. J. Phenophases, morphophysiological indices and cutting time in clone of the forage cacti under controlled water regimes in a semiarid environment. **Journal of Arid Environments**, v. 190, 104510, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104510>

CAMPOS, A. R. F.; SILVA, A. J. P.; VAN LIER, Q. J.; NASCIMENTO, A. L.; FERNANDES, R. D. M.; ALMEIDA, J. N.; PAZ. V. P. S.; Yield and morphology of forage cactus cultivars under drip irrigation management based on soil water matric potential thresholds. **Journal of Arid Environments**, v. 193, 104564, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104564>

CAO, Q.; WANG, Z.; YANG, X.; SHEN, Y. The effects of cocksfoot cover crop on soil water balance, evapotranspiration partitioning, and system production in an apple orchard on the Loess Plateau of China. **Soil and Tillage Research**, v. 205, 104788, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104788>

CARVALHO, A. A.; SILVA, T.G. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; TOLÊDO, M P. S. Soil moisture in forage cactus plantations with improvement practices for their resilience. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 7, p. 481-487, 2017. <http://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n7p481-487>

COSGROVE, W. J.; LOUCKS, D. P. Water management: Current and future challenges and research directions. **Water Resources Research**, v. 51, p. 4823-4839, 2015. <http://dx.doi.org/10.1002/2014WR016869>

DING, D.; ZHAO, Y.; FENG, H.; HILL, R. L.; CHU, X.; ZHANG, T.; HE, J. Soil water utilization with plastic mulching for a winter wheat-summer maize rotation system on the Loess Plateau of China. **Agricultural Water Management**, v. 201, p. 246–257, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.029>

DINIZ, W. J. S.; SILVA, T. G. F.; FERREIRA, J. M. S.; SANTOS, D. C.; MOURA, M. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; ZOLNIER, S. Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 724–733, 2017. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000900004>

DIVÍNCULA, J. S.; SILVA, C. B.; SANTOS, M. A. L.; SANTOS, D. P.; SANTOS, L. W. Crop coefficient and water requirement of prickly pear in the Agrest region of Alagoas state, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 925-929, 2019.

DUBEUX JR, J. C. B.; SANTOS, M. V. F.; LIRA, M. A.; SANTOS, D. C.; FARIAS, I.; LIMA, L. E.; FERREIRA, R. L. C. Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller under different N and P fertilization and plant population in northeast Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 67, n. 3, p. 357-372, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.015>

DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; SANTOS, M. V. F.; CUNHA, M. V.; SANTOS, D. C.; SOUZA, R. T. A.; MELLO, A. C. L.; SOUZA, T. C. Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. **Animal Feed Science and Technology**, v. 275, 114890, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>

FAN, Z.; CHAI, Q.; YU, A.; ZHAO, C.; YIN, W.; HU, F.; CHEN, G.; CAO, W.; COULTER, J. A. Water and radiation use in maize–pea intercropping is enhanced with increased plant density. **Agronomy Journal**, v.112, n.1, p. 1-17, 2020. <https://doi.org/10.1002/agj2.20009>

FERNÁNDEZ, J. E.; ALCON, F.; DIAZ-ESPEJO, A.; HARNANDEZ-SANTANA, V. CUEVAS, M. V. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation

decision: A case study of a super high density olive tree orchard. **Agricultural Water Management**, v. 237, 106074, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074>

GARCÍA-NAVA, F.; PEÑA-VALDIVIA, C. B.; TREJO, C.; GARCÍA-NAVA, R.; REYES-AGÜERO, J. A.; RIVERA, J. R. A. Biophysical and physiological characteristics of nopalitos (*Opuntia* spp., Cactaceae) as influenced by domestication. **Genetic resources and crop evolution**, v. 62, n. 6, p. 927-938, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10722-014-0201-7>

HALSEMA, G. E. V.; VINCENT, L. Efficiency and productivity terms for water management: A matter of contextual relativism versus general absolutism. **Agricultural Water Management**, v. 108, p. 9-15, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.05.016>

HAN, X.; WEI, Z.; ZHANG, B.; LI, Y.; DU, T.; CHEN, H. Crop evapotranspiration prediction by considering dynamic change of crop coefficient and the precipitation effect in back-propagation neural network model. **Journal of Hydrology**, v. 596, 126104, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126104>

HANDRIA, R.; BENABDELOUHAB, T.; LIONBOUI, H.; SALHI, A. Comparative assessment of different reference evapotranspiration models towards a fit calibration for arid and semi-arid areas. **Journal of Arid Environments**, v. 184, 104318, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104318>

HASSAN, S.; INGLESE, P.; GRISTINA, L.; LIGUORI, G.; NOVARA, A.; LOUHAICHI, M.; SORTINO, G. Root growth and soil carbon turnover in *Opuntia ficus-indica* as affected by soil volume availability. **European Journal of Agronomy**, v. 105, p. 104–110, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.012>

HEYDARI, N. Water productivity in agriculture: challenges in concepts, terms and values. **Irrigation and Drainage**, v. 63, n. 1, p. 22-28, 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/ird.1816>

HUANG, X.; HAO, Y., WANG, Y.; WANG, T.; CUI, X.; ZHOU, X. Partitioning of evapotranspiration and its relation to carbon dioxide fluxes in Inner Mongolia steppe.

Journal of Arid Environments, v. 74, n. 12, p. 1616-1623, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.07.005>

IRMAK, S.; KUKAL, M. Disk-till vs. no-till maize grass-and-alfafa-reference single (average) and basal (dual) crop coefficients. **Agricultural Water Management**, v. 226, 105815, 2019a. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105815>

IRMAK, S.; KUKAL, M. S.; MOHAMMED, A. T.; DJAMAN, K. Disk-till vs. no-till maize evapotranspiration, microclimate, grain yield, production functions and water productivity. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 177-195, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.006>

JAMSHID, S.; ZAND-PARSA, S.; KAMGAR-HAGHIGHI, A. A.; SHAHSAVAR, A. R.; NIYOGI, D. Evapotranspiration, crop coefficients, and physiological responses of citrus trees in semi-arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 227, 105838, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105838>

JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; ALVES, H. C. M. N.; SOUZA, M. S.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B. Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. **Journal of Arid Environments**, v. 188, 104464, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104464>

JARDIM, A. M. R. F.; SOUZA, L. S. B.; ALVES, C. P.; ARAÚJO, J. F. N.; SOUZA, C. A. A.; PINHEIRO, A. G.; ARAÚJO, G. G. L.; CAMPOS, F. S.; TABOSA, J. N.; SILVA, T. G. F. Intercropping forage cactus with sorghum affects the morphophysiology and phenology of forage cactus. **African Journal of Ranger & Forage Science**, p. 1-12, 2021b. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.1949749>

KOOL, D.; AGAM, N.; LAZAROVITCH, N.; HEITMAN, J. L.; SAUER, T. J.; BENGAL, A. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 184, p. 56-70, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.003>

LEVIDOW, L.; ZACCARIA, D.; MAIA, R.; VIVAS, E.; TODOROVIC, M.; SCARDIGNO, A. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 84–94, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.012>

LIMA, L. R.; DA SILVA, T. G. F.; DA, A. M.; JARDIM, R. F.; DE SOUZA, C. A. A.; DE QUEIROZ, M. G.; TABOSA, J. N. Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 113–118, 2018a. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p113-118>

LIMA, L. R.; SILVA, T. G. F.; PEREIRA, P. C.; MORAIS, J. E. F.; ASSIS, M. C. S. Productive-economic benefit of forage cactus-sorghum intercropping systems irrigated with saline water. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 1, p. 191–201, 2018b. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n122rc>

MORAES, G. S. de O.; GUIM, A.; TABOSA, J. N.; CHAGAS, J. C. C.; ALMEIDA, M. de P.; FERREIRA, M. de A. Cactus [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw] cladodes and corn silage: How do we maximize the performance of lactating dairy cows reared in semiarid regions? **Livestock Science**, v. 221, p. 133–138, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.01.026>

MORAES, J. E. F.; SILVA, T. G. F.; QUEIROZ, M. G.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N. Hydrodynamic change of the soil-cactus interface, effective actual evapotranspiration and its water efficiency under irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 273-278, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n4p273-278>

NWOKORO, C. C.; KREYE, C.; NECPALOVA, M.; ADEYEMI, O.; BARTHEL, M.; PYPERS, P.; HAUSER, S.; SIX, J. Cassava-maize intercropping systems in southern Nigeria: Radiation use efficiency, soil moisture dynamics, and yields of component crops. **Fields Crop Research**, v.283, p. 108550, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108550>

NYAKUDYA, I. W.; STROOSNIJDER, L. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 280-296, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.024>

OLIVEIRA, J. P. F.; FERREIRA, M. A.; ALVES, A. M. S. V.; MELO, A. C. C.; ANDRADE, I. B.; URBANO, S. A.; SUASSUNA, J. M. A.; BARROS, L. J. A.; MELO, T. T. B. Carcass characteristics of lambs fed spineless cactus as a replacement for sugarcane. **Asian-Australas Journal Animal Science**, v. 31(4), p. 529-536, 2018. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0375>.

PAÇO, T. A.; PAREDES, P.; PEREIRA, L. S.; SILVESTRE, J.; SANTOS, F. L. Crop coefficients and transpiration of a super intensive arbequina olive orchard using the dual K_c approach and the K_{cb} computation with the fraction of ground cover and height. **Water**, v. 11, n. 2, p. 383, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11020383>

PADOVAN, M. P.; BROOK, R. M.; BARRIOS, M.; CRUZ-CASTILLO, J. B.; VILCHEZ-MENDOZA, S. J.; COSTA, A. N.; RAPIDEL, B. Water loss by transpiration and soil evaporation in coffee shaded by *Tabebuia rosea Bertol.* and *Simarouba glauca* dc. compared to unshaded coffee in sub-optimal environmental conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 248, p. 1-14, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.036>

PAREDES, P.; RODRIGUES, G. C.; ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under various irrigation management strategies. **Agricultural Water Management**, v. 135, p. 27-39, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.010>

PAREDES, P.; RODRIGUES, G. J.; PETRY, M. T.; SEVERO, P. O.; CARLESSO, R.; PEREIRA, L. S. Evapotranspiration Partition and Crop Coefficients of Tifton 85 Bermudagrass as Affected by the Frequency of Cuttings. Application of the FAO56 Dual K_c Model. **Water**, v. 10, n. 5, p. 558. 2018. <https://doi.org/10.3390/w10050558>

PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. **Agricultural Water Management**, v. 129, p. 31-43, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.06.018>

PEIXOTO, M. J. A.; CARNEIRO, M. S. S.; AMORIM, D. S.; EDVAN, R. L.; PEREIRA, E. S.; COSTA, M. R. G. F. Características agronômicas e composição química da palma forrageira em função de diferentes sistemas de plantio. **Archivos de Zootecnia**, v. 67, n. 257, p. 35-39, 2018.

PEREIRA, L. S. Water, Agriculture and Food: Challenges and Issues. **Water Resources Management**, v. 31, p. 2985-2999, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1664-z>

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4-20, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>

PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, v. 108, p. 39-51, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; HUNSAKER, D. J.; LÓPEZ-URREA, R.; MOHAMMADI SHAD, Z. Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. **Agricultural Water Management**, v. 243, 106466, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106466>

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; JOVANOVIĆ, N. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual K_c approach. **Agricultural Water Management**, v. 241, 106357, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357>

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; LÓPEZ-URREA, R.; HUNSAKER, D. J.; MOTA, M.; MOHAMMADI SHAD, Z. Standard single and basal crop coefficients for vegetable

crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. **Agricultural Water Management**, v. 243, 106196, 2021a.

PINHEIRO, A. G.; SOUZA, L. S. B.; JARDIM, A. M. R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; ALVES, C. P.; SOUZA, C. A. A.; LEITE, R. M. C.; SILVA, T. G. Lacunas de produtividade e estratégias de cultivo na melhoria da produção de forragem para a região semiárida brasileira – Revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 2403-2426, 2021.

PIOUCEAU, J.; PANFILI, F.; BOIS, G.; ANASTESE, M.; DUFOSSÉ, L.; ARFI, V. Actual evapotranspiration and crop coefficients for five species of three-year-old bamboo plants under a tropical climate. **Agricultural Water Management**, v. 137, p. 15-22, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.02.004>

QUEIROZ, M. G.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA S. M. S.; LIMA, L. R.; ALVES, J. O. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n. 10, p. 931-938, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p931-938>

QUEIROZ, M. G.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SIQUEIRA E SILVA, S. M.; SOUZA, C.A.A.; CARVALHO, H. F. S. Hydro-economic relations of forage cactus cultivated in semiarid environment. **Irriga**, p. 141-154, 2016. <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p141-154>

RALLO, G.; PAÇO, T. A.; PAREDES, P.; PUIG-SIRERA, A.; MASSAI, R.; PROVENZANO, G.; PEREIRA, L. S. Updated single and dual crop coefficients for tree and vine fruit crops. **Agricultural Water Management**, v. 250, 106645, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106645>

RANDOW, R. C. S. V.; TOMASELLA, J.; RANDOW, C. V.; ARAÚJO, A. C.; MANZI, A. O.; HUTJES, R.; KRUIJT, B. Evapotranspiration and gross primary productivity of secondary vegetation in Amazonia inferred by eddy covariance. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 294, 108141, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108141>

ROCHA, R. S.; VOLTOLINI, T. V.; GAVA, C. A. T. Características produtivas e estruturais de genótipos de palma forrageira irrigada em diferentes intervalos de corte. **Archivos de Zootecnia**, v. 66, n. 255, p. 365-373, 2017.

SALVADOR, K. R. S.; JARDIM, A. M. R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; ALVES, C. P.; PINHEIRO, A. G.; PEREIRA, R. C. G.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F. Intensificação de sistemas de produção de palma forrageira por meio de consorciação rotativa com gramíneas, leguminosas e oleaginosas: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 2369-2390, 2021.

SANTOS, A. F.; PEREZ-MARIN, A. M.; SARMENTO, M. I. A. Produtividade da palma forrageira em aleias com *Gliricídia sepium* sob adubação orgânica em diferentes espaçamentos no Semiárido. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 13, n. 3, p. 276–281, 2018.

SANTOS, R.; NEVES, A. L.; PEREIRA, L. G.; VERNEQUE, R.; COSTA, C. T.; TABOSA, J.; SCHERE, C.; GONÇALVES, L. Divergence in agronomic traits and performance of pearl millet cultivars in Brazilian semiarid region. **Grassland Science**, v. 63, p. 118-127, 2017.

SCALISI, A.; MORANDI, B.; INGLESE, P.; LO BIANCO, R. Cladode growth dynamics in *Opuntia ficus-indica* under drought. **Environmental and Experimental Botany**, v. 122, p. 158-167, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.10.003>

SIADAT-JAMIAN, S.; AGHAALIKHANI, M.; SOUFIZADEH, S.; MOKHTASSI-BIDGOLI, A. Qualitative and quantitative response of artichoke to irrigation treatments and planting densities. **Scientia Horticulturae**, n. 253, p. 422-428, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.038>

SILVA, T. G. F.; ARAÚJO PRIMO, J. T.; SILVA, S. M. S.; MOURA, M. S. B.; SANTOS, D. C.; SILVA, M. C.; ARAÚJO, J. E. M. Indicadores de eficiência do uso da água e de nutrientes de clones de palma forrageira em condições de sequeiro no Semiárido brasileiro. **Bragantia**, v. 73, n. 2, 2014a. <https://doi.org/10.1590/brag.2014.017>

SILVA, L. M.; FAGUNDES, J. L.; VIEGAS, P. A. A.; MUNIZ, E. N.; RANGEL, J. H. A.; MOREIRA, A. L.; BACKES, A. A. Produtividade da palma forrageira cultivada em diferentes densidades de plantio. **Ciência Rural**, v. 44, n. 11, 2014b. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20131305>

SILVA, T. G. F.; ARAÚJO PRIMO, J. T.; MORAIS, J. E. F.; DINIZ, W. J. S.; SOUZA, C. A. A.; SILVA, M. C. Crescimento e produtividade de clones de palma forrageira no Semiárido e relações com variáveis meteorológicas. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 2, p. 10-18, 2015a.

SILVA, T. G. F.; ARAÚJO PRIMO, J. T.; MOURA, M. S. B.; SILVA, S. M. S.; MORAIS, J. E. F.; PEREIRA, P. C.; SOUZA, C. A. A. Soil water dynamics and evapotranspiration of forage cactus clones under rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 7, 2015b. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000700001>

SILVA, T. G. F.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B. Agrometeorological research on forage cactus and its advances in Brazil. **Amazonian Journal of Plant Research**, v. 2, p. 45-68, 2017. <https://doi.org/10.26545/b00006x>

SOUSA, D. P.; FERNANDES, T. F. S.; TAVARES, L. B.; FARIAS, V. D. S.; LIMA, M. J. A.; NUNES, H. G. G. C.; COSTA, D. L. P.; ORTEGA-FARIAS, S.; SOUZA, P. J. O. P. Estimation of evapotranspiration and single and dual crop coefficients of acai palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. **Irrigation Science**, v. 39, p. 5-22, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00710-2>

SOUZA, M. S.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, L. S. B.; JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, G. I. N.; ARAÚJO, G. G. L.; CAMPOS, F. S.; LEITE, M. L. M.; TABOSA, J. N.; SILVA, T. G. F. Forage yield, competition and economic benefit of intercropping cactus and millet with mulch in a semi-arid environment. **African Journal Range & Forage**, p. 1-13, 2022. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.2016967>

SUÁREZ, J. C.; ANZOLA, J. A.; CONTRERAS, A. T.; SALAS, D. L.; VANEGAS, J. I.; URBAN, M. O.; BEEBE, S. E.; RAO, I. M. Photosynthetic and grain yield responses to intercropping of two common bean lines with maize under two types of fertilizer applications in the colombian amazon region. **Scientia Horticulturae**, v.301, p. 111108, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111108>

TEIXEIRA, G. C. S.; STONE, L. F.; HEINEMANN, A. B. Eficiência do uso da radiação solar e índices morfofisiológicos em cultivares de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 1, p. 9-17, 2015.

TURNER, N. C. Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming systems. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 407, p. 2413-2425, 2004. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh154>

UNKOVICH, M.; BALDOCK, J.; FARQUHARSON, R. Field measurements of bare soil evaporation and crop transpiration, and transpiration efficiency, for rainfed grain crops in Australia – A review. **Agricultural Water Management**, v. 205, p. 72-80, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.016>

WANG, Y.; CAI, H.; YU, L.; PENG, X.; XU, J.; WANG, X. Evapotranspiration partitioning and crop coefficient of maize in dry semi-humid climate regime. **Agricultural Water Management**, v. 236, 106164, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106164>

WANG, Y.; HORTON, R.; XUE, X.; REN, T. Partitioning evapotranspiration by measuring soil water evaporation with heat-pulse sensors and plant transpiration with sap flow gauges. **Agricultural Water Management**, v. 252, 106883, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106883>

WANG, Y.; OSCHNER, T.; HEITMAN, J.; HORTON, R.; XUE, X.; REN, T. Weighing Lysimeter Data Confirm the Accuracy and Precision of the Heat-Pulse Technique for Measuring Daily Soil Evaporation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, p. 1074-1078, 2017. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.02.0049n>

WANG, Z.; WU, P.; ZHAO, X.; GAO, Y.; CHEN, X. Water use and crop coefficient of the wheat-maize strip intercropping system for an arid region in northwestern China. **Agricultural Water Management**, v. 161, p. 77-85, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.012>

YIN, W.; CHAI, Q.; ZHAO, C.; YU, A.; FAN, Z.; HU, F.; FAN, H.; GUO, Y.; COULTER, J. A. Water utilization in intercropping: A review. **Agricultural Water Management**, v. 241, 106335, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106335>

YIN, W.; CHEN, G.; FENG, F.; GUO, Y.; HU, F.; CHEN, G.; ZHAO, C.; YU, A.; CHAI, Q. Straw retention combined with plastic mulching improves compensation of intercropped maize in arid environment. **Field Crops Research**, v. 204, p. 42–51, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.005>

ZHANG, Y.; YIN, J.; GUO, Z.; LI, J.; WANG, R. Simulation of soil water balance and crop productivity of long-term continuous maize cropping under high planting density in rainfed agroecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 312, 108740, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108740>

ZHANG, Y.; ZHAO, Z.; ZHENG, J. CatBoost: A new approach for estimating daily reference crop evapotranspiration in arid and semi-arid regions of Northern China. **Journal of Hydrology**, v. 588, 125087, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125087>

CAPÍTULO II

SISTEMAS DE PRODUÇÃO COM PALMA FORRAGEIRA E MILHETO EM
AMBIENTE SEMIÁRIDO: PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO,
COEFICIENTES DA CULTURA E INDICADORES DE EFICIÊNCIA

SISTEMAS DE PRODUÇÃO COM PALMA FORRAGEIRA E MILHETO EM AMBIENTE SEMIÁRIDO: PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTES DA CULTURA E INDICADORES DE EFICIÊNCIA

Resumo: Melhorar o uso dos recursos hídricos na prática de irrigação requer o conhecimento da utilização da água pelas culturas em diferentes condições de cultivo. Objetivou-se quantificar parâmetros de consumo de água e a eficiência do uso dos recursos naturais em sistemas de cultivo com palma e milho em ambiente semiárido. A palma ‘Orelha de Elefante Mexicana’ e o milho ‘IPA Bulk-1-BF’ foram submetidos a seis arranjos de cultivo: palma exclusiva sem (CNM) e com cobertura (CWM); milho exclusivo sem (MNM) e com cobertura (MWM); consórcio palma-milho sem (CMNM) e com cobertura (CMWM). Nos sistemas com cobertura morta foi utilizado 17,6 Mg ha⁻¹ de matéria seca de *Urochloa mosambicensis*. Dados de crescimento e produtividade das culturas, e de umidade do solo foram coletados. Determinou-se a evapotranspiração (ET_c) e transpiração (T) das culturas, a evaporação de água do solo (E), o coeficiente da cultura simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e), a eficiência do uso da água (EUA), de nutrientes (EUN) e da radiação (EUR). Calculou-se os indicadores de eficiência biológica e habilidade competitiva para os consórcios. A ET_c (mm dia⁻¹) foi maior em MWM (4,69), MNM (3,60) e CMWM (3,81). Pouca variação nos valores de ET_c, T e E foi verificada entre CNM e CWM, diferente do observado entre MNM e MWM, onde a cobertura influenciou no comportamento da T e E. Os consórcios reduziram a E em relação aos monocultivos de palma (8%) e milho (58%). Em média, o K_c foi maior em MWM (0,98), CWM (0,69) e CMWM (0,88), em relação a MNM (0,75), CNM (0,63) e CMNM (0,48). Os consórcios foram mais eficientes na EUA (44%) e EUR (2,28 g MJ⁻¹), sem diferenças na EUN. Conclui-se que, o consórcio palma-milho é uma boa alternativa para uma agricultura mais resiliente em ambientes semiáridos, sobretudo, quando o uso da cobertura for possível, pois gera melhor diversidade alimentar e exibe maior eficiência no uso dos recursos naturais. Os resultados deste estudo são muito importantes para a gestão dos recursos hídricos no semiárido, pois favorecem o conhecimento das necessidades hídricas dessas culturas em diferentes sistemas de produção, e como a adoção de práticas resilientes pode melhorar a eficiência do uso dos recursos naturais disponíveis.

Palavras-chave: Cobertura morta, consórcio, evaporação, *Opuntia stricta*, transpiração.

SISTEMAS DE PRODUÇÃO COM PALMA FORRAGEIRA E MILHETO EM AMBIENTE SEMIÁRIDO: PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTES DA CULTURA E INDICADORES DE EFICIÊNCIA

Abstract: Improving the use of water resources for irrigation requires a knowledge of crop water use under different cropping conditions. The aim of this study was to quantify the parameters of water consumption and the use efficiency of natural resources in cropping systems with forage cactus and millet in a semi-arid environment. The forage cactus 'Orelha de Elefante Mexicana' and millet 'IPA Bulk-1-BF' were submitted to six cropping arrangements: single cactus with mulch (CWM), single cactus with no mulch (CNM), single millet with mulch (MWM), single millet with no mulch (MNM), cactus-millet intercropping system with mulch (CMWM), and cactus-millet intercropping system with no mulch (CMNM). In systems with mulch, 17.6 Mg ha⁻¹ of dry matter of *Urochloa mosambicensis* was used. Data on crop growth, crop production, and soil moisture were collected, and the following were determined: crop evapotranspiration (ET_c), crop transpiration (T), soil water evaporation (E), single crop coefficient (K_c), dual crop coefficient (K_{cb} and K_e), water use efficiency (WUE), nutrient use efficiency (NUE) and radiation use efficiency (RUE). Biological efficiency and competitive ability indicators were calculated for the intercropped systems. The ET_c (mm day⁻¹) was higher under MWM (4.69), MNM (3.60) and CMWM (3.81). There was little variation in the values of ET_c, T or E between CNM and CWM, unlike between MNM and MWM, where the mulch influenced the behaviour of T and E. Intercropping reduced E in relation to the single crops of cactus (8%) and millet (58%). On average, K_c was higher under MWM (0.98), CWM (0.69) and CMWM (0.88), compared to MNM (0.75), CNM (0.63) and CMNM (0.48). The intercrops were more efficient under WUE (44%) and RUE (2.28 g MJ⁻¹), with no difference for NUE. It can be concluded that the cactus-millet intercropping system is a good alternative for more-resilient agriculture in semi-arid environments, especially when the use of mulch is possible, as it generates better nutritional diversity, with greater efficiency in the use of natural resources. The results of this study are very important for the management of water resources in the semiarid region, as they favor the knowledge of the water needs of these cultures in different production systems, and how the adoption of resilient practices can improve the efficiency of the use of available natural resources.

Keywords: Intercropping, evaporation, mulch, *Opuntia stricta*, transpiration

CAPÍTULO II: SISTEMAS DE PRODUÇÃO COM PALMA FORRAGEIRA E MILHETO EM AMBIENTE SEMIÁRIDO: PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTES DA CULTURA E INDICADORES DE EFICIÊNCIA

1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) é um importante processo envolvido nos sistemas ecohidrológicos em todo o mundo. A ET compreende a evaporação da água do solo (E) e a transpiração da planta (T), que por sua vez, podem ser afetadas pelas práticas agronômicas adotadas dentro dos sistemas agrícolas (PADOVAN et al., 2018; IRMAK & KUKAL, 2019; WANG et al., 2021), por exemplo, a consorciação de culturas (FAN et al., 2020; AI et al., 2021) e o uso de cobertura sobre o solo (DING et al., 2018; YIN et al., 2020; CAO et al., 2021). O consórcio pode alterar a dinâmica da ET e de seus componentes, devido ao maior consumo de água pelas culturas (WANG et al., 2015), ao passo que a cobertura pode reduzir a E em consequência do sombreamento do solo (YIN et al., 2020).

Melhorar a gestão dos recursos hídricos na prática de irrigação requer, entre outros fatores, o conhecimento sobre o uso da água pelas culturas e suas respostas agronômicas sob distintas condições de cultivo (HAN et al., 2021). Nesse sentido, os coeficientes da cultura simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e) são importantes indicadores para avaliação do uso da água pelas plantas (WANG et al., 2015; PEREIRA et al., 2021). O K_c indica a influência da planta na ET, enquanto o K_{cb} e K_e representam a transpiração da planta e a evaporação do solo, respectivamente (PEREIRA et al., 2021).

A estimativa precisa da ET e a determinação dos K_c , K_{cb} e K_e podem auxiliar os produtores agrícolas na redução da quantidade de água aplicada na irrigação e, assim, melhorar a eficiência do uso da água do sistema de produção, visto o cenário atual e futuro de escassez dos recursos hídricos (ALBERTO et al., 2014; HAN et al., 2021). Além disso, em regiões áridas e semiáridas, onde as condições climáticas impõem forte influência sobre as atividades agropecuárias, a utilização de espécies adaptadas, como a palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) e o milheto forrageiro [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.], e a adoção de práticas como a consorciação e a cobertura morta permitem a implementação de sistemas de produção mais resilientes, que sejam mais eficientes na mitigação dos efeitos adversos do clima e no uso dos recursos disponíveis (CARVALHO et al., 2017; LIMA et al., 2018a, b; SOUZA et al., 2022).

Alguns estudos mostraram os requisitos de água das culturas do milho e da palma forrageira cultivadas em sistema exclusivo. Por exemplo, Queiroz et al. (2016) observaram uma ET média igual a 2,59 mm dia⁻¹ e K_c de 0,52 para *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. ao longo de 380 dias de cultivo, sob condições irrigadas no semiárido brasileiro. Divíncula et al. (2019), observaram valores de ET diária e de K_c iguais a 4,22 mm e 0,72, respectivamente, para *Opuntia ficus-indica* L. (Mill.) durante um ciclo de cinco meses. Para as condições semiáridas do mediterrâneo, Consoli et al. (2013) estudando a *Opuntia ficus-indica* L. (Mill.) irrigada, relataram valores médios de ET total iguais a 286 mm e 252 mm durante duas safras de produção, respectivamente, com ET diária média de 2,5 mm e K_c médio de aproximadamente 0,40. Para o milho forrageiro, Rao et al. (2012) relataram valores de ET variando de 1,7 a 5,31 mm dia⁻¹ ao longo dos estágios de crescimento da cultura, para as condições semiáridas da Índia. Esses autores ainda relataram valores de K_c inicial, K_c médio e K_c final iguais a 0,33, 0,73 e 0,42, respectivamente. Em sistema consorciado palma/sorgo, Alves et al. (2019) obtiveram valores médios de 3,0 mm dia⁻¹ de ET, sendo os K_c do consórcio iguais a 0,40, 0,68, 0,90 e 0,52 para as fases I, II, III e IV de desenvolvimento da cactácea, respectivamente.

Além do conhecimento prévio da exigência hídrica das culturas é essencial avaliar a eficiência do sistema de produção, tanto em termos de gestão de água como em relação ao seu benefício econômico-produtivo (FERNÁNDEZ et al., 2020). Logo, é indispensável a adoção de indicadores agrometeorológicos que avaliem a eficiência do uso da água (EUA), a produtividade da água da cultura (PA_c) e da irrigação (PA_i) e a produtividade econômica da água da cultura (PEA_c) e da irrigação (PEA_i) (FERNÁNDEZ et al., 2020). Além disso, em sistemas consorciados, a utilização de índices biológicos auxilia no entendimento da habilidade competitiva das culturas e os benefícios econômicos em relação a sistemas exclusivos (JARDIM et al., 2021a; ALVES et al., 2022; SOUZA et al., 2022), sendo outra ferramenta para o planejamento e tomada de decisão dentro da propriedade.

Entendemos que a adoção de práticas como o consórcio e a cobertura morta pode favorecer o melhor uso da água e de outros recursos naturais (e.g., radiação e nutrientes) em sistemas de cultivo com palma e milho em ambiente semiárido. Além disso, quando comparado ao sistema de cultivo único, o rendimento dessas culturas pode ser superior, o que resulta em maior retorno econômico-produtivo para os produtores. Considerando a escassez de informações na literatura sobre ET_c, T, E e K_c, e indicadores de eficiência para a palma e milho, sobretudo, quando submetidas à diferentes condições de cultivo,

objetivou-se com esse estudo quantificar parâmetros de consumo de água e a eficiência do uso dos recursos naturais em sistemas de cultivo com palma e milho em ambiente semiárido.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi realizado no Centro de Referência Internacional de Estudos Agrometeorológicos de Palma e outras Plantas Forrageiras – CentroRef, localizado na Unidade Acadêmica de Serra Talhada – UFRPE/UAST, em Serra Talhada, PE, Brasil (7°57'S, 38°17'O e altitude 431 m). A região apresenta um clima do tipo BShw', caracterizado como semiárido quente (ALVARES et al., 2013), com precipitação pluvial média de 642 mm ano⁻¹, temperatura média do ar de 24,8°C, umidade relativa do ar em torno de 62%, e demanda atmosférica anual acima de 1800 mm (PEREIRA et al., 2015a; SOUZA et al., 2022).

O solo da área experimental é classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico (SANTOS, 2018). Os valores médios dos atributos físicos e químicos do solo medidos na profundidade de 0,0-0,40 m foram: pH (água) = 6,15; P (Mehlich 1) = 161,5 mg dm⁻³; condutividade elétrica do extrato de saturação do solo a 25° C = 0,29 mS cm⁻¹; K⁺ = 12,85 cmol_c dm⁻³; Na⁺ = 1,28 cmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 3,2 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 1,85 cmol_c dm⁻³; soma de bases = 19 cmol_c dm⁻³; capacidade de troca de cátions = 19,6 cmol_c dm⁻³; saturação de bases = 98%; densidade aparente = 1,40 kg dm⁻³; densidade da partícula = 2,51 kg dm⁻³; porosidade total = 44,55%; areia = 812 g kg⁻¹; silte = 154 g kg⁻¹ e argila = 34 g kg⁻¹. O conteúdo de água do solo no ponto de murcha permanente (θ_{fc}) e na capacidade de campo (θ_{wp}) foi igual a 0,08 m³ m⁻³ e 0,20 m³ m⁻³, respectivamente.

2.2 Material vegetal, implantação do experimento e tratamentos aplicados

Foram utilizados o clone de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana – OEM [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] (Fig. 1A) e o milho forrageiro [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] cv. IPA Bulk-1-BF (Fig. 1A). Para o presente estudo, a palma se encontrava no seu terceiro ciclo produtivo, iniciado em janeiro e finalizado em junho de 2020 (159 dias de cultivo). O espaçamento de plantio adotado foi 1,6 x 0,2 m (31250 plantas ha⁻¹) (Fig. 1B). Em fevereiro de 2020 foi realizado o semeio do milho em sulcos contínuos de

aproximadamente 0,03 m de profundidade, com distância de 1,6 m entre fileiras (Fig. 2B). Aos 20 dias após o semeio (DAS) foi feito o desbaste das plântulas deixando em campo 20 plantas por metro linear (125000 plantas ha⁻¹). O ciclo do milho foi finalizado em maio de 2020 (72 dias de cultivo).

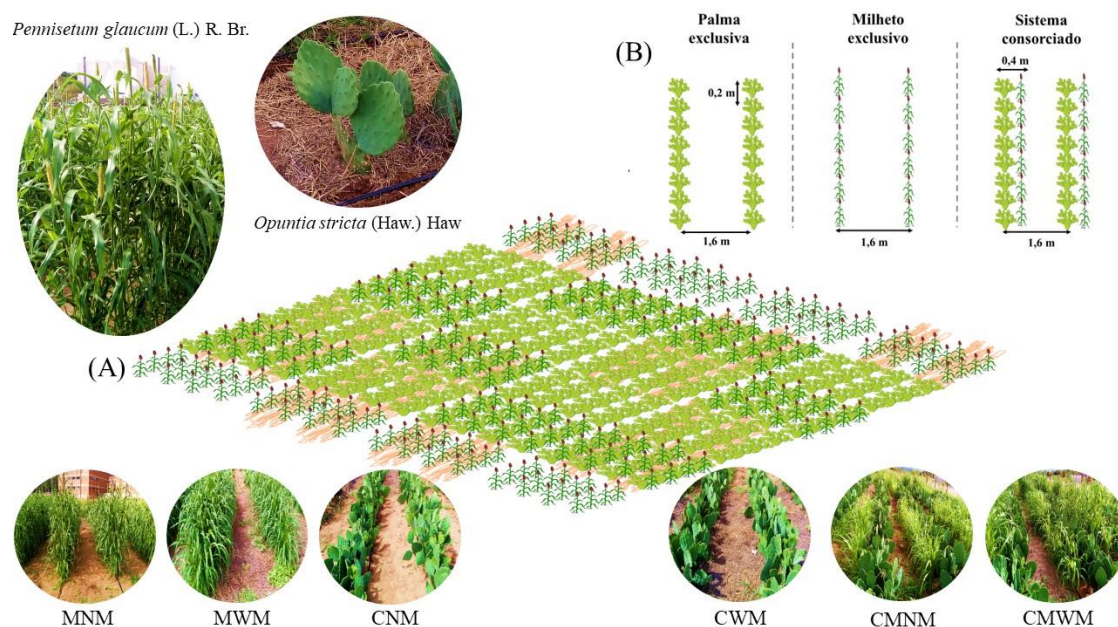


Figura 1. Representação da área experimental, espécies vegetais utilizadas, sistemas de produção (A) e espaçamentos utilizados nos sistemas de produção (B).

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, sendo os tratamentos compostos por seis sistemas de cultivo, com quatro repetições: palma exclusiva sem cobertura morta (CNM); palma exclusiva com cobertura morta (CWM); milho exclusivo sem cobertura morta (MNM); milho exclusivo com cobertura morta (MWM); consórcio palma-milho sem cobertura morta (CMNM) e consórcio palma-milho com cobertura morta (CMWM). O padrão de consórcio utilizado foi de fileira simples, onde para cada fileira de palma existia uma fileira de milho (Fig. 1A). Os tratamentos foram distribuídos em 24 parcelas experimentais de 25,6 m² cada, constituídas de quatro fileiras com 4 m de comprimento. Nas parcelas com consórcio, o milho distanciava-se 0,4 m das fileiras de palma (Fig. 1B). Foi considerada como parcela útil as duas fileiras centrais, exceto uma planta de cada extremidade, totalizando uma área de 11,52 m². Para os sistemas com cobertura morta foram utilizados 17,6 Mg ha⁻¹ de matéria seca de capim-corrente (*Urochloa mosambicensis*), proveniente de capina manual realizada na área experimental. Em média, a altura da cobertura sobre o solo foi de 0,20 m. O material

apresenta um coeficiente de decomposição (k) médio de $0,0045 \text{ dia}^{-1}$, o que favorece uma maior taxa de decomposição ao longo do ciclo (SOUZA et al., 2022).

O experimento foi irrigado por meio de um sistema de gotejamento, com vazão de $1,25 \text{ L h}^{-1} \text{ emissor}^{-1}$ a uma pressão de serviço de 100 kPa, uniformidade de aplicação de água de 93% e intensidade de aplicação de $3,9 \text{ mm h}^{-1}$. A água utilizada foi proveniente de um poço artesiano classificada como C3S1 (RICHARDS, 1954), e apresentou as seguintes características: condutividade elétrica (CEa) = $1,62 \text{ dS m}^{-1}$, pH = 6,84, $\text{Na}^+ = 168,66 \text{ mg L}^{-1}$ e $\text{K}^+ = 28,17 \text{ mg L}^{-1}$.

Com o objetivo de atender a demanda hídrica de ambas as culturas dos sistemas, considerou-se 120% da evapotranspiração da cultura (ET_c) da palma forrageira para a aplicação da lâmina de irrigação. Para isso, a ET_c foi obtida pelo produto da evapotranspiração de referência (ET_0) e o coeficiente de cultura (K_c) igual a 0,52 (QUEIROZ et al., 2016). A ET_0 foi estimada pelo método de Penman-Monteith parametrizado no Boletim da FAO-56 (ALLEN et al., 1998). Para o cálculo da ET_0 foram usados os dados diários das variáveis meteorológicas coletados por meio de uma estação automática, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET) a 50 m da área experimental.

Para garantir uma condição de pleno crescimento e desenvolvimento às plantas, realizou-se, quando necessário, o controle de plantas espontâneas, de pragas e doenças. A adubação química foi realizada com base na exigência da palma forrageira, com a aplicação de 525 kg ha^{-1} de NPK na formulação 14-00-18 + 16S, conforme Souza et al., (2022).

2.3 Características morfológicas e produtivas das culturas

As características morfológicas das culturas foram monitoradas a partir de análises biométricas realizadas ao longo do período experimental. Para a palma forrageira foram obtidos o número total de cladódios (NTC), comprimento, largura, espessura e perímetro dos cladódios, conforme Araújo Júnior et al. (2021a). De posse dos dados, procedeu-se com a estimativa da área (SILVA et al., 2014a) e do índice de área dos cladódios (PINHEIRO et al., 2014). Para o milheto foram obtidos dados de altura (AP) e largura (LP) da planta, número de folhas vivas (FV) e folhas mortas (FM), espessura do colmo (EC), comprimento e largura da folha 3+ (CF e LF, respectivamente) e da panícula (CPan

e LPan, respectivamente) (SOUZA et al., 2021). Os valores de CF e LF foram usados para estimar a área foliar e o índice da área foliar da cultura, conforme Shih et al. (1981).

As fases fenológicas do milho foram determinadas com base nos critérios adotados por Ullah et al. (2017). Já as fenofases da palma forrageira foram definidas com base na taxa de emissão dos cladódios. Para isso, foi realizado o ajuste de modelos sigmóides de três parâmetros entre o NTC e os graus dias acumulados (GDA, °Cdia); esse último obtido conforme Araújo Júnior et al. (2021a). As taxas foram calculadas a partir da derivada dos modelos obtidos ($dNTC/dt$). Considerou-se como a primeira fenofase (P1), o início da taxa de emissão até o momento em que a planta atingiu 50% do NTC. Após esse ponto, considerou-se o início da segunda fenofase (P2), que perdurou até o momento da máxima emissão de cladódio, que por sua vez, indica o início da fenofase três (P3) da planta. O final da P3 é considerado quando a $dNTC/dt$ atingiu 50% do NTC posterior ao pico de emissão, dando início a fenofase 4 (P4), que tem duração até o final do ciclo cultura.

A produtividade em biomassa fresca (FMY, $Mg\ ha^{-1}$) e seca (DMY, $Mg\ ha^{-1}$) foram obtidas no momento da colheita, conforme Souza et al. (2022). Na ocasião, as plantas presentes nas parcelas úteis foram contabilizadas para determinação da densidade final de plantas. Para o milho, a colheita ocorreu quando as plantas estavam em estágio pastoso dos grãos (ULLAH et al., 2017). Devido a uniformidade das plantas presentes nas parcelas úteis, 10 plantas foram selecionadas, cortadas a 0,10 m do solo e pesadas (massa fresca). Dessas plantas, três foram fracionadas (folhas verdes e secas, colmo, panícula e grãos), pesadas e colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 55 °C, para obtenção da massa seca. O conteúdo de matéria seca (DMC) foi estimado pela razão entre a massa seca e fresca das plantas. Para a palma, todas as plantas da parcela útil foram cortadas a partir dos cladódios de segunda ordem, e pesadas. Três cladódios representativos foram pesados (massa fresca), fracionados e acomodados em estufa de ventilação forçada de ar a 55 °C até a obtenção da massa seca constante. A razão entre a massa seca e a massa fresca dos cladódios resultou no DMC. Considerando a capacidade da cultura em armazenar água em seus cladódios, que por sua vez, reflete na FMY, foi estimado o total de água retida na planta (ARP, litros por planta⁻¹), conforme Morais et al. (2017). A partir das amostras de biomassa seca determinou-se as concentrações de macronutrientes ($g\ kg^{-1}$): fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), enxofre (S); micronutrientes ($g\ kg^{-1}$): cobre (Cu^{2+}), ferro (Fe^{2+}), manganês (Mn^{2+}), zinco (Zn^{2+}); íon sódio ($mg\ kg^{-1}$): sódio (Na^+) conforme metodologia de Silva e Queiroz (2005).

2.4 Evapotranspiração e coeficientes da cultura

A evapotranspiração (ET) foi determinada pelo resíduo do método simplificado do balanço de água no solo (BAS), conforme a Eq. 1 (LIBARDI, 2005).

$$-ET = P + I \pm Q - R - \Delta A \quad (1)$$

em que, P é a precipitação pluvial (mm); I é a irrigação (mm); ET é evapotranspiração (mm); Q é o fluxo vertical de água no solo (mm); R é o escoamento superficial (mm); e ΔA é a variação do armazenamento de água no solo (mm), para a camada controle de 0,40 m.

O fluxo vertical de água no solo (Q), podendo ser positivo (ascensão capilar) ou negativo (drenagem profunda), foi calculado a partir da Eq. de Darcy-Buckingham, conforme demonstrado na Eq. 2 (LIBARDI, 2005).

$$Q = -K(\theta) \times \frac{\Delta \Psi t}{\Delta z} \quad (2)$$

em que, $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo (mm d^{-1}) e $\frac{\Delta \Psi t}{\Delta z}$ é o gradiente do potencial total de água no solo (m).

O R foi obtido a partir do ajuste da curva de regressão polinomial de grau 2 entre os dias que houve precipitação e o volume de água escoado. Para tal, calhas de 1 m^2 foram instaladas na área experimental para captação do volume de água (litros). A umidade volumétrica do solo foi monitorada com o auxílio do sensor capacitivo, modelo Diviner 2000® Sentek Pty Ltd., Austrália, anteriormente calibrado conforme a metodologia de Araújo Primo et al. (2015). As leituras foram realizadas três vezes por semana, sempre antes das irrigações, em tubos de acesso instalados a uma profundidade de 0,90 m nas parcelas experimentais. As leituras foram realizadas a cada 0,10 m, até a profundidade de 0,70 m do solo, sendo iniciadas após o desbaste do milho (i.e., 20 DAS). A ΔA foi obtida pela diferença entre o armazenamento final e inicial de cada período avaliado (i.e., 20 períodos de sete dias cada). A condutividade hidráulica e o potencial total de água no solo foram obtidos a partir do método do perfil instantâneo (LIBARDI et al., 1980).

O coeficiente de cultura simples (K_c) foi obtido a partir da razão entre a ET_c e ET_0 , conforme o boletim da FAO-56 (ALLEN et al., 1998):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (3)$$

em que, ET_c é a evapotranspiração, em mm dia^{-1} , e ET_o é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

O K_c duplo foi obtido a partir da separação dos componentes transpiração (K_{cb}) e a evaporação do solo (K_e). Para tal, a evapotranspiração foi particionada em transpiração (T) (Eq. 4) e evaporação (E) (Eq. 5) e, o K_{cb} e K_e foram calculados pelas Eqs. 6a e 6b, respectivamente.

$$T = ET_c \cdot [1 - \exp^{-k \times IAF}] \quad (4)$$

$$E = ET_c - T \quad (5)$$

$$K_{cb} = \frac{T}{ET_o} \quad (6a)$$

$$K_e = \frac{E}{ET_o} \quad (6b)$$

em que, T é a transpiração da cultura (mm); k é o coeficiente de extinção luminosa; IAF é o índice de área foliar, que no caso da palma assume-se índice de área do cladódio (IAC), em $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$; E é a evaporação da água do solo (mm). Os valores de k para a palma em monocultivo, milho em monocultivo e consórcios palma-milho foram 0,32; 0,33 e 0,32, respectivamente, conforme Leite et al. (2017).

A curva do K_c foi determinada a partir do ajuste de modelos Gaussianos de três parâmetros gerados de regressões entre o K_c observado e os dias de cultivo. Para a palma forrageira, a taxa de emissão de cladódios foi utilizada para avaliar o desenvolvimento da planta, enquanto para o milho foi realizado a divisão do período de crescimento da cultura em quatro estágios (i.e., inicial, desenvolvimento da cultura, estágio intermediário e final) baseada em sua fenologia. Após determinar o comprimento de cada estágio foi realizada a identificação do K_c inicial, K_c médio e K_c final (ALLEN et al., 1998).

2.5 Indicadores de eficiência do uso da água, radiação e nutrientes

A eficiência do uso da água (EUA, $\text{m}^{-3} \text{m}^{-3}$), a produtividade de água da cultura (PA_c , Mg m^{-3}) e a produtividade de água de irrigação (PA_i , Mg m^{-3}) foram calculadas para as condições estudadas, a partir das Eqs. 7, 8 e 9, respectivamente (FERNÁNDEZ et al., 2020).

$$EUA = \frac{ET_c}{P + I} \quad (7)$$

$$PA_c = \frac{Y}{\sum(ET_c)} \quad (8)$$

$$PA_i = \frac{Y}{\sum(I)} \quad (9)$$

em que, ET_c é a evapotranspiração da cultura (m^3); P é a precipitação pluvial total ao longo do período experimental (m^3); I é a irrigação total ao longo do período experimental (m^3); Y é a produtividade da cultura em base fresca ($Mg\ ha^{-1}$).

Para determinar a eficiência do uso da radiação (EUR, $g\ MJ^{-1}$) das culturas nos diferentes sistemas produtivos, considerou-se a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) como 44% da radiação solar global (R_g) ($PAR = R_g \times 0,44$) (AKITSU et al., 2022). Em seguida, a fração da PAR (fPAR) foi calculada a partir da Eq. de Beer (Eq. 10) (FERREIRA JUNIOR et al., 2014), e posteriormente, utilizada para a estimativa da PAR interceptada pelas culturas (PAR_{inter} , MJ), obtida pelo produto da fPAR e R_g . A EUR foi determinada conforme a Eq. 11.

$$fPAR = 1 - \exp(-k \times IAF) \quad (10)$$

em que, k é o coeficiente de extinção luminosa, IAF é o índice de área foliar, que no caso da palma assume-se índice de área do cladódio (IAC) ($m^2\ m^{-2}$).

$$EUR = \frac{Y}{PAR_{inter}} \quad (11)$$

onde, Y é a produtividade em matéria seca da cultura ($g\ ha^{-1}$).

A eficiência do uso de nutrientes ($EUN_{(w)}$, $kg\ ha^{-1}\ m^{-3}$), considerada como a capacidade em que a planta tem em absorver os nutrientes presentes na solução do solo em função da quantidade de água consumida, foi obtida a partir da concentração dos nutrientes presentes na planta e de sua biomassa seca acumulada, conforme Silva et al. (2014b) (Eq. 12).

$$EUN_{(w)} = \frac{Y \times Nu}{\sum(ET_c)} \quad (12)$$

em que, Y é a produtividade em matéria seca da cultura ($kg\ ha^{-1}$), w é o nutriente avaliado, Nu é a concentração do nutriente na amostra vegetal ($g\ kg^{-1}$), e ET é a evapotranspiração da cultura ($m^3\ ha^{-1}$).

O benefício econômico da adoção da irrigação no sistema produtivo com palma e milho foi avaliado por meio da produtividade econômica de água da cultura (PEA_c , $US\$ m^{-3}$) (Eq. 13) e a produtividade econômica da água de irrigação (PEA_i , $US\$ m^{-3}$) (Eq. 14) (FERNÁNDEZ et al., 2020).

$$PEA_c = \frac{LU}{\sum(ET_c)} \quad (13)$$

$$PEA_i = \frac{LU}{\sum(I)} \quad (14)$$

em que, LU é o lucro obtido por área, em US\$ ha⁻¹, considerando os custos para implantação dos sistemas produtivos (FERNÁNDEZ et al., 2020) e a venda de forragem (i.e., valores da tonelada de palma e milho iguais a US\$ 21,04 e US\$ 52,60, respectivamente, com base no comércio local), ET_c é a evapotranspiração da cultura (m³ ha⁻¹), e I é a irrigação acumulada ao longo do ciclo (m³).

2.6 Índices de eficiência biológica e benefícios econômicos do sistema consorciado

A eficiência biológica dos sistemas consorciados foi obtida a partir da determinação da razão equivalente de terra (LER), razão de equivalência área-tempo (ATER), coeficiente de equivalência de terra (LEC) e do índice de produtividade do sistema (SPI), conforme Eqs. 15, 16, 17 e 18, respectivamente (YILMAZ et al., 2015; DINIZ et al., 2017; AMANULLAH et al., 2020; JARDIM et al., 2021a; SOUZA et al., 2022; ALVES et al., 2022).

$$LER = \frac{Y_{cm}}{Y_{cc}} + \frac{Y_{mc}}{Y_{mm}} \quad (15)$$

em que, Y_{cm} e Y_{mc} são a produtividade da palma e do milho no sistema consorciado, respectivamente, Y_{cc} e Y_{mm} são a produtividade da palma e do milho no sistema exclusivo, respectivamente. Quando LER > 1, o sistema de consórcio palma-milho oferece vantagem produtiva em relação ao sistema exclusivo; se LER = 1, não existe vantagem, e se LER < 1, não há vantagem em utilizar o consórcio (ALVES et al., 2022; SOUZA et al., 2022).

$$ATER = \frac{(LER_c \times t_c) + (LER_m \times t_m)}{T_{cm}} \quad (16)$$

em que, LER_c e LER_m são as eficiências de uso parcial da terra da palma e do milho, respectivamente, t_c e t_m são as durações dos ciclos da palma e do milho, respectivamente, em dias, e T_{cm} é o tempo total do sistema consorciado, em dias. Se ATER > 1 existe vantagem produtiva; ATER = 1 indica não haver vantagem, e ATER < 1 há desvantagem (DINIZ et al., 2017).

$$LEC = LER_c \times LER_m \quad (17)$$

se o sistema consorciado palma-milheto apresentar LEC superior a 0,25, há vantagem produtiva em sua adoção, pois o mínimo de produção é de 25% (DINIZ et al., 2017).

$$SPI = \left(\frac{Y_{cc}}{Y_{mm}} \right) \times Y_{mc} + Y_{cm} \quad (18)$$

em que, o SPI padroniza a produtividade da cultura secundária do sistema (i.e., milho) em relação à palma, considerada no presente estudo a cultura principal.

O benefício econômico (US\$ ha⁻¹) foi analisado com base no índice de vantagem monetária (MAI), conforme Eq. 18 (SOUZA et al., 2022).

$$MAI = NR \times \frac{LER - 1}{LER} \quad (18)$$

em que, NR é a receita líquida (US\$ ha⁻¹) considerando os custos para implantação dos sistemas produtivos e a venda de forragem (i.e., valores da tonelada de palma e milho, em matéria fresca iguais a US\$ 21,04 e US\$ 52,60, respectivamente, baseado no comércio local).

2.7 Análise estatística

Os dados de produtividade, indicadores de eficiência do uso da água, radiação e nutrientes, e os índices de eficiência biológica foram submetidos a teste de normalidade (Shapiro-Wilk test) e homocedasticidade a 5% de significância (Oneill e Mathews test). Atendendo aos pressupostos, procedeu-se com teste de análise de variância e, quando significativos, realizou-se o teste de média de Tukey a 5% de probabilidade. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados com o pacote Exp.des.pt (FERREIRA et al., 2018) do software R (R CORE TEAM, 2019).

3. RESULTADOS

3.1 Condições ambientais, irrigação e umidade do solo

Os valores diários de precipitação pluvial, irrigação, ET₀, umidade do solo, radiação solar (R_s) e temperatura do ar (Temp.) são apresentados na Fig. 2. A precipitação pluvial acumulada foi de 975,8 mm, sendo os meses de março e abril os mais chuvosos, com 438,2 e 207,2 mm, respectivamente, correspondendo a 65% da lâmina total do período. A lâmina de irrigação aplicada foi igual a 165,96 mm, que somada à precipitação, resultou em 1141,76 mm de água recebida pelos sistemas. A ET₀ variou de 1,73 a 6,99 mm dia⁻¹, com média de 4,35 mm dia⁻¹. Os valores de umidade do solo (θ) na camada de 0-40 cm

variaram de 0,095 a 0,20 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Ao longo do período estudado, a média diária de SR foi 19 MJ m^{-2} . Os valores médios da Air Temp. mínima e máxima foram iguais a 20,5 e 29,45 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente, com média igual a 26,19 $^{\circ}\text{C}$.

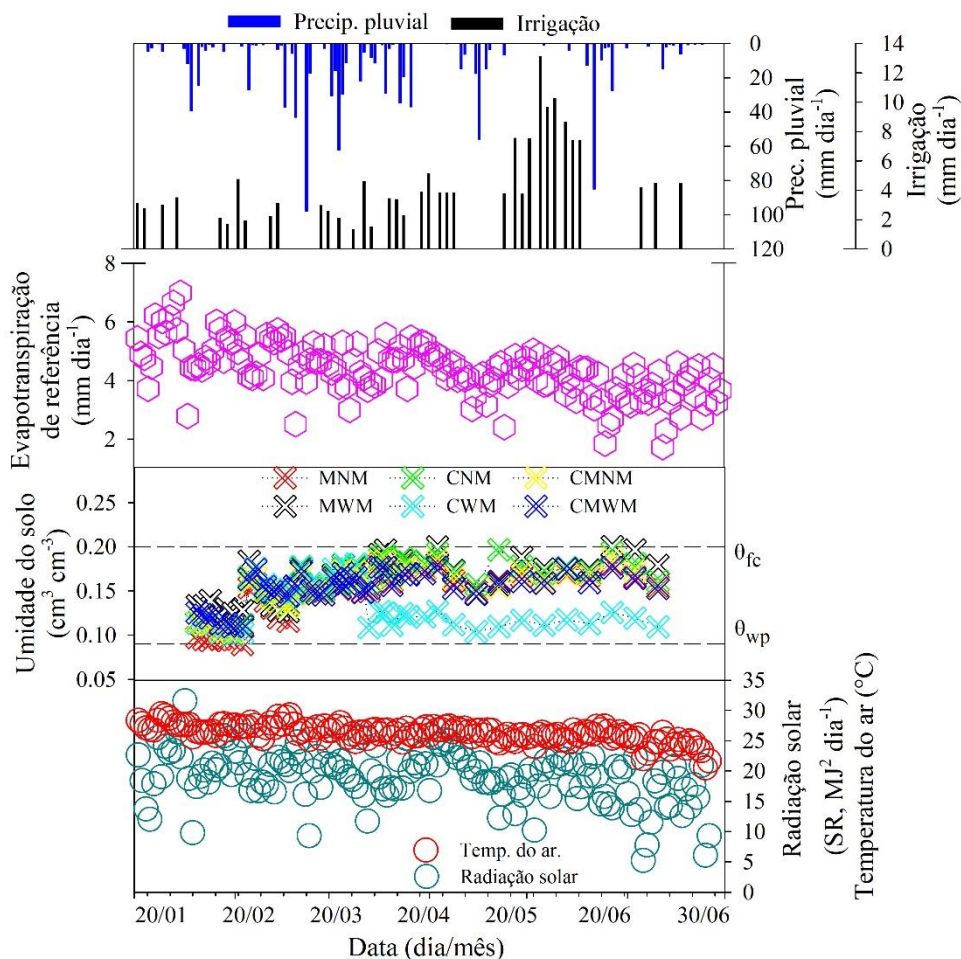


Figura 2. Dados diários de precipitação pluvial, irrigação, evapotranspiração de referência, umidade do solo, radiação solar e temperatura do ar ao longo do período experimental, em Serra Talhada, PE.

3.2 Produtividade dos sistemas de produção com palma e milho

Os valores de produtividade em biomassa fresca (FMY), seca (DMY) e conteúdo de matéria seca (DMC), e a água retida na planta (ARP) dos sistemas de produção com palma e milho, estão apresentados na Tabela 1. A FMY e DMY foram maiores nos sistemas com palma exclusiva (CNM e CWM) e no consórcio palma-milho (CMNM e CMWM) ($P < 0,05$), independente do uso da cobertura, com média igual a 212,87 Mg ha^{-1}

¹ em biomassa fresca e 15,95 Mg ha⁻¹ em biomassa seca (Tabela 1). Embora a FMY não tenha sido diferente entre os sistemas com e sem cobertura, a quantidade de água retida na planta (ARP) foi maior nos sistemas CWM e CMWM em relação a CNM e CMNM (P<0,05), com valor médio igual a 11,97 L planta⁻¹ (Tabela 1). Dentro dos consórcios, o rendimento produtivo da palma foi superior ao do milho (P<0,05), o que mostra a sua importância dentro do sistema. O DMC também variou entre os sistemas produtivos (P<0,05), onde os monocultivos de milho (MNM e MWM) e os consórcios foram superiores aos demais, com média igual a 0,35 g kg⁻¹ (Tabela 1).

Tabela 1. Produtividade da palma forrageira e milho em diferentes sistemas de produção em ambiente semiárido

Sistema	FMY	FMY ^o		DMY	DMY ^o		DMC	DMC ^o		ARP
	(total)	Palma	Milho	(total)	Palma	Milho	(total)	Palma	Milho	
		Mg ha ⁻¹						g kg ⁻¹		L
		-----						-----		planta ⁻¹
		--								
CNM	215,46a	-	-	16,03a	-	-	0,07b	-	-	8,73b
CWM	236,43a	-	-	16,65a	-	-	0,07b	-	-	11,46a
MNM	8,66b	-	-	2,2b	-	-	0,56a	-	-	-
MWM	9,03b	-	-	2,32b	-	-	0,30a	-	-	-
CMNM	181,18a [‡]	179,06aA	2,12bB	14,83a [‡]	14,28aA	0,56bB	0,36a [‡]	0,08bB	0,28aA	7,97b
CMWM	218,4a [‡]	215,96aA	2,44bB	16,28a [‡]	15,60aA	0,68bB	0,33a [‡]	0,07bB	0,26aA	12,46a

Valores médios seguidos de mesma letra na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, para cada variável analisada. FMY_(total) – produtividade total em biomassa fresca; DMY_(total) – produtividade total em biomassa seca; DMC_(total) – conteúdo de matéria seca total; FMY^o – produtividade individual em biomassa fresca no sistema consorciado; DMY^o – produtividade individual em biomassa seca no sistema consorciado; DMC^o – conteúdo de matéria seca individual no sistema consorciado; ARP – água retida na planta; [‡] soma dos rendimentos da palma e do milho; SL – nível de significância; ns - não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade.

3.3 Evapotranspiração e seus componentes transpiração e evaporação

A variação da evapotranspiração (ET_c), transpiração (T) e evaporação (E) nos diferentes sistemas de produção é apresentada na Fig. 3. Os valores médios de ET em cada sistema são mostrados na Tabela 2.

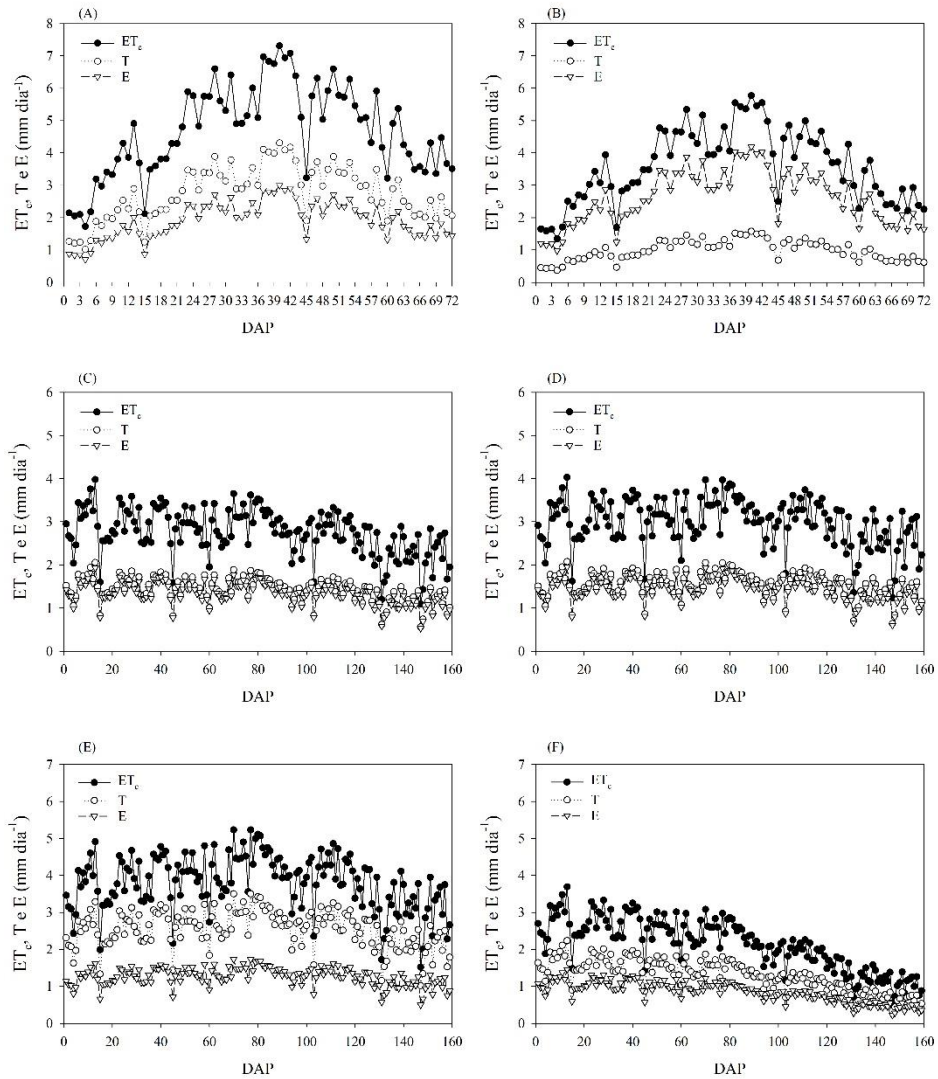


Figura 3. Evapotranspiração da cultura (ET_c), transpiração (T) e evaporação do solo (E) em diferentes sistemas de produção com palma forrageira e milho em ambiente semiárido. Milho com cobertura morta - MWM (A), milho sem cobertura morta - MNM (B), palma com cobertura morta - CWM (C), palma sem cobertura morta - CNM (D), palma-milho com cobertura morta - CMWM (E) e palma milho sem cobertura morta - CMNM (F).

Tabela 2. Evapotranspiração da cultura, coeficientes de cultivo simples e duplo, e fração de transpiração e evaporação do solo em diferentes sistemas de produção com palma e milho em ambiente semiárido

System	ET _c mm dia ⁻¹	K _c			K _{cb}	K _e	fT %	fE %
		I	M	F				
CNM	2,99	0,54	0,63	0,63	0,42	0,27	61	39
CWM	2,75	0,54	0,69	0,61	0,39	0,24	61	39
MNM	3,60	0,30	0,75	0,48	0,21	0,55	27	73
MWM	4,69	0,39	0,98	0,75	0,58	0,40	59	41
CMNM	2,15	0,50	0,48	0,27	0,29	0,19	61	39
CMWM	3,81	0,64	0,88	0,83	0,59	0,29	67	33

ET_c – evapotranspiração da cultura; K_c – coeficiente de cultivo; I – inicial; M – médio; F – final; K_{cb} – coeficiente da cultura basal; K_e – coeficiente de evaporação; fT – fração transpiração; fE – fração evaporação.

Ao longo dos 72 dias de avaliação a ET_c no sistema MWM variou de 1,73 a 7,31 mm dia⁻¹, apresentando média igual a 4,69 mm dia⁻¹ (Tabela 2). Ainda nesse sistema, os valores de T variaram entre 1,02 e 4,31 mm dia⁻¹, sendo em média 2,81 mm dia⁻¹ superiores a E, que apresentou valores variando de 0,71 a 3,00 mm dia⁻¹, e média de 1,00 mm dia⁻¹ (Fig. 3A). De modo geral, os valores de ET_c, T e E em MWM foram mais elevados aos observados no sistema MNM, onde a ET_c variou de 1,35 a 5,77 mm dia⁻¹, com média de 3,60 mm dia⁻¹ (Tabela 2). No MNM, devido à ausência da cobertura morta, a componente E foi superior a T, com valores oscilando de 0,98 a 4,19 mm dia⁻¹, e média igual a 2,62 mm dia⁻¹ (Fig. 3B).

Para os sistemas com palma em monocultivo observou-se pouca variação da ET_c entre os sistemas com e sem cobertura (Fig. 3C e 3D), com valores médios iguais a 2,75 e 2,99 mm dia⁻¹, respectivamente (Tabela 2). Em se tratando do componente T, ao longo dos 159 dias estudados observou-se uma variação similar entre os sistemas, com valor médio igual a 1,48 mm dia⁻¹ (Fig. 3C e 3D). Curiosamente, em ambas condições de cultivo, T foi superior a E, que por sua vez, apresentou média de 1,39 mm dia⁻¹. Contudo, ao avaliar E, o sistema CNM (Fig. 3D) apresentou média superior (1,45 mm dia⁻¹) ao sistema CWM (Fig. 3C) (1,33 mm dia⁻¹).

O sistema CMWM apresentou maior ET_c (3,81 mm dia⁻¹) em relação ao sistema CMNM (2,15 mm dia⁻¹) (Tabela 2) com variação dos valores entre 1,52 a 5,23 mm dia⁻¹ (Fig. 3E). Tanto em CMWM quanto em CMNM, o componente T foi superior ao componente E, com valores médios iguais a 2,55 e 1,33 mm dia⁻¹, respectivamente. Em

relação aos monocultivos de palma e milho, os consórcios reduziram a evaporação do solo e, conseqüentemente, a relação E/ET (fE) em cerca de 8% e 58%, respectivamente (Tabela 2), enquanto os valores de transpiração e fT (i.e., T/ET) foram superiores aproximadamente 5% e 49%, respectivamente (Tabela 2). Após a colheita do milho, realizada ao 72 DAP observou-se diminuição nos valores de ET, T e E, com reduções mais pronunciadas no sistema CMNM (Fig. 3F). A ET_c variou ao longo dos 159 dias estudados de 2,15 a 4,69 mm dia^{-1} entre os sistemas, sendo os maiores valores observados em MWM, CWNM e MNM, respectivamente (Tabela 2).

3.4 Coeficiente da cultura simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e)

As curvas ajustadas do coeficiente de cultivo simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e) da palma e do milho sob os diferentes sistemas de produção são mostrados na Fig. 4. O K_c , K_{cb} e K_e , foram determinados para os estágios inicial (I), intermediário (M), que compreende as fases de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura (i.e., para o milho), e final (F) de desenvolvimento (Tabela 2). Para a palma observou-se duas fenofases vegetativas ao longo dos 159 dias estudados, a fenofase 1 (P1) e a fenofase 2 (P2). A P1 é caracterizada pelo início da emissão dos cladódios até o momento em que a planta atinge 50% do NTC, que aconteceu aos 60 DAP (Fig. 4C e 4D). Após esse período, a planta iniciou a sua P2, que perdurou até o final do estudo (aproximadamente 100 dias de duração) (Fig. 4C e 4D). Para o milho, a fenologia foi dividida em três fases de crescimento, caracterizadas como: fase-I – Crescimento vegetativo; fase-II – desenvolvimento da panícula, e fase-III – enchimento dos grãos (Fig. 4A e 4B).

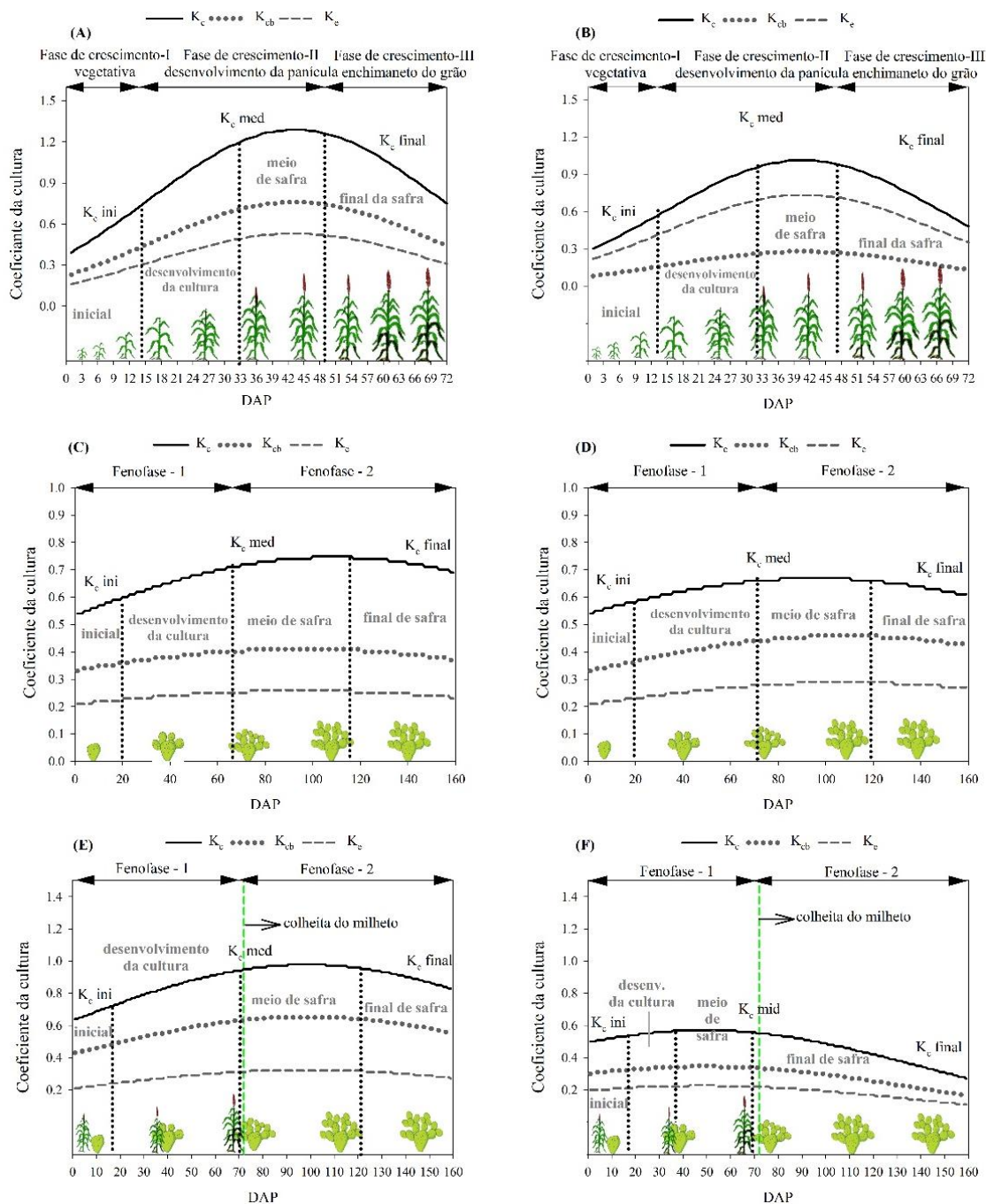


Figura 4. Coeficiente de cultivo da palma forrageira e milho sob diferentes sistemas de produção em ambiente semiárido. Milheto com cobertura morta - MWM (A), milheto sem cobertura morta - MNM (B), palma com cobertura morta - CWM (D), palma sem cobertura morta - CNM, palma-milheto com cobertura morta - CMWM (E) e palma-milheto sem cobertura morta - CMNM (F).

No geral, verificou-se a mesma tendência de variação ao longo do ciclo das culturas, onde os valores de K_c foram sempre superiores nos sistemas com cobertura morta (Tabela 2). Observou-se na fase-I do milheto, K_c iniciais ($K_{c\ ini}$) semelhantes entre os sistemas MWM (Fig. 4A) e MNM (Fig. 4B), com valores iguais a 0,39 e 0,30, respectivamente

(Tabela 2). No entanto, na fase-II da cultura observou-se maiores valores de K_c ($K_{c\ med}$) no sistema com cobertura (0,98) (Tabela 2). Resultado semelhante foi verificado para o $K_{c\ fin}$ (Tabela 2).

Em se tratando dos sistemas CWM e CNM, verificou-se pouca variação do K_c ao longo do desenvolvimento da cultura e entre os sistemas estudados (Fig. 4C e 4D). No geral, os valores de $K_{c\ ini}$, $K_{c\ med}$ e $K_{c\ fin}$ em CWM foram iguais a 0,5, 0,69 e 0,61, respectivamente, enquanto para CNM observou-se valores iguais a 0,54, 0,63 e 0,63, respectivamente (Tabela 2). Por outro lado, ao avaliar os sistemas consorciados (Fig. 4E e 4F), os valores de K_c ao longo do desenvolvimento das culturas foram sempre superiores em CMWM ($K_{c\ ini} = 0,64$; $K_{c\ med} = 0,88$ e $K_{c\ fin} = 0,83$) do que em CMNM ($K_{c\ ini} = 0,50$; $K_{c\ med} = 0,48$ e $K_{c\ fin} = 0,27$) (Tabela 2).

O comportamento do K_{cb} e K_e entre os sistemas foi semelhante ao de T e E, respectivamente (Fig. 4). Observou-se que apenas no sistema CNM o K_e foi mais acentuado (0,55) do que o K_{cb} (0,21), conseqüentemente, a fE foi superior (73%) a fração de água transpirada pela cultura (fT = 27%) (Tabela 2). Em média, os sistemas sem cobertura apresentaram maiores valores de K_e em relação aos sistemas com cobertura, exceto para palma exclusiva (Tabela 2).

3.5 Indicadores de eficiência do uso da água, radiação e nutrientes

A maior eficiência do uso da água (EUA) foi observada nos sistemas com palma em monocultivo (CNM e CWM) e no consórcio CMWM em relação aos demais sistemas ($P < 0,05$). Em média, a EUA foi igual a 0,44. O MNM apresentou a menor EUA (0,05) observada entre os sistemas (Tabela 3). Em termos de produtividade de água da cultura (PA_c) e produtividade da água da irrigação (PA_i), os sistemas CNM, CWM, CMNM e CMWM foram os responsáveis pelos maiores valores ($P < 0,05$), em relação aos sistemas de milho em monocultivo, com média de $3,64\ kg\ m^{-3}$ para PA_c e $9,83\ kg\ m^{-3}$ para PA_i (Tabela 3). Ao avaliar a produtividade econômica da água da cultura (PEA_c) e da água de irrigação (PEA_i) observou-se maiores retornos financeiros ao produtor que adota em sua propriedade os sistemas com palma em monocultivo e os consórcios ($P < 0,05$), independente do uso de cobertura morta ($P > 0,05$). Em média, a cada m^3 de água evapotranspirada pelas culturas e m^3 de água aplicada via irrigação, esses sistemas ofereceram retorno financeiro iguais a 1,02 US\$ e 2,76 US\$, respectivamente.

Tabela 3. Indicadores agrometeorológicos de eficiência do uso da água da palma forrageira e milho em diferentes sistemas de produção em ambiente semiárido

Sistema	EUA decimal	PA _c kg m ⁻³	PA _i kg m ⁻³	PEA _c US\$ m ⁻³	PEA _i US\$ m ⁻³
CNM	0,42a	3,38a	9,66a	0.96a	2.73a
CWM	0,38ab	3,80a	10,03a	1.14a	3.00a
MNM	0,05c	1,56b	2,44b	0.13b	0.20b
MWM	0,30b	1,06b	2,15b	0.21b	0.42b
CMNM	0,30b	4,60a	9,49a	1.18a	2.42a
CMWM	0,53a	2,78a	10,16a	0.80a	2.92a
SL	*	*	*	*	*

Valores médios seguidos de mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. EUA – eficiência do uso da água; PA_c – produtividade da água da cultura; PA_i – produtividade da água de irrigação; PEA_c – prod. econômica da cultura e PEA_i – prod. econômica da irrigação, considerando o rendimento em matéria fresca. SL – nível de significância; * significativo a 5% de probabilidade.

Em termos de eficiência do uso de radiação (EUR), os sistemas com palma em monocultivo e os consórcios se mostraram mais eficientes em relação aos sistemas de monocultivo de milho, independente do uso de cobertura morta (P<0,05). Em média, esses sistemas apresentaram EUR de 2,35 g MJ⁻¹ de biomassa seca (Fig. 5). Dentro dos sistemas consorciados, a eficiência média da palma foi superior em relação a do milho (P<0,05), com valores iguais a 2,49 g MJ⁻¹ e 0,41 g MJ⁻¹ de biomassa seca, respectivamente (Fig. 5).

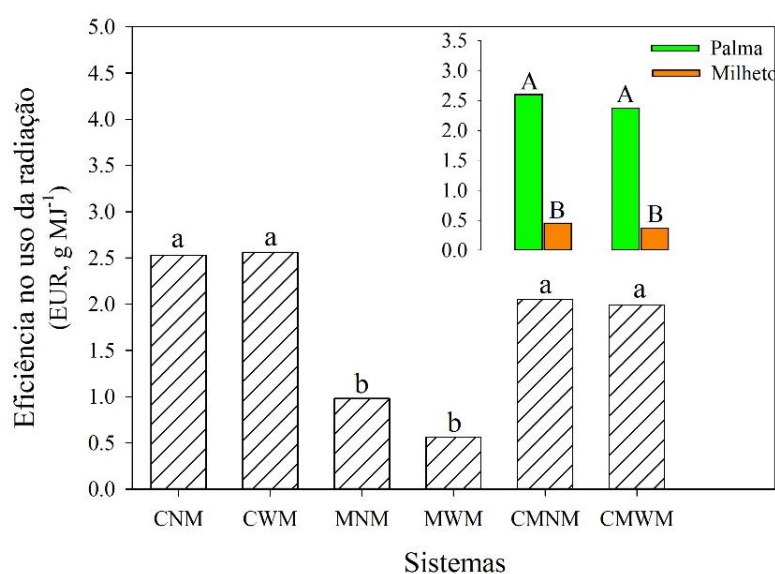


Figura 5. Eficiência do uso da radiação dos sistemas de produção com palma e milho em ambiente semiárido.

Valores médios seguidos de mesma letra minúsculas entre sistemas e maiúsculas dentro do sistema consorciado, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

A eficiência do uso de nutrientes (EUN) entre os sistemas é apresentada na Tabela 4. Para a EUA dos macronutrientes não foi observado efeito dos sistemas ($P > 0,05$), exceto para o nutriente Enxofre (S), onde os sistemas consorciados, com e sem cobertura, apresentaram as maiores eficiências ($P < 0,05$), com média igual a $0,01875 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$. Os valores médios de EUN dos sistemas para P, K, Ca e Mg foram $0,08275$, $0,9556$, $1,0902$ e $0,6507 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$, respectivamente.

Tabela 4. Eficiência do uso de nutrientes da palma forrageira em diferentes sistemas de produção em ambiente semiárido

Sistema	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na
	kg ha ⁻¹ m ⁻³										
CNM	0,0072	0,8477	1,2063	0,6403	0,0101b	1,5616b	0,4566a	2,9857	3,9408a	0,5714	0,0067
CWM	0,0090	0,9504	1,2781	0,7090	0,0122b	2,5787a	0,1988b	2,6220	2,2753b	0,5798	0,0071
CMNM	0,0103	1,2522	1,1316	0,7551	0,0179a	2,2982a	0,4216a	2,8291	3,1964a	0,6662	0,0075
CMWM	0,0066	0,7723	0,7448	0,4987	0,0196a	1,1904b	0,1661b	1,9442	1,9710b	0,4106	0,0054

Valores médios seguidos de mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CNM – palma exclusiva sem cobertura; CWM – palma exclusiva com cobertura; CMNM – consórcio palma-milho sem cobertura; CMWM – consórcio palma-milho com cobertura; SL – nível de significância; ns – não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade, * - significativo pelo teste F a 5% de probabilidade.

Em termos de micronutrientes, os sistemas influenciaram a eficiência no uso de boro (B), Cobre (Cu) e Manganês (Mn) ($P < 0,05$) (Tabela 4). Os sistemas CWM e CMNM para o B, e CNM e CMNM para Cu e Mn favoreceram maior eficiência em relação aos demais, com EUN médias de $2,4384 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$, $0,4391 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$ e $3,5686 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$, respectivamente. Para Fe, Zn e Na, a EUN dos sistemas foi igual a $2,5952$, $0,557$ e $0,00667 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$, respectivamente.

3.6. Índices de eficiência biológica e benefícios econômicos do sistema consorciado

Não foi observada diferença significativa entre os sistemas consorciados com e sem cobertura ($P>0,05$) em relação aos índices de eficiência biológica e vantagem monetária (Tabela 5). No geral, os valores encontrados mostraram bons resultados para o consórcio palma-milheto. Em termos de LER, embora os valores individuais (LER_c e LER_m) terem sido < 1 , indicando desvantagem produtiva no sistema de consórcio, o LER_{total} foi > 1 em ambos os sistemas (WM e NM) mostrando que o consórcio palma-milheto foi mais eficiente no uso da terra do que o monocultivo dessas culturas (Tabela 5).

Tabela 5. Razão equivalente de terra (LER), razão de equivalência área-tempo (ATER), coeficiente de equivalência de terra (LEC), índice de produtividade do sistema (SPI) e índice de vantagem monetária (MAI, US\$ ha⁻¹) em consórcio palma-milheto (CM), com (WM) e sem cobertura morta (NM)

Sistema	LER_c	LER_m	LER_{total}	ATER	LEC	SPI	MAI
CMNM	0,89	0,98	1,87	2,95	0,90	26,49	1375,01
CMWM	0,92	0,70	1,62	2,73	0,61	23,35	1339,02

LER_c , LER_m and LER_{total} – razão equivalente de terra para palma, milho e total, respectivamente; ATER – razão de equivalência área-tempo; LEC – coeficiente de equivalência de terra, SPI – índice de produtividade do sistema, e MAI – índice de vantagem monetária (R\$ ha⁻¹). SL – nível de significância; ns - não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade.

A ATER apresentou valor >1 em ambos os sistemas, e o LEC foi superior ao limite de 25%, com média igual a 0,76. O SPI apresentou valor médio igual a 24,92 Mg ha⁻¹ de biomassa seca (Tabela 5). Em relação ao MAI, os resultados mostraram vantagem econômica com a adoção dos sistemas consorciados com e sem cobertura morta em relação aos monocultivo de palma e milho. Em média, o MAI foi de 1357,02 US\$ ha⁻¹.

4. DISCUSSÃO

4.1. Produtividade dos sistemas de produção com palma e milho

O melhor desempenho produtivo, em biomassa fresca (FMY) e seca (DMY), observado nos sistemas palma em monocultivo (CNM e CWM) e no consórcio palma-milheto (CMNM e CWNM) foi independente do uso da cobertura morta, assim como, o maior conteúdo de matéria seca (DMC) verificado nos monocultivo de milho (MNM e MWM) e consórcios. A cobertura morta possibilita o aumento da produtividade das

culturas devido a manutenção da umidade do solo, aporte de nutrientes durante a sua decomposição, melhoria dos atributos físicos e químicos do solo, favorecimento no crescimento das raízes e, conseqüentemente, maior absorção de água e nutrientes (EL-MAGEED et al., 2018; SOUZA et al., 2022). Contudo, seus efeitos dependem de fatores como a quantidade e tipo de cobertura, condições climáticas, duração do período experimental e quantidade de água que entra no sistema de produção, o que estão diretamente relacionados com a taxa de decomposição da cobertura (QIN et al., 2021; SOUZA et al., 2022). Isso, possivelmente, pode explicar a ausência do efeito da cobertura nos sistemas estudados, uma vez que, o curto intervalo de reposição de água via irrigação (i.e., turno de rega de um dia), a quantidade de chuva (i.e., 975,8 mm) e as elevadas temperaturas do ar (i.e., média de 26,19 °C) observadas durante o período experimental, favorecem uma maior taxa de decomposição da cobertura (ZHOU et al., 2016; PIMENTEL et al., 2019; SOUZA et al., 2022). Além disso, o fato de não realizarmos a reposição da cobertura ao longo do tempo pode ter sido determinante para a ausência de benefícios aos sistemas.

Nossos resultados mostraram que o consórcio não afetou a produtividade individual da palma e do milho. Contudo, nessas condições, a cactácea apresentou maior rendimento comparado a gramínea. Resultados semelhantes foram relatados por Souza et al. (2022) ao estudarem o consórcio palma-milho, e por Jardim et al. (2021a) e Alves et al. (2022) ao avaliarem o consórcio palma-sorgo, ambos estudos em ambiente semiárido. O fato de a palma já estar em seu terceiro ciclo de produção, e estabilizada em campo, pode ter favorecido a boa produtividade. Souza et al. (2022), Diniz et al. (2017) e Lima et al. (2018a) relataram que o semeio da gramínea no sistema consorciado com palma deve ocorrer após a estabilização da cactácea em campo, para que não haja efeito negativo sobre a produtividade do sistema. Além disso, em consórcio, a palma OEM demonstra maior habilidade competitiva em relação ao milho, o que melhora sua resposta adaptativa e produtiva à condição de cultivo (SOUZA et al., 2021).

A agressividade apresentada pela cactácea OEM em relação a cultura secundária é um dos fatores que favorecem seu sucesso em condições de consórcio (JARDIM et al., 2021a, b). Além disso, sob condições irrigadas, cactáceas do gênero *Opuntia* apresentam maior capacidade adaptativa ao ambiente, com reflexos positivos em sua produtividade (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a, b). Por esse motivo, a competição interespecífica entre a palma e o milho durante o ciclo estudado, pode ter sido preponderante para o baixo desempenho produtivo da gramínea nesse sistema. Alguns estudos mostraram que a

palma forrageira é a cultura dominante dentro do consórcio, e isso se deve a sua melhor resposta produtiva em relação a outra cultura (DINIZ et al., 2017; JARDIM et al., 2021a; SOUZA et al., 2022; ALVES et al., 2022).

4.2. Evapotranspiração e seus componentes transpiração e evaporação

A utilização da cobertura morta no monocultivo do milho foi mais efetiva do que nos sistemas de palma em monocultivo e aos consórcios. Nossos resultados mostraram que seu uso favoreceu maiores valores de evapotranspiração (ET) e transpiração (T) em MWM, ao passo que maiores taxas de evaporação do solo (E) foram observadas em MNM. A proteção do solo provocada pela cobertura diminui a incidência direta da radiação solar e, conseqüentemente, reduz a evaporação da água do solo (ZHANG et al., 2018; SOUZA et al., 2021, 2022). O uso de cobertura morta pode alterar a dinâmica da ET seja devido à redução do componente E (YIN et al., 2020; CAO et al., 2021), como observados em MWM, ou pelo aumento de T, por propiciar melhores condições para o desenvolvimento da cultura (CARVALHO et al., 2017; YIN et al., 2017; DING et al., 2018, ALVES et al., 2022b).

Já para a palma observamos pouca variação da ET entre os sistemas CNM e CWM. No entanto, verificamos que o uso da cobertura reduziu a ET em CWM em cerca 8% em relação a CNM. O uso de cobertura morta em sistemas de produção com palma diminui a variação do conteúdo de água do solo, com conseqüente redução da evapotranspiração da planta (CARVALHO et al., 2017; ALVES et al., 2022b). A influência do uso da cobertura depende de fatores como ocorrência de precipitação pluvial, frequência de irrigação, tipo e a espessura da cobertura, sistema de produção, entre outros, que podem resultar em uma maior ou menor disponibilidade de água no solo (ZRIBI et al., 2015).

Ainda para a palma em monocultivo foi verificado uma T superior a E, independente do sistema avaliado. Embora alguns estudos tenham mostrado a utilização do BAS para quantificar o consumo de água da palma forrageira (SILVA et al., 2014b, 2015; QUEIROZ et al., 2015, 2016; BARBOSA et al., 2017; LIMA et al., 2018a, ALVES et al., 2022b), esse método pode superestimar a ET da palma em até 5,4%, devido a não contabilização do conteúdo de água presente nos cladódios (MORAIS et al., 2017). No presente estudo, observamos valores médios de ARP iguais a 11,95 e 8,35 L planta⁻¹, nos sistemas com e sem cobertura, respectivamente. Portanto, tanto a ARP como a água que realmente foi transpirada podem ter aumentado o componente T dos sistemas analisados.

Observamos que independente do uso de cobertura morta, os sistemas consorciados reduziram a perda de água por evaporação em relação aos monocultivos, principalmente do milho. O baixo sombreamento ocasionado pelo dossel da gramínea ao longo do ciclo, diminuiu a cobertura do solo nos sistemas exclusivos dessa cultura, resultando em maior evaporação do solo, e menor transpiração. Wang et al. (2021) relataram que o baixo sombreamento provocado pelo dossel de plantas de milho favoreceu maiores taxas de evaporação do solo. Do ponto de vista hídrico, a adoção do consórcio é uma boa alternativa para aumentar a eficiência do uso da água, e reduzir a evaporação do solo em relação ao cultivo único (FAN et al., 2020; AI et al., 2021), devido ao efeito da complementariedade interespecífica das culturas e da compensação do nicho espacial (AI et al., 2021). Por outro lado, a transpiração observada nos consórcios foi superior aos valores obtidos nos sistemas de cultivo único, sendo mais pronunciados em relação a MNM e MWM. A pouca variação observada entre os sistemas consorciados e de palma em monocultivo, pode estar relacionada ao bom desenvolvimento apresentado pela cactácea em ambos os sistemas, aumentando o índice de área dos cladódios, que por sua vez, reflete diretamente na transpiração da planta (CARVALHO et al., 2017; HASSAN et al., 2019). Além disso, como já relatado, o conteúdo de ARP pode ter favorecido esse resultado.

A partir dos 72 DAP, observou-se diminuição nos valores de ET_c , T e E. A colheita do milho e a ausência da cobertura morta podem ter sido determinantes para o resultado, uma vez que as reduções foram mais pronunciadas no sistema CMNM. Menores valores de ET_c e T estão relacionados a menor disponibilidade de água no sistema, que por sua vez, pode ser resultado da maior perda por evaporação (ROSAS-ANDERSON et al., 2018). Nesse estudo, observamos que E em CMNM foi 19% superior a CMWM. A evaporação é um processo que está diretamente relacionado com a cobertura do solo. Portanto, fatores como o baixo índice de cobertura apresentado pela palma (QUEIROZ et al., 2016) e a ausência da palhada favoreceram maiores perdas por E. Além disso, outro fator foi a entrada de água no sistema, sobretudo via irrigação, que ocorreu em períodos curtos, recarregando de forma constante as camadas superficiais do solo, da qual a água é facilmente evaporada (ROSAS-ANDERSON et al., 2018). Em contraste, a presença da cobertura favorece a manutenção da umidade do solo, fazendo com que uma maior quantidade de água fique disponível no sistema (ZRIBI et al., 2015; EL-MAGEED et al., 2018), e assim, haja maior ET_c e T, e menor E, como observado em CMWM.

4.3. Coeficiente da cultura simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e)

O K_c sob os sistemas com cobertura foi maior por fases de desenvolvimento das plantas do que nos sistemas sem cobertura. Alves et al. (2022b) obtiveram resultados semelhantes no cultivo de *O. stricta* cultivada com e sem cobertura sobre o solo em ambiente semiárido. Para os consórcios, esse resultado foi mais evidente durante todo o ciclo. O uso de cobertura favorece a maior umidade do solo e, conseqüentemente, maior disponibilidade hídrica (ZRIBI et al., 2015). Associado a isso, ter duas culturas com grande diferença na competitividade interespecífica (ver sessão 4.5 para mais detalhes) leva à restrição de culturas menos competitivas, alterando a dinâmica de consumo de água do sistema ao longo do ciclo de desenvolvimento (PENG et al., 2015; LING et al., 2017). Nesse estudo, testamos duas culturas com metabolismos distintos, que reflete diretamente no consumo hídrico da planta e, portanto, na variação do K_c . Lima et al. (2018a) relataram que a maior disponibilidade de água no sistema consorciado palma-sorgo, e os distintos metabolismos apresentados pelas culturas, são fatores importantes para variação do consumo de água no sistema.

Por outro lado, o milho em monocultivo apresentou pouca diferença na fase inicial de desenvolvimento, mas, à medida que o ciclo avançou, essa diferença aumentou, devido a maior exigência hídrica da cultura, que em MWM foi maior do que em MNM. Os valores de K_c obtidos nesse estudo para MWM ($K_{c\ ini} = 0,39$; $K_{c\ mid} = 0,98$; $K_{c\ end} = 0,75$) foram superiores aos relatados por Rao et al. (2012), que avaliando o cultivo de milho em condições semiáridas da Índia, durante 12 meses, obtiveram valores iguais a $K_{c\ ini} = 0,33$, $K_{c\ mid} = 0,73$ e $K_{c\ end} = 0,42$, sendo esses, semelhantes aos valores obtidos em MNM ($K_{c\ ini} = 0,30$; $K_{c\ mid} = 0,75$; $K_{c\ end} = 0,48$).

Em contraste, observamos pouca variação dos valores de K_c em CWM e CNM ao longo das fenofases da palma, o que pode ser atribuído ao bom desenvolvimento da cultura em ambos os sistemas. Os valores médios de K_c para a palma em monocultivo (0,66), independente do sistema estudado, foram superiores aos reportados por Queiroz et al. (2016), avaliando o segundo ciclo de produção de *Opuntia stricta* durante 13 meses de cultivo ($K_c = 0,52$), e por Alves et al. (2022b) que estudaram o consumo hídrico de *O. stricta* em ambiente semiárido com e sem uso de cobertura morta sobre o solo (0,50), e inferiores aos relatados por Divíncula et al. (2019) para *Opuntia ficus-indica* (L.), que obtiveram valor médio igual a 0,72. Quando comparado ao milho, para as mesmas condições, o K_c também foi inferior, o que pode ser atribuído ao metabolismo MAC da

cactácea (LIU et al., 2018). A determinação do K_c para diferentes zonas agroclimáticas e distintas condições de cultivo, é essencial para o manejo adequado de água dentro do sistema de produção (QUEIROZ et al., 2016; HAN et al., 2021).

A aplicação do K_c duplo em sistemas de produção com palma e milho são escassos na literatura. Observamos que o comportamento do K_{cb} e K_e entre os sistemas, foi semelhante ao de T e E, respectivamente. O K_{cb} , denominado coeficiente de cultura basal, representa a transpiração da planta, enquanto K_e é o coeficiente de evaporação do solo (PEREIRA et al., 2015b). Apenas em MNM o K_e foi mais pronunciado do que K_{cb} , reflexo da ausência de cobertura. A utilização do K_c duplo melhora a estimativa da ET, devido a melhor quantificação da evaporação do solo (KOOL et al., 2014), como também, propicia uma estimativa mais precisa do rendimento das culturas, uma vez que a transpiração está diretamente relacionada ao desempenho produtivo das plantas (PAREDES et al., 2014; UNKOVICH et al., 2018).

4.4. Indicadores de eficiência do uso da água, radiação e nutrientes

A eficiência do uso da água (EUA) foi utilizada com a finalidade de expressar a fração de água efetivamente utilizada pelas culturas, em função do total de água recebida pelo sistema, via irrigação e/ou precipitação pluvial (HEYDARI et al., 2014; FERNÁNDEZ et al., 2020). Nossos resultados indicaram que os sistemas CNM, CWM e CMWM se mostraram mais eficientes, com uso efetivo médio de 44% de toda água fornecida (i.e., 502,37 mm). Por outro lado, o sistema MNM foi o pior no quesito EUA, utilizando apenas 57,08 mm do total de 1141,76 mm. Esse resultado mostra que a utilização da palma forrageira OEM em sistemas de produção, seja em monocultivo ou em consórcio é uma ótima estratégia para a melhoria do uso da água em ambientes semiáridos, devido, principalmente, ao seu metabolismo Ácido das Crassuláceas (MAC) (GARCÍA-NAVA et al. 2015; MORAIS et al. 2017; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a). Em comparação com plantas que possuem outras vias fotossintéticas, a palma abre seus estômatos e absorve o CO_2 atmosférico no período noturno, quando a temperatura do ar é mais baixa, e a umidade relativa do ar é maior quando comparada ao período diurno, resultando em uma maior EUA e, conseqüentemente, maior produção de biomassa (ver sessão 4.1) (LIGUORI et al., 2013; ARBA et al., 2018; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021b).

A adoção do consórcio em ambientes semiáridos melhora o uso dos recursos naturais, devido a complementariedade interespecífica das culturas utilizadas

(CHIMONYO et al., 2018; JARDIM et al., 2021a; ALVES et al., 2022). Nesse sentido, no presente estudo, a utilização do sistema CMWM favoreceu a uma elevada EUA, o que pode ser devido a compensação hídrica propiciada pelos distintos metabolismos fotossintéticos da palma (MAC) e do milheto (C4), que atuam no processo de trocas gasosas no período noturno e diurno, respectivamente, o que resulta numa diminuição da perda de água para a atmosfera (LIMA et al., 2018a; JARDIM et al., 2021). Além disso, os benefícios propiciados pelo uso da cobertura, i.e., proteção, manutenção da umidade e redução da amplitude térmica do solo (LI et al., 2018; SOUZA et al., 2021, SOUZA et al., 2022), que diminuem a evaporação de água (ver sessão 4.2) (YIN et al., 2020), favorece a elevada EUA do sistema (JORDAN et al., 2010; ZHANG et al. 2015).

A produtividade de água da cultura (PA_c) e a produtividade da água da irrigação (PA_i), bem como a produtividade econômica da água da cultura (PEA_c) e a produtividade econômica da água de irrigação (PEA_i), foram maiores nos sistemas CNM, CWM, CMNM e CMWM. A PA_c refere-se ao rendimento comercializável obtido (i.e., forragem), em função da água evapotranspirada do sistema (BLATCHFORD et al., 2018; FERNÁNDEZ et al., 2020), enquanto a PA_i , relaciona o rendimento comercializável com a quantidade de água aplicada via irrigação ao longo do ciclo produtivo (RODRIGUES & PEREIRA, 2009; FERNÁNDEZ et al., 2020). Já a PEA_c e a PEA_i , compreendem a relação entre o lucro obtido com a comercialização do produto produzido pela cultura, e a quantidade de água evapotranspirada e aplicada, via irrigação, ao longo do ciclo produtivo, respectivamente (FERNÁNDEZ et al., 2020).

Embora nossos resultados tenham se mostrados bons para os sistemas CNM, CWM, CMNM e CMWM, na prática, a utilização dos sistemas consorciados pode ser mais viável ao produtor, no sentido de maior oferta e diversificação de forragem (SOUZA et al., 2021, 2022; JARDIM et al., 2021a, b) e no melhor aproveitamento da terra (DINIZ et al., 2017; FAN et al., 2020; JARDIM et al., 2021a). A diversificação de espécies forrageiras é um fator importante para alimentação do rebanho, pois animais alimentados apenas com palma, tendem apresentar problemas intestinais, sendo necessário a adição de fibras na dieta, que pode ser suprida com o uso do milheto (SOUZA et al., 2022). Em relação ao cultivo único, o consórcio possibilita maior eficiência do uso da terra e dos recursos naturais, por meio da complementariedade espaço-temporal do sistema (MOGHBELI et al., 2019; ZHANG et al., 2020).

A utilização do consórcio pode aumentar a captação e o uso da radiação solar pelas culturas (FAN et al., 2019; NWOKORO et al., 2022). Foi observada que a maior

eficiência de conversão da PAR_{inter} em biomassa seca foi de $2,35 \text{ g MJ}^{-1}$, verificada nos sistemas CNM, CWM, CMNM e CMWM. Além disso, a palma quando comparada ao milho nos sistemas consorciados, se mostrou mais eficiente. A PAR_{inter} é um dos fatores que influenciam o crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas, por estar diretamente relacionada com a taxa de fotossíntese das plantas (TEIXEIRA et al., 2015; NWOKORO et al., 2022). Fatores como sua disponibilidade e características morfológicas da planta (e.g., arquitetura do dossel e o hábito de crescimento), são determinantes para o uso efetivo PAR_{inter} (TEIXEIRA et al., 2015; SUÁREZ et al., 2022). O cacto OEM utilizado no presente estudo, apresenta um hábito de crescimento ereto (BARBOSA et al., 2018a, b), com grandes cladódios (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a), na sua maioria de segunda ordem (i.e., parte superior da planta) (AMORIM et al., 2017), o que resulta em maior área fotossintética (PINHEIRO et al., 2014; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021b) em relação ao milho. Além disso, embora o milho apresente metabolismo C4 que lhe confere alta capacidade de absorver radiação solar (CORREA et al., 2019), a orientação de plantio norte-sul utilizada nesse estudo, pode ter afetado o uso da PAR_{inter} pela cultura, contribuindo para a baixa EUR observada (SOUZA et al., 2022).

A adoção de práticas de cultivo, como a consorciação de culturas, pode auxiliar na eficiência do uso de nutrientes (EUN) disponíveis na solução do solo (SALEHI et al., 2018). Nesse sentido, observamos que para os macronutrientes avaliados, os sistemas CMNM e CMWM, favoreceram maior eficiência no uso de enxofre (S), independente do uso da cobertura. Esse nutriente é considerado um macronutriente secundário, devido estar contido em fórmulas de baixa concentração (VITTI et al., 2015). Contudo, apresenta-se como fator limitante da produtividade das culturas, pois desempenha funções essenciais no desenvolvimento e qualidade da planta, participando da síntese de aminoácidos e proteínas; no controle hormonal; na fotossíntese e na proteção da planta contra patógenos (VITTI et al., 2015; FIORINI et al., 2016).

Para os micronutrientes, uma maior EUN de boro (B) foi observada para os sistemas CWM e CMNM, enquanto CNM e CMNM favoreceram maior eficiência em cobre (Cu^{2+}) e manganês (Mn^{2+}). A função de B na planta está associada a diversos processos fisiológicos, bem como à estruturação da parede celular, sendo essa, considerada a função mais importante desse elemento (MARSCHNER, 2011). Por sua vez, o Cu^{2+} atua em processos como a fotossíntese, respiração, redução e fixação de nitrogênio; nas relações hídricas, com influência direta sobre a permeabilidade dos vasos do xilema; e em mecanismos de defesa a doenças, sobretudo, fúngicas (COSTA PRIMO et al., 2015). Já

o Mn^{2+} , atua principalmente no sistema enzimático nas plantas, ativando várias reações importantes (COSTA PRIMO et al., 2015). Dentre os micronutrientes, o Mn^{2+} apresenta-se como o mais importante no desenvolvimento de resistência a doenças das raízes e das folhas (MALAVOLTA, 1997).

Tanto para o macronutriente S quanto para os micronutrientes B, Cu^{2+} e Mn^{2+} , observamos que o uso da cobertura morta não influenciou a EUN dos sistemas. Isso pode estar relacionado à composição química da cobertura, bem como, ao tempo de avaliação (159 dias), que por sua vez, pode refletir numa redução na mineralização de nutrientes disponíveis para as culturas.

4.5. Índices de eficiência biológica e benefícios econômicos do sistema consorciado

O LER expressa a proporção de terra, em hectare, que o monocultivo de palma e milho precisaria ter para que o seu rendimento fosse igual ao obtido no sistema de consórcio dessas culturas (FAN et al., 2019; JARDIM et al., 2021a; SOUZA et al., 2022; ALVES et al., 2022). Dessa forma, o valor médio de LER_{total} igual a 1,75 obtido em nosso estudo, indica que para o sistema de monocultivo de palma e milho produzir o mesmo que o sistema consorciado, é necessário o aumento de 0,75 hectares de terra (JARDIM et al., 2021a; ALVES et al., 2022; SOUZA et al., 2022). Valores de LER superiores a 1, mostram que o sistema consorciado possui maior eficiência no uso da terra do que o cultivo único, e pode favorecer sustentabilidade biológica e vantagem produtiva (ALVES et al., 2022). Ao estudarem o consórcio palma-sorgo, em ambiente semiárido, Diniz et al. (2017) e Jardim et al. (2021a) também obtiveram valores de $LER > 1$, iguais a 1,51 e 1,45, respectivamente, mostrando que independente da cultura utilizada, o consórcio se mostra mais eficiente do que o monocultivo. Souza et al. (2022) observaram vantagem biológica ao utilizar o consórcio palma-milho ($LER = 1,42$) em relação ao cultivo único dessas culturas, em ambiente semiárido.

Embora o LER seja amplamente utilizado como indicativo de eficiência dos consórcios (CHIMONYO et al., 2016; LI et al., 2020; JARDIM et al., 2021a; ALVES et al., 2022), esse índice não considera o tempo em que as culturas utilizadas no sistema levam para finalizar o seu ciclo produtivo, o que pode remeter em uma superestimativa da vantagem obtida (DINIZ et al., 2017). Além disso, não é um indicador adequado de produtividade (LI et al., 2020). Portanto, a utilização do ATER é de suma importância, pois considera o fator tempo como determinante para avaliar a eficiência produtiva do

consórcio, sobretudo, quando as culturas apresentam ciclos de produção diferentes (SOUZA et al., 2022).

No presente estudo, o tempo de cultivo da palma e do milho foi de 159 dias e 72 dias, respectivamente. Ao final do ciclo, observamos ATER superiores a 1, independente do uso da cobertura morta, com média de 2,84. $ATER > 1$, indica vantagem biológica do sistema (DINIZ et al., 2017; ALVES et al., 2022), que foi confirmada pelo valor médio de LEC (76%) obtido. Uma vantagem produtiva é indicada quando LEC é superior a 25%, conforme Diniz et al. (2017) e Jardim et al. (2021a) relataram. Os valores de ATER e LEC obtidos no presente estudo, foram bem superiores aos reportados por Souza et al. (2022), que encontraram ATER de 1.20 e LEC de 0.46, no consórcio palma-milho.

Em se tratando do SPI, que é utilizado como fator de compensação produtiva entre a cultura secundária (i.e., milho) e a cultura principal do sistema (i.e., palma), obtivemos valor médio de 24,92 Mg ha⁻¹ de biomassa seca entre os sistemas, que por sua vez, foi superior a produtividade da palma em cultivo único (DMY de 16,34 Mg ha⁻¹), evidenciando a vantagem de utilização do consórcio palma-milho (SOUZA et al., 2022).

Além de apresentar vantagem na eficiência do uso da terra e em termos produtivos, a utilização do consórcio palma-milho também se mostrou economicamente viável ao produtor. O valor médio positivo de MAI (1357,02 US\$ ha⁻¹) mostrou que a utilização desse sistema é vantajosa quando comparado ao cultivo único dessas culturas. Esse resultado confirma os achados por Souza et al. (2022) estudando o consórcio palma-milho, e os de Lima et al. (2018b) para o consórcio palma-sorgo, que destacaram a vantagem monetária com uso de sistema consorciado em relação ao monocultivo, em condições de clima semiárido.

5. CONCLUSÕES

Nesse estudo, quantificamos o consumo de água (ET_c) em sistemas de produção com palma e milho forrageiro, bem como, determinamos os coeficientes de cultivo simples (K_c) e duplo dessas culturas (K_{cb} e K_e) nas distintas condições de cultivo. Além disso, particionamos a ET em transpiração (T) e evaporação (E) para entendermos o comportamento desses componentes em sistemas monocultivos e consorciados, com e sem cobertura morta.

Pouca variação na ET_c , T e E foi verificada entre os monocultivos da palma, diferentemente do observado no monocultivo do milho, onde a cobertura morta foi mais efetiva sobre as respostas dos componentes T e E, bem como do K_c , K_{cb} e K_e , ao longo do ciclo de cultivo. No geral, ET_c , T e K_c foram sempre superiores nos sistemas consorciados, independente do uso da cobertura morta. Por outro lado, esse sistema reduziu as perdas de água por evaporação, em relação aos monocultivos.

O consórcio palma-milho é uma boa alternativa para uma agricultura resiliente em ambientes semiáridos, sobretudo, quando a utilização da cobertura morta sobre o solo for possível. Embora não tenha alterado o rendimento das culturas estudadas, o uso da cobertura favoreceu menores perdas por evaporação e maior acúmulo de água na palma forrageira, possibilitando uma maior eficiência no uso da água em relação a cultura do milho. Em relação ao cultivo exclusivo dessas culturas, principalmente da gramínea, o consórcio exibiu boa eficiência no uso dos recursos (e.g., água, radiação e nutrientes). Além disso, sua utilização favorece maior aporte forrageiro, com diversidade de forragem, e um bom retorno financeiro ao produtor. Os índices de eficiência biológica mostraram que o uso da palma forrageira em sistemas consorciados é vantajoso em relação ao seu monocultivo, tornando-se uma prática viável para ambientes semiáridos.

Trabalhos futuros são encorajados a quantificar o consumo de água em diferentes sistemas de produção (e.g., diferentes espaçamentos e orientação de plantio, regimes hídricos, arranjos, entre outros) com outras espécies forrageiras, bem como, a utilização de diferentes métodos de determinação de ET, de forma a melhorar a gestão dos recursos hídricos locais e diversificar a oferta de forragem em regiões áridas e semiáridas do mundo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AI, P.; MA, Y.; HAI, Y. Influence of jujube/cotton intercropping on soil temperature and crop evapotranspiration in an arid area. **Agricultural Water Management**, v. 256, p. 107118, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107118>

AKITSU, T. K.; NASAHARA, K. N.; ILIMA, O.; HIROSE, Y.; IDE, R.; TAKAGI, K.; KUME, A. The variability and seasonality in the ratio of photosynthetically active radiation to solar radiation: A simple empirical model of the ratio. **International Journal**

of **Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 108, p. 102724, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102724>

ALBERTO, M. C. R.; QUILTY, J. R.; BURESH, R. J.; WASSMANN, R.; HAIDAR, S.; CORREA JUNIOR, T. Q.; SANDRO, J. M. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 136, p. 1-12, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.005>

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Dranaige Paper, 56).

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G.. Koppen's climate classification map of Brazil. **Meteorology Zeitschrift**, v.22, n.6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ALVES, C. P.; SILVA, T. G.; ALVES, H. K. M. N.; JARDIM, A. M. R. F.; SOUZA, L. S. B.; CRUZ NETO, J. F.; SANTOS, J. P. A. S. Consórcio palma-sorgo sob lâminas de irrigação: balanço de água no solo e coeficientes da cultura. **Agrometeoros**, v.27, n.2, p. 347-356, 2019. <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v27i2.26448>

ALVES, C. P.; JARDIM, A. M. R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; SOUZA, C. A. A.; SALVADOR, K. R. S.; LEITE, R. M. C.; PINHEIRO, A. G.; SILVA, T. G. F. How to enhance the agronomic performace of cactus-sorghum intercropped system: planting configuration, density and orientation. **Industrial Crops and Products**, v.184, p. 115059, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115059>

AMANULLAH, K.; KHALIL, S.; KHALIF, F.; IMARANUDDIN. Influence of irrigation regimes on competition indexes of winte and summer intercropping system under semi-arid regions of Pakistan. **Scientific Reports**, v.10, p. 8129, 2020.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-65195-7>

AMORIM, D. M.; SILVA, T. G. F.; PEREIRA, P. C.; SOUZA, L. S. B.; MINUZZI, R. B. Phenophases and cutting time of forage cactus under irrigation and cropping systems. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.47, n.1, p. 62-71, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632016v4742746>

ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, M. J.; ALVES, C. P.; SOUZA, C. A. A.; COSTA, S. A. T.; CUNHA, M. V.; SIMÕES, A. N.; SILVA, J. R. I.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F. Growth dynamics and accumulation of forage mass of forage cactus clones as affected by meteorological variables and water regime. **European Journal of Agronomy**, v.131, p. 126375, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126375>

ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B.; ALVES, C. P.; SALVADOR, K. R. S.; SOUZA, C. A. A.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, M. J. Phenophases, morphophysiological indices and cutting time in clones of the forage cacti under controlled water regimes in a semiarid environment. **Journal of Arid Environments**, 190, p. 104510, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104510>.

ARAÚJO PRIMO, J. T.; SILVA, T. G. F.; SILVA, S. M. S.; MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B. Calibração de sondas capacitivas, funções físico-hídricas e variação do armazenamento de água em um argissolo cultivado com palma forrageira. **Revista Ceres**, v. 62, n.1, p. 20-29, 2015. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562010003>

ARBA, M.; FALISSE, A.; CHOUKR-ALLAH, R.; SINDIC, M. Effect of irrigation at critical stages on the phenology of flowering and fruiting of the cactus *Opuntia* spp. **Braz. Journal of Biology**, v.78, p. 653–660, 2018. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.170086>.

BARBOSA, M. L.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA, S. M. S.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; JARDIM, A. M. R. F. Meteorological variables and morphological characteristics influencing the evapotranspiration of forage cactus. **Revista Ceres**, n.64, p. 465–475, 2017a. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764050003>.

BARBOSA, M. L.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA, S. M. S.; STEIDLE NETO, A. J. The influence of cladode morphology on the canopy formation of forage cactus plants. **Revista Caatinga**, v.31, n.1, p. 180–190, 2018b. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n121rc>.

BLATCHFORD, M. L.; KARIMI, P.; BASTIAANSSEN, W. M. G.; NOURI, H. From global goals to local gains—a framework for crop water productivity. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v.7, n.11, p. 414, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijgi7110414>.

CAO, Q.; WANG, Z.; YANG, X.; SHEN, Y. The effects of cocksfoot cover crop on soil water balance, evapotranspiration partitioning, and system production in an apple orchard on the Loess Plateau of China. **Soil and Tillage Research**, v.205, p. 104788, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104788>

CARVALHO, A. A.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; TOLÊDO, M. P. S. Soil moisture in forage cactus plantations with improvement practices for their resilience. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.7, p. 481-487, 2017. <http://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n7p481-487>

CHIMONYO, V. G. P.; MODI, A. T.; MABHAUDHI, T. Water use and productivity of a sorghum–cowpea–bottle gourd intercrop system. **Agricultural Water Management**, v.165, p. 82–96, 2016. <http://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2015.11.014>

CHIMONYO, V. G. P.; MODI, A. T.; MABHAUDHI, T. Sorghum radiation use efficiency and biomass partitioning in intercrop systems. **South African Journal of Botany**, v.118, p. 76–84, 2018. <http://doi.org/doi:10.1016/j.sajb.2018.06.0009>

CONSOLI, S.; INGLESE, G.; INGLESE, P. Determination of Evapotranspiration and annual biomass productivity of a cactus pear [*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.)] orchard in a Semiarid environment. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.139, p. 680-690, 2013. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000589](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000589)

COSTA PRIMO, D.; MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B. **Micronutrientes no sistema solo planta: Sintomas de deficiência e toxidez**. Saarbrücken, 2015. 68p.

COSTA, A. R. F. C. D. A.; COSTA, J. P. N.; MEDEIROS, J. F. D. E.; SILVA, M. V. T. D. A.; LINO, V. A. D. S. Desempenho de variedades de sorgo dupla aptidão submetidas a diferentes lâminas de irrigação com água salina. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.18, n.3, p. 417–428, 2019. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v18n3p417-428>.

DING, D.; ZHAO, Y.; FENG, H.; HILL, R. L.; CHU, X.; ZHANG, T.; HE, J. Soil water utilization with plastic mulching for a winter wheat-summer maize rotation system on the Loess Plateau of China. **Agricultural Water Management**, n.201, p. 246–257, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.029>

DINIZ, W. J.; SILVA, T. G. F.; FERREIRA, J. M. S.; SANTOS, D. C.; MOURA, M. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; ZOLNIER, S. Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, n.9, p. 724–733, 2017. <https://doi.org/10.1590/S0100-204x2017000900004>.

DIVÍNCULA, J. S.; SILVA, C. B.; SANTOS, M. A. L.; SANTOS, D. P.; SANTOS, L. W. Crop coefficient and water requirement of prickly pear in the Agrest region of Alagoas state, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p. 925-929, 2019.

EL-MAGEED, T. A. A.; SAMNOUDI, I. M. E.; IBRAHIM, A. E. M.; ABD, A. R.; TAWWAB, E. Compost and mulching modulate morphological, physiological responses and water use efficiency in sorghum (*Bicolor* L. Moench) under low moisture regime. **Agricultural Water Management**, v.208, p. 431–439, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.042>.

FAN, Z.; CHAI, Q.; YU, A.; ZHAO, C.; YIN, W.; HU, F.; CHEN, G.; CAO, W.; COULTER, J. A. Water and radiation use in maize–pea intercropping is enhanced with increased plant density. **Agronomy Journal**, v.112, n.1, p. 1-17, 2020. <https://doi.org/10.1002/agj2.20009>

FAN, Z.; ZHAO, Y.; CHAI, Q.; ZHAO, C.; YU, A.; COUPLER, J. A.; GAN, Y.; CAO, W. Synchrony of nitrogen supply and crop demand are driven via high maize density in maize/pea strip intercropping. **Scientific Reports**, v.9, n.1, p. 1-14, 2019 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47554-1>

FERNÁNDEZ, J. E.; ALCON, F.; DIAZ-ESPEJO, A.; HERNANDEZ-SANTANA, V.; CUEVAS, M. V. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. **Agricultural Water Management**, v.237, p. 106074, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074>

FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; LYRA, G. B.; SOUZA, R. C.; ARAÚJO NETO, R. Eficiência do uso da radiação em cultivos de milho em Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.3, p. 322-328, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000300012>

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portuguese). **R package version 1.2.0**, 2018. <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>

FIORINI, I. V. A.; PINHO, R. G. V.; PIRES, L. P. M.; SANTOS, A. O.; FIORINI, F. V. A.; CANCELLIER, L. L.; RESENDE, E. L. Avaliação de fontes de enxofre e das formas de micronutrientes revestindo o NPK na cultura do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.15, n.1, p. 20-29, 2016. <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v15n1p20-29>

GARCÍA-NAVA, F.; PEÑA-VALDIVIA, C. B.; TREJO, C.; GARCÍA-NAVA, R.; REYES-AGÜERO, J. A.; RIVERA, J. R. A. Biophysical and physiological characteristics of nopalitos (*Opuntia* spp., Cactaceae) as influenced by domestication. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v.62, p. 927-938, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10722-014-0201-7>

HAN, X.; WEI, Z.; ZHANG, B.; LI, Y.; DU, T.; CHEN, H. Crop evapotranspiration prediction by considering dynamic change of crop coefficient and the precipitation effect

in back-propagation neural network model. **Journal of Hydrology**, v.596, p. 126104, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126104>

HASSAN, S.; INGLESE, P.; GRISTINA, L.; LIGUORI, G.; NOVARA, A.; LOUHAICHI, M.; SORTINO, G. Root growth and soil carbon turnover in *Opuntia ficus-indica* as affected by soil volume availability. **European Journal of Agronomy**, v.105, p. 104–110, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.012>.

HEYDARI, N. Water productivity in agriculture: challenges in concepts, terms and values. **Irrigation and Drainage**, v.63, n.1, p. 22-28, 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/ird.1816>

IRMAK, S.; KUKAL, M. Disk-till vs. no-till maize grass-and-alfalfa-reference single (average) and basal (dual) crop coefficients. **Agricultural Water Management**, v.226, p. 105815, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105815>

JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; ALVES, H. C. M. N.; SOUZA, M. S.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B. Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. **Journal of Arid Environments**, v.188, p. 104464, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104464>

JARDIM, A. M. R. F.; SOUZA, L. S. B.; ALVES, C. P.; ARAÚJO, J. F. N.; SOUZA, C. A. A.; PINHEIRO, A. G.; ARAÚJO, G. G. L.; CAMPOS, F. S.; TABOSA, J. N.; SILVA, T. G. F. Intercropping forage cactus with sorghum affects the morphophysiology and phenology of forage cactus. **African Journal of Range & Forage Science**, p. 1-12. 2021b. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.1949749>

JORDAN, A.; ZAVALA, L. M.; GIL, J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. **Catena**, v.81, n.1, p. 77-85, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.007>

KOOL, D.; AGAM, N.; LAZAROVITH, N.; HEITMAN, J. L.; SAUER, T. J.; BENGAL, A. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.184, p. 56-70, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.003>

LEITE, R. M. C.; SILVA, G. I. N.; CHAGAS, R. M. M.; ALVES, H. K. M. N.; SILVA, T. G. F. Coeficiente de extinção da palma forrageira depende do gênero e índice de área do cladódio. *In: XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia / V Simpósio de Mudanças Climáticas e Desertificação do Semiárido Brasileiro.*, 2017, Juazeiro, BA / Petrolina, PE. **Anais[...]** Juazeiro, BA / Petrolina, PE, 2017, p. 1-5.

LI, C.; HOFFLAND, E.; KUYPER, T. W.; YU, Y.; LI, H.; ZHANG, C.; ZHANG, F.; WERF, W. V. D. Yield gain, complementarity and competitive dominance in intercropping in China: A meta-analysis of drivers of yield gain using additive partitioning. **European Journal of Agronomy**, v.113, p. 125987, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125987>

LI, S.; LI, Y.; LIN, H.; FENG, H.; DYCK, M. Effects of different mulching technologies on evapotranspiration and summer maize growth. **Agricultural Water Management**, v.201, p. 309-318, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.025>

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. P.; BIGGAR, J. W.; 1980. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society American Journal**, v.44, n.1, p. 3-7, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400010001x>

LIGUORI, G.; INGLESE, G.; PERNICE, F.; SORTINO, G.; INGLESE, P. CO₂ uptake of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Whole trees and single cladodes, in relation to plant water status and cladode age. **Italian Journal of Agronomy**, v.8, n.1, p. 14–20, 2013. <https://doi.org/10.4081/ija.2013.e3>

LIMA, L. R.; SILVA, T. G. F.; JARDIM, A. M. R. F.; SOUZA, C. A. A.; QUEIROZ, M. G.; TABOSA, J. N. Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, p. 113–118, 2018a. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p113-118>

LIMA, L. R.; SILVA, T. G. F.; PEREIRA, P. C.; MORAIS, J. E. F.; ASSIS, M. C. D. Productive-economic benefit of forage cactus-sorghum intercropping systems irrigated with saline water. **Revista Caatinga**, v.31, p.191-201, 2018b. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n122rc>

LING, Q.; GAO, X.; ZHAO, X.; HUANG, J.; LI, H.; LI, L.; SUN, W.; WU, P. Soil water effects of agroforestry in rainfed jujube (*Ziziphus jujube* Mill.) orchards on loess hillslopes in Northwest China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.247, p. 343–351, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.031>

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. 1997. **Avaliação do estado nutricional da planta: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Londres: Academic Press, 2011.

MOGHBELI, T.; BOLANDNAZAR, S.; PANAHANDE, J.; RAEI, Y. Evaluation of yield and its components on onion and fenugreek intercropping ratios in different planting densities. **Journal of Cleaner Production**, v.213, p. 634–641, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.138>.

MORAIS, J. E. F.; SILVA, T. G. F.; QUEIROZ, M. G.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N. Hydrodynamic changes of the soil-cactus interface, effective actual evapotranspiration and its water efficiency under irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, n.2, p. 273-278, 2017. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n4p273-278>

NWOKORO, C. C.; KREYE, C.; NECPALOVA, M.; ADEYEMI, O.; BARTHEL, M.; PYPERS, P.; HAUSER, S.; SIX, J. Cassava-maize intercropping systems in southern

Nigeria: Radiation use efficiency, soil moisture dynamics, and yields of component crops. **Fields Crop Research**, v.283, p. 108550, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108550>

PADOVAN, M. P.; BROOK, R. M.; BARRIOS, M.; CRUZ-CASTILLO, J. B.; VILCHEZ-MENDOZA, S. J.; COSTA, A. N.; RAPIDEL, B. Water loss by transpiration and soil evaporation in coffee shaded by *Tabebuia rosea Bertol.* and *Simarouba glauca* dc. compared to unshaded coffee in sub-optimal environmental conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.248, p. 1-14, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.036>

PAREDES, P.; RODRIGUES, G. C.; ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under various irrigation management strategies. **Agricultural Water Management**, v.135, p. 27-39, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.010>

PENG, X.; THEVATHASAN, N. V.; GORDON, A. M.; MOHAMMED, I.; GAO, P. Photosynthetic response of soybean to microclimate in 26-year-old tree-based intercropping systems in Southern Ontario, Canada. **PLoS One**, v.10, n.6, p. e0129467, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129467>

PEREIRA, P. C.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; MORAIS, J. E. F.; SANTOS, D. C. Morfogênese da palma forrageira irrigada por gotejamento. **Revista Caatinga**, v.28, n.3, p. 184-195, 2015a. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252015v28n321rc>

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v.147, p. 4-20, 2015b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; LÓPES-URREA, R.; HUNSAKER, D. J.; MOTA, M.; MOHAMMADI, S. Z. Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. **Agricultural Water Management**, v.243, p. 106196, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106196>

PIMENTEL, L. G.; CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. S.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Decomposition of sugarcane straw: Basis for management decisions for bioenergy production. **Biomass and Bioenergy**, v.122, p. 133-144, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.027>

PINHEIRO, K. M.; SILVA, T. G. F.; CARVALHO, H. F. S.; SANTOS, J. E.; MORAIS, J. E. F.; ZOLNIER, S.; SANTOS, D.C. Correlações do índice de área do cladódio com características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.12, p. 939-947, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200004>

QIN, X.; HUANG, T.; LU, C.; DANG, P.; ZHANG, M.; GUAN, X. K.; WEN, P. F.; WANG, T. C.; CHEN, Y.; SIDDIQUE, K. H. M. Benefits and limitations of straw mulching and incorporation on maize yield, water use efficiency, and nitrogen use efficiency. **Agricultural Water Management**, v.256, p. 107128, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107128>

QUEIROZ, M. G.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA, S. M. S.; LIMA, L. R.; ALVES, J. O. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.10, p. 931-938, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p931-938>

QUEIROZ, M. G.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SIQUEIRA E SILVA, S. M.; SOUZA, C. A. A.; CARVALHO, H. F. S. Hydro-economic relations of forage cactus cultivated in semiarid environment. **Irriga**, v.1, n.1, p. 141-154, 2016. <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p141-154>

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019. URL <https://www.R-project.org/>.

RAO, B. K.; KUMAR, G.; KUROTHE, R. S.; PANDEY, V.; MISHRA, P. K.; VISHWAKARMA, A. K.; BARAIYA, M. J. Determination of crop coefficients and

optimum irrigation schedules for bidi tobacco and pearl millet crops in central Gujarat. **Journal of Agrometeorology**, v.14, n.2, p. 123-129, 2012. <http://dx.doi.org/10.54386/jam.v14i2.1407>

RICHARDS, L. A. **Diagnose and improvement of saline and alkali soils**. Washington: USDA, 1954. 60p.

RODRIGUES, G. C.; PEREIRA, L. S. Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs. **Biosystems Engineering**, v.103, n.4, p. 536–551, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.05.002>

ROSAS-ANDERSON, P.; TAGGART, M. J.; HEITMAN, J. L.; MILLER, G. L.; SINCLAIR, T. R.; RUFTY, T. W. Partitioning between evaporation and transpiration from *Agrotis stolonifera* L. during light and dark periods. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.260, p. 73-79, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.018>

SALEHI, A.; MEHDI, B.; FALLAH, S.; KAUL H. P.; NEUGSCHWANDTNER, R. W. Productivity and nutrient use efficiency with integrated fertilization of buckwheat-fenugreek intercrops. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, v.110, n.3, p. 407-425, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9906-x>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COLEHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO, A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solo**. 5 ed. Embrapa Solos, Brasília, p. 564, 2018.

SHIH, S. F.; GASCHO, G. J.; RAHI, G. S. Modeling biomass production of sweet sorghum. **Agronomy Journal**, v.73, n.6, p. 1027-1032, 1981. [10.2134/agronj1981.00021962007300060028x](https://doi.org/10.2134/agronj1981.00021962007300060028x)

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. **Food analysis: chemical and biological methods**. Minas Gerais: UFV, 2005.

SILVA, T. G. F.; ARAÚJO JÚNIOR, J. T.; MOURA, M. S. B.; SILVA, S. M. S.; MORAIS, J. E. F.; PEREIRA, P. C.; SOUZA, C. A. A. Soil water dynamics and evapotranspiration of forage cactus clones under rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.7, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000700001>

SILVA, T. G. F.; ARAÚJO PRIMO, J. T.; SILVA, S. M. S.; MOURA, M. S. B.; SANTOS, D. C.; SILVA, M. C.; ARAÚJO, J. E. M. Indicadores de eficiência do uso da água e de nutrientes de clones de palma forrageira em condições de sequeiro no Semiárido brasileiro. **Bragantia**, v.73, n.2, p. 184-191, 2014b. <https://doi.org/10.1590/brag.2014.017>

SILVA, T. G. F.; MIRANDA, K. R.; SANTOS, D. C.; QUEIROZ, M. G.; SILVA, M. C.; CRUZ NETO, J. F.; ARAÚJO, J. E. Área do cladódio de clones de palma forrageira: modelagem, análise e aplicabilidade. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.9, n.4, p. 633-641, 2014a. <https://doi.org/10.5039/agraria.v9i4a4553>

SOUZA, M. S.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, L. S. B.; JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, G. I. N.; ARAÚJO, G. G. L.; CAMPOS, F. S.; LEITE, M. L. M.; TABOSA, J. N.; SILVA, T. G. F. Forage yield, competition and economic benefit of intercropping cactus and millet with mulch in a semi-arid environment. **African Journal Range & Forage**, p. 1-13, 2022. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.2016967>

SOUZA, M. S.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; ALVES, H. K. M. N.; LEITE, R. M. C.; SOUZA, C. A. A.; ARAÚJO, G. G. L. D.; CAMPOS, F. S.; SILVA, M. J.; SOUZA, P. J. O. P. Growth, phenology and harvesting time of cactus millet intercropping system under biotic mulching. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 68, n. 6, p. 764-778, 2021. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1852553>

SUÁREZ, J. C.; ANZOLA, J. A.; CONTRERAS, A. T.; SALAS, D. L.; VANEGAS, J. I.; URBAN, M. O.; BEEBE, S. E.; RAO, I. M. Photosynthetic and grain yield responses to intercropping of two common bean lines with maize under two types of fertilizer applications in the colombian amazon region. **Scientia Horticulturae**, v.301, p. 111108, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111108>

TEIXEIRA, G. C. S.; STONE, L. F.; HEINEMANN, A. B. Eficiência do uso da radiação solar e índices morfofisiológicos em cultivares de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.1, p. 9-17, 2015. <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4528297>

ULLAH, A.; AHMAD, A.; KHALIQ, T.; AKHTAR, J. Recognizing production options for pearl millet in Pakistan under changing climate scenarios. **Journal of Integrative Agriculture**, v.16, n.4, p. 762–773, 2017. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61450-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61450-8).

UNKOVICH, M.; BALDOCK, J.; FARQUHARSON, R. Field measurements of bare soil evaporation and crop transpiration, and transpiration efficiency, for rainfed grain crops in Australia – A review. **Agriculture Water Management**, v.205, p. 72-80, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.016>

VITTI, G. C.; OTTO, R.; SAVIETO, J. Manejo do enxofre na agricultura. **Informações Agronômicas-International Plant Nutrition Institute**, v.52, p. 1-14, 2015.

WANG, Z.; WU, P.; ZHAO, X.; GAO, Y.; CHEN, X. Water use and crop coefficient of the wheat-maize strip intercropping system for an arid region in northwestern China. **Agricultural Water Management**, v.161, p. 77-85, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.012>

WANG, Y.; HORTON, R., XUE, X., REN, T. Partitioning evapotranspiration by measuring soil water evaporation with heat-pulse sensors and plant transpiration with sap flow gauges. **Agricultural Water Management**, v.252, p. 106883, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106883>

YILMAZ, S.; ÖZEL, A.; ATAK, M.; ERAYMAN, M. Effects of seeding rates on competition indices of barley and vetch intercropping systems in the Eastern Mediterranean. **Turkish Journal Agriculture and Forestry**, v.39, n. 1, p. 135–143, 2015. <https://doi.org/10.3906/tar-1406-155>

YIN, W.; CHAI, Q.; ZHAO, C.; YU, A.; FAN, Z.; HU, F.; FAN, H.; GUO, Y.; COULTER, J. A. Water utilization in intercropping: A review. **Agricultural Water Management**, v.241, p. 106335, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106335>

YIN, W.; CHEN, G.; FENG, F.; GUO, Y.; HU, F.; CHEN, G.; ZHAO, C.; YU, A.; CHAI, Q. Straw retention combined with plastic mulching improves compensation of intercropped maize in arid environment. **Field Crops Research**, v.204, p. 42–51, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.005>

ZHANG, D.; SUN, Z.; FENG, L.; BAI, W.; YANG, N.; ZHANG, Z.; DU, G.; FENG, C.; CAI, Q.; WANG, Q.; ZHANG, Y.; WANG, R.; ARSHAD, A.; HAO, X.; SUN, M.; GAO, Z.; ZHANG, L. Field Crops Research Maize plant density affects yield, growth and source-sink relationship of crops in maize / peanut intercropping. **Field Crops Research**, v.257, p. 107926, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107926>

ZHANG, P.; TING, W.; HAIXIA, W.; MIN, W.; XIANGPING, M.; SIWEI, M.; RUI, Z.; ZHIKUAN, J.; QINGFANG, H. Effects of straw mulch on soil water and winter wheat production in dryland farming. **Scientific Reports**, v.5, p. 10725, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep10725>

ZHANG, Y.; WANG, J.; GONG, S.; XU, D.; SUI, J.; WU, Z.; MO, Y. Effects of film mulching on evapotranspiration, yield and water use efficiency of a maize field with drip irrigation in Northeastern China. **Agricultural Water Management**, v.205, p. 90-99, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.029>

ZHOU, G.; ZHANG, J.; CHEN, L.; ZHANG, C.; YU, Z. Temperature and straw quality regulate the microbial phospholipid fatty acid composition associated with straw decomposition. **Pedosphere**, v.2, p. 386–398, 2016. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60051-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60051-0)

ZRIBI, W.; ARAGÜES, R.; MEDINA, E.; FACI, J. M. Efficiency of inorganic and organic mulching materials for soil evaporation control. **Soil and Tillage Research**, v. 148, p. 40-45, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.003>

CAPÍTULO III

EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTES DE CULTURA SIMPLES E DUPLO E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA DA PALMA FORRAGEIRA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CULTIVO

EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTES DE CULTURA SIMPLES E DUPLO E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA DA PALMA FORRAGEIRA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CULTIVO

Resumo: Poucos são os estudos sobre a necessidade de água de espécies de palma forrageira cultivadas sob diferentes práticas de cultivo. Objetivou-se, portanto, quantificar a evapotranspiração da cultura (ET_c) e os coeficientes de cultivo simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e) dos clones Orelha de Elefante Mexicana [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], Miúda [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck] e IPA Sertânia [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck] sob diferentes condições de cultivo em ambiente semiárido. Entre 2012 e 2020 quatro experimentos foram realizados: 1) clones de palma sob lâminas (2,5; 5,0 e 7,5 mm) e frequências de irrigação (7, 14 e 28 dias); 2) regimes hídricos (0, 25, 50, 75 e 100% da ET_0) e sistemas de cultivo com (WM) e sem (NM) cobertura morta; 3) clones de palma sob diferentes regimes hídricos (0, 40, 80 e 120% da ET_c) e 4) cultivo irrigado de clones de palma forrageira sob WM e NM e frequências de irrigação (7, 14, 21 e 28 dias). A ET_c , K_c , K_{cb} e K_e foram definidas por fenofases nas condições de máxima produtividade da cultura. Os indicadores de eficiência do uso da água foram quantificados para os diferentes regimes hídricos e sistemas de cultivo. Os valores de ET_c , K_c , K_{cb} e K_e variaram conforme as espécies, a dinâmica de crescimento da cultura e os sistemas impostos. Em média, o cacto *Opuntia* apresentou maior demanda hídrica (3,14 mm dia⁻¹). O sistema WM aumentou o rendimento da *Opuntia*, resultando em maiores valores de ET_c (3,30 mm dia⁻¹) e K_c (0,56). A cobertura reduziu em até 13% a evaporação do solo. Os indicadores de eficiência mostraram que o cultivo da *Opuntia* é mais viável, e que o sistema WM favorece maior retorno produtivo-econômico ao produtor. Fatores como a espécie e o sistema de cultivo devem ser considerados na determinação de parâmetros de consumo de água da palma, de modo a melhorar o manejo de irrigação e a eficiência no uso da água em ambiente semiárido.

Palavras-chave: Coeficiente da cultura, cobertura morta, evapotranspiração, *Nopalea*, *Opuntia*, regimes hídricos

EVAPOTRANSPIRATION, SINGLE AND DOUBLE CROP COEFFICIENTS AND EFFICIENCY OF WATER USE OF FORAGE CACTUS UNDER DIFERENT CULTIVATION CONDITIONS

Abstract: There are few studies on the water requirement of forage cactus species cultivated under different cultivation practices. Therefore, the objective was to quantify the crop evapotranspiration (ET_c) and coefficients of single (K_c) and double (K_{cb} and K_e) cropping of clones Orelha de Elefante Mexicana [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], Miúda [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck] and Sertânia IPA [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck] under different cultivation conditions in a semi-arid environment. Between 2012 and 2020 four experiments were carried out: 1) cactus clones under irrigation depths (2.5, 5.0 and 7.5 mm) and frequencies (7, 14 and 28 days); 2) water regimes (0, 25, 50, 75 and 100% of ET_0) and cropping systems with (WM) and without (NM) mulch; 3) forage cactus clones under different water regimes (0, 40, 80 and 120% of ET_c) and 4) irrigated cultivation of forage cactus clones under WM and NM and irrigation frequencies (7, 14, 21 and 28 days). ET_c , K_c , K_{cb} , and K_e were defined by phenophases under conditions of maximum crop productivity. Water use efficiency indicators were quantified for different water regimes and cropping systems. The values of ET_c , K_c , K_{cb} , and K_e varied according to species, crop growth dynamics, and imposed systems. On average, the *Opuntia* cactus had the highest water demand (3.14 mm day^{-1}). The WM system increased the *Opuntia* yield, resulting in higher values of ET_c (3.30 mm day^{-1}) and K_c (0.56). The cover reduced soil evaporation by up to 13%. The efficiency indicators showed that the cultivation of *Opuntia* is more viable and that the WM system favors a greater productive-economic return to the producer. Factors such as the species and the cultivation system must be considered when determining cactus water consumption parameters, to improve irrigation management and water use efficiency in a semi-arid environment.

Keywords: Crop coefficient, evapotranspiration, mulching, *Nopalea*, *Opuntia*, water regimes

CAPÍTULO III: EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTES DE CULTURA SIMPLES E DUPLO E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA DA PALMA FORRAGEIRA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CULTIVO

1. INTRODUÇÃO

A palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) é uma cactácea que apresenta adaptações morfofisiológicas que permitem seu cultivo em ambientes áridos e semiáridos, onde o déficit hídrico e a elevada temperatura do ar são predominantes (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a, b; CAMPOS et al., 2021). Características como a alta digestibilidade da matéria seca, elevado teor de carboidratos solúveis e capacidade de armazenamento de água em seus cladódios, fazem dessa planta um recurso forrageiro estratégico para os rebanhos dessas regiões, sobretudo, em épocas de longa estiagem (PESSOA et al., 2020; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a, b; LEMOS et al., 2021; DUBEUX JÚNIOR et al., 2021).

Apesar de sua adaptabilidade, as variáveis ambientais afetam a dinâmica de crescimento e o potencial produtivo da palma forrageira (CONSOLI et al., 2013; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021b). Desse modo, a adoção de práticas como a irrigação e a cobertura morta no sistema de produção dessa cactácea podem melhorar as condições de cultivo e mitigar os efeitos adversos do clima (SILVA et al., 2017; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a; ALVES et al., 2022; SOUZA et al., 2022). Por exemplo, em sistemas de produção de palma forrageira, o uso da cobertura morta incrementou o acúmulo de matéria seca, a taxa de crescimento relativo e de assimilação líquida da cultura ao longo do ciclo produtivo (SOUZA et al., 2021). Além disso, a sua adoção reduziu a variação do conteúdo de água do solo e, conseqüentemente, a taxa de evapotranspiração (CARVALHO et al., 2017). Por sua vez, a irrigação propicia estabilidade da umidade do solo, e garante condições de pleno crescimento às plantas (CAMPOS et al., 2021; ALVES et al., 2022).

Embora alguns estudos incentivem o uso da irrigação no cultivo dessa cactácea (QUEIROZ et al., 2016; MORAIS et al., 2017; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021c; CAMPOS et al., 2021), poucos são os relatos da real necessidade de água da cultura, principalmente, quando diferentes práticas (e.g., cobertura morta) são adotadas nos sistemas de produção. Portanto, a determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c) e do coeficiente de cultivo simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e) ainda é uma lacuna a ser

preenchida. De posse desses dados, o gerenciamento da irrigação em áreas com palma forrageira pode ser melhorado a partir do incremento do uso eficiente dos recursos hídricos locais e redução da aplicação excessiva de água (ALVES et al., 2022).

Em sistema de cultivo tradicional, Queiroz et al. (2016) e Divíncula et al. (2019) obtiveram valores de K_c iguais a 0,52 e 0,72, respectivamente, para diferentes espécies de palma. Por outro lado, Alves et al. (2022) em cultivo de *Opuntia stricta* com e sem cobertura morta, relataram valor médio de 0,50. Percebe-se a partir desses resultados, que diferentes espécies de palma forrageira e as condições de cultivo influenciam o consumo de água da cultura. Portanto, objetivou-se com esse estudo quantificar a dinâmica da evapotranspiração e dos coeficientes de cultivo de clones de palma forrageira sob diferentes condições de crescimento, de modo a melhorar o manejo da irrigação, a eficiência dos recursos hídricos e o aporte forrageiro em sistemas produtivos de regiões de ambiente semiárido.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição da área de estudo

Para a realização desse estudo foram conduzidos quatro experimentos distribuídos em dois sítios experimentais localizados no município de Serra Talhada, semiárido de Pernambuco, Brasil. Dois experimentos foram realizados na Estação Experimental Lauro Ramos Bezerra (Sítio I), pertencente ao Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA (7°56'S, 38°17'O e altitude 431 m), enquanto os outros dois, no Centro de Referência Internacional de Estudos Agrometeorológicos de Palma e outras Plantas Forrageiras – CentroRef (Sítio II), localizado na Unidade Acadêmica de Serra Talhada – UFRPE/UAST (7°57'S, 38°17'O e altitude 431 m) (Fig. 1A). A distância entre os dois sítios era de aproximadamente 2.000 metros. A região apresenta um clima caracterizado como semiárido quente (i.e., tipo BShw') (ALVARES et al., 2013), com precipitação pluvial média de 642 mm ano⁻¹, temperatura média do ar de 24,8°C, umidade relativa do ar em torno de 62%, e demanda atmosférica anual acima de 1800 mm (PEREIRA et al., 2015; SOUZA et al., 2022).

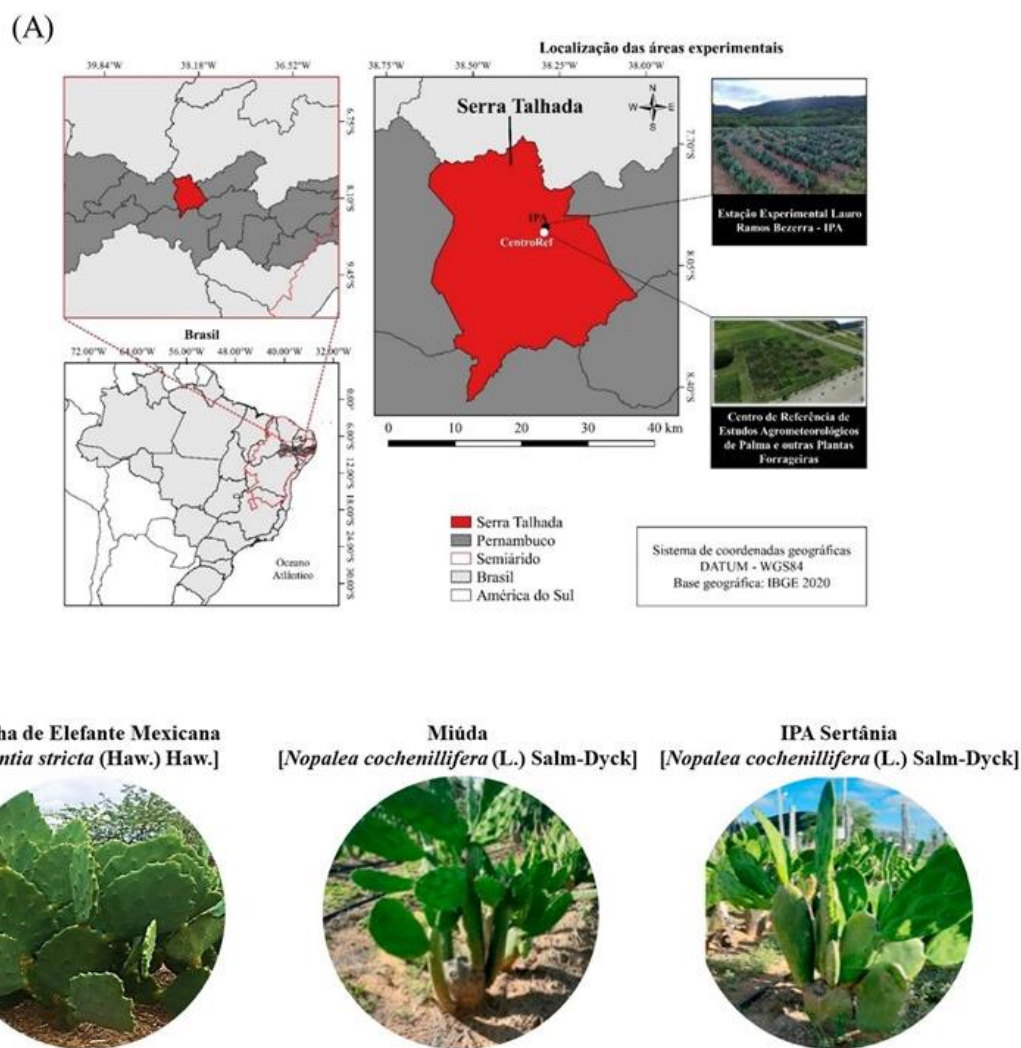


Figura 1. (A) Localização dos sítios experimentais e (B) espécies de palma estudadas.

Antes da instalação das áreas foi realizado o preparo inicial do solo, com aração, gradagem e sulcagem. Posteriormente, os cladódios de palma forrageira foram plantados em alinhamento dominó, enterrando-o 50% do comprimento total do cladódio no solo. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados.

2.2 Material vegetal, implantação dos experimentos e tratamentos aplicados

2.2.1 Sítio I

Nesse sítio experimental, os dois experimentos foram conduzidos durante o período de 2012 a 2015. O tipo de solo presente nas áreas foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, com textura franco arenosa, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018). Os valores médios dos atributos

químicos e físicos do solo na profundidade de 0,0 – 0,20 m foram: pH (água) = 6,5; P (Mehlich₁) = 40,3 mg dm⁻³; condutividade elétrica do extrato de saturação do solo a 25° C = 0,8 mS cm⁻¹; K⁺ = 0,45 cmol_c dm⁻³; Na⁺ = 1,52 cmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 3,25 cmol_c dm⁻³; densidade aparente = 1,53 g dm⁻³; densidade da partícula = 2,57 g dm⁻³; porosidade total = 40,34%; areia = 683,68 g kg⁻¹; silte = 252,55 g kg⁻¹ e argila = 63,79 g kg⁻¹.

2.2.1.1. Experimento I do Sítio I – Lâminas e frequências de irrigação

Nesse experimento foram avaliados os clones de palma forrageira Miúda – MIU [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck], IPA Sertânia – IPA [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck] e Orelha de Elefante Mexicana - OEM [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] (Fig. 1B), durante o período de março de 2012 a agosto de 2013, referente ao segundo ciclo produtivo da cultura (524 dias). A implantação da área ocorreu em janeiro de 2010, com o plantio dos clones sob espaçamento 1,6 x 0,2 m (31250 plantas ha⁻¹). Durante esse ano, a cultura foi conduzida em condições de sequeiro. A partir do corte de uniformização das plantas, realizado em fevereiro de 2012, e do estabelecimento do sistema de irrigação por gotejamento, iniciou-se a aplicação dos tratamentos, que compreenderam três regimes hídricos (2,5; 5,0 e 7,5 mm) e três frequências de irrigação (7, 14 e 28 dias), combinados aos três clones de palma.

Os tratamentos foram arrançados em esquema tri fatorial 3 x 3 x 3, com parcelas sub-subdivididas, em três repetições. As parcelas experimentais foram constituídas por quatro fileiras de cultivo, com área total de 25,6 m² e área útil de 12,8 m² (i.e., duas fileiras centrais, exceto duas plantas em cada extremidade). Os regimes hídricos foram dispostos nas parcelas, enquanto as frequências de irrigação e os clones de palma nas sub-parcelas e sub-subparcelas, respectivamente. Ao todo, a área experimental apresentou um tamanho de 231 m², dividida em 90 sub-parcelas, com 20 plantas cada.

2.2.1.2. Experimento II do Sítio I – Palma forrageira sob diferentes regimes hídricos e condições de cultivo

Nesse estudo foram avaliados três ciclos produtivos de palma, sendo o primeiro ocorrido durante o período de 05/2012 a 06/2013; o segundo entre 06/2013 e 09/2014, e o terceiro entre 09/2014 e 11/2015. A implantação da área experimental ocorreu em janeiro de 2011, quando o clone OEM foi plantado sob espaçamento 1,6 x 0,4 m (15625

plantas ha⁻¹). Durante esse ano a cultura foi cultivada em condição de sequeiro. Após o estabelecimento do estande de plantas, em maio de 2012 ocorreu o corte de uniformização da cultura, mantendo-o os cladódios basais e de primeira ordem em campo, seguido da imposição dos tratamentos, que consistiram de cinco regimes hídricos (0% - condição de sequeiro; 25%; 50%; 75% e 100% da evapotranspiração de referência – ET₀) combinados a duas condições de cultivo (com e sem cobertura morta).

Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 5 x 2, em parcela subdividida, com quatro repetições. As parcelas experimentais, representadas pelos regimes hídricos, foram constituídas por quatro fileiras de cultivo de 24 m, com área de 110,4 m², contendo 45 plantas em cada fileira. As subparcelas, caracterizadas pelas condições de cultivo, apresentaram área igual a 28,8 m², com 60 plantas. As duas fileiras centrais de cada subparcela, exceto duas plantas de cada extremidade, foram consideradas como parcela útil, com área de 22,4 m². Para as parcelas com cobertura morta foram utilizados o equivalente a 18 Mg ha⁻¹ de matéria seca de capim-corrente (*Urochloa mosambicensis*), proveniente de capina manual realizada no entorno da área experimental. Durante o estudo não houve a reposição da cobertura.

2.2.1.3. Manejo de irrigação e tratos culturais

Para aplicação das lâminas de irrigação foi utilizado um sistema de irrigação por gotejamento, com emissores espaçados a 0,20 m, vazão de 1,25 L h⁻¹ emissor⁻¹, resultando numa intensidade de aplicação de água de 3,9 mm h⁻¹ a uma pressão de 100 kPa. A ET₀ foi calculada diariamente, por meio do modelo de Penman-Monteith, parametrizado no boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998). Os dados meteorológicos necessários para o cálculo da ET₀ foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET), por meio de uma estação meteorológica automática, situada a 1500 m das áreas experimentais. A água utilizada foi proveniente de um açude, e apresentou ao longo dos períodos estudados uma condutividade elétrica variando entre 1,1 e 1,6 dS m⁻¹. Os totais de água aplicada via irrigação nos experimentos I e II são apresentados na Tabela 1. Quando necessário realizou-se o controle de plantas espontâneas, pragas e doenças, além de adubação química a cada três meses, com a aplicação de 50 kg ha⁻¹ da formulação 14-00-18 (NPK).

Tabela 1. Quantidade de água aplicada via irrigação nos experimentos do Sítio I.

Experimento I (2012 - 2013)						
Regimes hídricos (mm)	Frequências de irrigação (dias)	Total de água aplicada (mm)	Precipitação pluvial (mm)	Total (irrigação + prec. pluvial)		
2,5	7	130,0	517,7	647,7		
	14	65,0		582,7		
	28	32,5		550,2		
5,0	7	260,0	517,7	777,7		
	14	130,0		647,7		
	28	65,0		582,7		
7,5	7	930,0	517,7	1447,7		
	14	195,0		712,7		
	28	97,5		615,2		
Experimento II						
Regimes hídricos (%ET ₀)	Ciclo 2012-2013		Ciclo 2013-2014		Ciclo 2014-2015	
	Total de água aplicado (mm)	Prec. Pluvial (mm)	Total de água aplicado (mm)	Prec. Pluvial (mm)	Total de água aplicado (mm)	Prec. Pluvial (mm)
25	630,5		284,7		211,3	
50	675,4	423,2	408,9	781,1	373,2	529,4
75	726,9		551,2		523,1	
100	773,7		680,5		670,5	

2.2.2. Sítio II

Nesse sítio experimental foram conduzidos dois experimentos durante o período de 2017 a 2020. O solo da área experimental foi classificado como Cambissolo Háptico Ta Eutrófico típico, com textura franco arenosa, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018). As propriedades físicas e químicas medidas na camada de 0,0 – 0,20 m foram iguais a: pH (água) = 6,8; P (Mehlich 1) = 72,3 mg dm⁻³; condutividade elétrica do extrato de saturação do solo a 25° C = 0,56 mS cm⁻¹; K⁺ = 1,0 cmol_c dm⁻³; Na⁺ = 0,03 cmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 4,25 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 1,9 cmol_c dm⁻³; capacidade de troca de cátions = 7,8 cmol_c dm⁻³; saturação de bases = 92,5%; densidade aparente = 1,59 g dm⁻³; densidade da partícula = 2,48 g dm⁻³; porosidade total = 35,75%; areia = 831,7 g kg⁻¹; silte = 123,4 g kg⁻¹ e argila = 44,4 g kg⁻¹.

2.2.2.1. Experimento I do Sítio II – Cultivo de clones de palma forrageira sob diferentes regimes hídricos

Nesse experimento foram utilizados os clones de palma forrageira OEM, MIU e IPA, cultivados sob espaçamento de 1,0 x 0,2 m (50000 plantas ha⁻¹). O primeiro ciclo produtivo foi iniciado em janeiro de 2017, com o estabelecimento do sistema de irrigação

por gotejamento, e se estendeu até junho de 2018. Por sua vez, o segundo ciclo da cultura teve início em fevereiro de 2019 e término em agosto de 2020. Ambos os ciclos compreenderam 18 meses de avaliações.

Ao todo, 12 tratamentos foram avaliados, os quais foram dispostos em esquema fatorial 4 x 3, em parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas experimentais foram constituídas por quatro regimes hídricos baseados na evapotranspiração da cultura - ET_c (0% - condição de sequeiro; 40% e 80% - déficit hídrico controlado e 120% - regime hídrico acima do requerimento da cultura), enquanto as subparcelas foram constituídas pelos clones de palma forrageira. Cada parcela experimental apresentou 60 m², sendo compostas por quatro fileiras de cultivo, com 75 plantas em cada, numa área total de 960 m². As subparcelas apresentaram área igual a 20 m², contendo 100 plantas. As duas linhas centrais de cada subparcela, exceto uma planta de cada extremidade, foram consideradas as subparcelas de trabalho, com 46 plantas e área igual a 9,20 m².

2.2.2.2. Experimento II do Sítio II – Cultivo irrigado de clones de palma forrageira com e sem cobertura morta e frequências de irrigação

Para a avaliação do uso de cobertura morta no cultivo irrigado da palma forrageira foi conduzido um ciclo produtivo de 18 meses, iniciado em janeiro de 2017 e finalizado em junho de 2018. Nesse experimento, os clones MIU, IPA e OEM foram plantados no espaçamento 1,0 x 0,2 m (50000 plantas ha⁻¹), numa área total de 960 m². Os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial 3 x 2 x 2, com quatro repetições. Os três clones de palma foram submetidos a duas combinações de tratamentos, sendo duas condições de disponibilidade hídrica (sequeiro e irrigado com 120% ET_c) e dois níveis de cobertura morta no solo (com e sem cobertura). A cobertura morta utilizada consistiu de 18 Mg ha⁻¹ de capim corrente (*Urochloa mosambicensis*), obtida a partir de campinas manuais realizadas na área experimental. Ao longo do estudo não foi feita a reposição do material. As parcelas experimentais foram constituídas por quatro fileiras de cultivo de 15 metros de comprimento, com área igual a 60 m², contendo 300 plantas.

A partir de setembro de 2019, quando se iniciou o segundo ciclo produtivo da cultura, os mesmos clones de palma forrageira foram submetidos à diferentes frequências de irrigação, as quais constituíram os tratamentos. Esses, foram dispostos em campo em esquema fatorial 4 x 3 e parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas experimentais foram constituídas por quatro frequências de irrigação (7, 14, 21 e 28 dias),

enquanto as subparcelas pelos os clones de palma forrageira. Cada subparcela possuiu quatro fileiras de cultivo, com 25 plantas em cada, com área total de 20 m², sendo 9,2 m² considerada subparcela útil. Nos dias de irrigação foi aplicada uma lâmina fixa de 14 mm.

2.2.2.3. Manejo de irrigação e tratos culturais

A irrigação foi realizada por meio de fitas gotejadoras com emissores espaçados a 0,20 m, vazão de 2,25 L h⁻¹ a uma pressão de serviço igual a 100 kPa. A uniformidade de aplicação de água do sistema foi determinada em campo, a partir do teste de vazão, e variou de 85% a 96% entre as áreas estudadas. A água utilizada foi proveniente de um poço artesiano, e apresentou condutividade elétrica variando de 1,51 a 1,65 dS m⁻¹, concentração média de sódio e potássio igual a 168,66 mg L⁻¹ e 28,17 mg L⁻¹, respectivamente.

Para a aplicação das lâminas de irrigação, foi estimada diariamente a ET₀ utilizando o modelo de Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN et al., 1998). Para isso, foram usados os dados diários das variáveis meteorológicas coletadas por meio de uma estação automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET), localizada a 50 m da área experimental. A ET_c foi obtida pelo produto da ET₀ e do coeficiente de cultura (K_c), considerado igual a 0,52 para os três clones utilizados (QUEIROZ et al., 2016). Durante o primeiro ciclo produtivo do experimento III, um total de 865,81 mm de água foi aplicado via irrigação. Já no segundo ciclo desse experimento, as frequências de irrigação de 7, 14, 21 e 28 dias resultaram em lâminas acumuladas de 574 mm, 280 mm, 154 mm e 126 mm, respectivamente. No experimento IV o total de água aplicado nas condições de 40, 80 e 120% da ET_c foi igual a 314,28 mm, 668,35 mm e 1025,87 mm (primeiro ciclo) e 232,33 mm, 476,47 mm e 728,29 mm (segundo ciclo), respectivamente. Quando necessário realizou-se o controle de plantas espontâneas, pragas e doenças. A cada três meses foi feita adubação química, com a aplicação de 50 kg ha⁻¹ de NPK na formulação 14-00-08.

2.3. Características morfológicas e produtivas da cultura

As características morfológicas dos clones de palma foram monitoradas a partir de análises biométricas realizadas ao longo do período experimental. Foram obtidos o número total de cladódios (NTC), comprimento, largura, espessura e perímetro dos

cladódios, conforme Araújo Júnior et al. (2021a). De posse dos dados, procedeu-se com a estimativa da área (SILVA et al., 2014a) e do índice de área dos cladódios (PINHEIRO et al., 2014). As fenofases da palma forrageira foram definidas com base na taxa de emissão dos cladódios, conforme Alves et al. (2022). Para isso, foi realizado o ajuste de modelos sigmóides de três parâmetros entre o NTC e os graus dias acumulados (GDA, °Cdia); esse último obtido conforme Araújo Júnior et al. (2021a). As taxas foram calculadas a partir da derivada dos modelos obtidos (dNTC/dt). Considerou-se como a primeira fenofase (P1), o início da taxa de emissão até o momento em que a planta atingiu 50% do NTC. Após esse ponto, considerou-se o início da segunda fenofase (P2), que perdurou até o momento da máxima emissão de cladódio, que por sua vez, indica o início da fenofase três (P3) da planta. O final da P3 é considerado quando a dNTC/dt atingiu 50% do NTC posterior ao pico de emissão, dando início a fenofase 4 (P4), que tem duração até o final do ciclo cultura (ALVES et al., 2022).

A produtividade em matéria fresca (FMY, Mg ha⁻¹) e seca (DMY, Mg ha⁻¹) foi obtida conforme metodologia de Araújo Júnior et al., (2021c). Na ocasião, as plantas presentes nas parcelas úteis foram contabilizadas para determinação da densidade final de plantas. Todas as plantas presentes na parcela útil foram cortadas a partir dos cladódios de segunda ordem, e pesadas. Três cladódios representativos foram pesados (peso fresco), fracionados e acomodados em estufa de ventilação forçada de ar a 55°C até a obtenção do peso seco constante (SILVA & QUEIROZ, 2006). A razão entre o peso seco e o peso fresco dos cladódios resultou no conteúdo de matéria seca (DMC).

2.4. Evapotranspiração e coeficientes da cultura

A evapotranspiração (ET) foi determinada pelo resíduo do método simplificado do balanço de água no solo (BAS), conforme a Eq. 1 (LIBARDI, 2005).

$$-ET = P + I \pm Q - R - \Delta A \quad (1)$$

em que, P é a precipitação pluvial (mm); I é a irrigação (mm); Q é o fluxo vertical de água no solo (mm); R é o escoamento superficial (mm); e ΔA é a variação do armazenamento de água no solo (mm), para um volume controle de 0,40 m.

O fluxo vertical de água no solo (Q) foi calculado a partir da Eq. de Darcy-Buckingham, conforme demonstrado na Eq. 2 (LIBARDI, 2005).

$$Q = -K(\theta) \times \frac{\Delta \Psi_t}{\Delta z} \quad (2)$$

em que, $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo (mm d^{-1}) e $\frac{\Delta\Psi_t}{\Delta z}$ é o gradiente do potencial total de água no solo (m).

O R foi obtido de duas maneiras. Nas áreas situadas no Sítio I utilizou-se o método da curva número (CN), considerando um CN de 75, pois melhor representa as condições de taxa de infiltração, plantio e condições hidrológicas observadas nos experimentos (ALVES et al., 2022). Para as áreas do Sítio II o R foi obtido a partir do ajuste da curva de regressão polinomial de grau 2 entre os dias que houve precipitação e o volume de água escoado. Para tal, calhas de 1 m^2 foram instaladas na área experimental para captação do volume de água (litros). O armazenamento de água no solo foi monitorado com o auxílio do sensor capacitivo, modelo Diviner 2000® Sentek Pty Ltd., Austrália, anteriormente calibrado conforme a metodologia de Araújo Primo et al. (2015). As leituras foram realizadas três vezes por semana, sempre antes das irrigações, em tubos de acesso instalados nas parcelas experimentais. As leituras foram realizadas a cada 0,10 m, até a profundidade de 0,70 m do solo. A ΔA foi obtida pela diferença entre o armazenamento final e inicial de cada período avaliado. A condutividade hidráulica e o potencial total de água no solo foram obtidos a partir do método do perfil instantâneo (LIBARDI et al., 1980).

O coeficiente de cultura simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e) foram calculados apenas para as condições onde a palma apresentou os maiores rendimentos produtivos. O K_c foi obtido a partir da razão entre a ET_c e ET_0 , conforme o boletim da FAO-56 (ALLEN et al., 1998):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (3)$$

em que, ET_c é a evapotranspiração cultura, em mm dia^{-1} , e ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

O K_c duplo foi obtido a partir da separação dos componentes transpiração (K_{cb}) e a evaporação do solo (K_e). Para tal, a evapotranspiração foi particionada em transpiração (T) (Eq. 4) e evaporação (E) (ALBERTO et al., 2014) (Eq. 5) e, o K_{cb} e K_e foram calculados pelas Eqs. 6 e 7, respectivamente.

$$T = ET \times [1 - \exp(-k \times IAF)] \quad (4)$$

$$E = ET - T \quad (5)$$

$$K_{cb} = \frac{T}{ET_0} \quad (6)$$

$$K_c = \frac{E}{ET_0} \quad (7)$$

em que, T é a transpiração da cultura (mm); k é o coeficiente de extinção luminosa; IAF é o índice de área foliar, que no caso da palma assume-se índice de área do cladódio (IAC), em $m^2 m^{-2}$; E é a evaporação da água do solo (mm). Os valores de k para a palma OEM, MIU e IPA foram 0,42, 0,57 e 0,52, respectivamente, estimados conforme Leite et al. (2017).

A curva do K_c foi determinada a partir do ajuste de modelos gaussianos de três parâmetros gerados de regressões entre o K_c observado e os dias de cultivo. A taxa de emissão de cladódios foi utilizada para avaliar o desenvolvimento da planta (i.e., fenofases), e a partir da determinação do comprimento de cada fenofase o K_c inicial, K_c médio e K_c final foram identificados (ALLEN et al., 1998).

2.5. Indicadores de eficiência no uso da água

A produtividade de água da cultura (PA_c , $Mg m^{-3}$) e a produtividade de água de irrigação (PA_i , $Mg m^{-3}$) foram calculadas para as condições estudadas, a partir das Eqs. 8 e 9, respectivamente (FERNÁNDEZ et al., 2020).

$$PA_c = \frac{Y}{\sum(ET_c)} \quad (8)$$

$$PA_i = \frac{Y}{\sum(I)} \quad (9)$$

em que, ET_c é a evapotranspiração da cultura (m^3); P é a precipitação pluvial total ao longo do período experimental (m^3); I é a irrigação total ao longo do período experimental (m^3); Y é a produtividade da cultura em base fresca ($Mg ha^{-1}$).

A produtividade econômica de água da cultura (PEA_c , $US\$ m^{-3}$) (Eq. 10) e a produtividade econômica da água de irrigação (PEA_i , $US\$ m^{-3}$) (Eq. 11) (FERNÁNDEZ et al., 2020) foram determinadas a fim de verificar a viabilidade econômica do uso de irrigação em sistemas de produção com palma forrageira.

$$PEA_c = \frac{LU}{\sum(ET_c)} \quad (10)$$

$$PEA_i = \frac{LU}{\sum(I)} \quad (11)$$

em que, LU é o lucro obtido por área, em US\$ ha⁻¹, considerando os custos para implantação dos sistemas produtivos (FERNÁNDEZ et al., 2020) e a venda de forragem (i.e., valor da tonelada de palma igual a US\$ 27,80 com base no comércio local), ET_c é a evapotranspiração da cultura (m³ ha⁻¹), e I é a irrigação acumulada ao longo do ciclo (m³).

2.6. Fator de resposta de produção (K_y)

Para classificar os clones de palma forrageira quanto a sensibilidade ao déficit hídrico foi calculado o fator de resposta de produção (K_y) (DOORENBOS & KASSAM, 1979). Dessa forma, os clones foram classificados como muito sensíveis ao déficit hídrico (K_y > 1), tolerantes ao déficit hídrico (K_y < 1) e medianamente sensíveis ao déficit hídrico (K_y = 1).

$$\left(1 - \frac{Y_r}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_r}{ET_m}\right) \quad (12)$$

em que, Y_r é o rendimento real obtido (Mg ha⁻¹); Y_m é o rendimento máximo obtido em cada condição de cultivo (Mg ha⁻¹); K_y é o fator de resposta da produção; ET_r é a evapotranspiração real total (mm) e ET_m é a evapotranspiração máxima (mm).

2.7. Análise estatística

Os dados de produtividade e dos indicadores de eficiência do uso da água foram submetidos a teste de normalidade (Shapiro-Wilk test) e homocedasticidade a 5% de significância (Oneill e Mathews test). Atendendo aos pressupostos, procedeu-se com teste de análise de variância e, quando significativos, realizou-se o teste de média de Tukey a 5% de probabilidade. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados com o pacote Exp.des.pt (FERREIRA et al., 2018) do software R (R CORE TEAM, 2019).

3. RESULTADOS

3.1. Condições ambientais

3.1.1. Experimentos do Sítio I

Os valores mensais de precipitação pluvial, ET₀, radiação solar global (R_s), temperatura do ar (Temp.), umidade relativa do ar (RH) e velocidade do vento (Ws) são apresentados na Fig. 2. O total de precipitação pluvial durante o ciclo 2012/2013 nos

experimentos I e II foi igual a 517,7 e 423,2 mm, respectivamente, sendo os meses de janeiro e abril de 2013 os mais chuvosos do período, com valores mensais acumulados de 112,8 e 109,8 mm, respectivamente. A ET_0 média apresentou valor mínimo de 3,8 mm dia^{-1} e máximo de 6,61 mm dia^{-1} , com média igual a 5,16 mm dia^{-1} . Os valores médios de SR e Air temp. foram de 21,6 $\text{MJ m}^{-2} \text{mês}^{-1}$ e 26,4 °C, respectivamente. A RH observada durante o período oscilou entre 40,6 e 63,58%, com valor médio de 52,6%, e a Ws média mensal foi igual a 2,71 m s^{-1} .

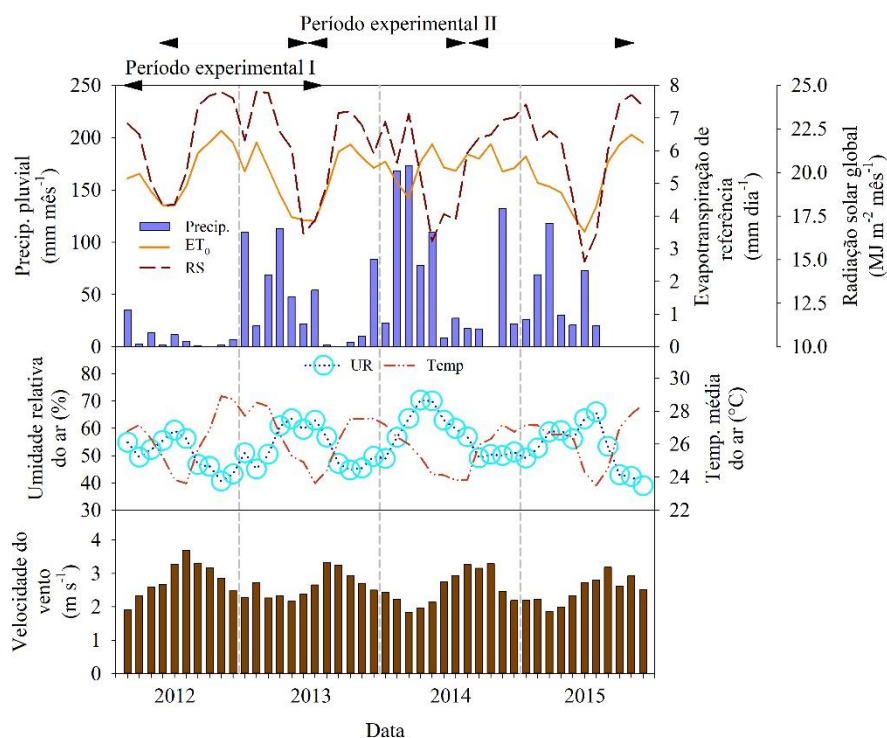


Figura 2. Condições ambientais durante o período experimental dos experimentos I e II do sítio I, em Serra Talhada, Pernambuco.

O segundo (i.e., 2013/2014) e o terceiro (i.e., 2014/2015) ciclos produtivos do experimento II apresentaram as maiores precipitações pluviais observadas no Sítio I, com valores acumulados de 781,1 e 529,4 mm, respectivamente. A ET_0 média observada em ambos os ciclos foi de 5,32 mm dia^{-1} . Ao longo do segundo ciclo a SR média foi 20,17 $\text{MJ m}^{-2} \text{mês}^{-1}$. Os valores médios da Temp. mínima e máxima foram iguais a 23,6 e 27,6 °C, respectivamente, com média igual a 25,5 °C. A RH e Ws apresentaram valores médio iguais a 57,0% e 2,57 m s^{-1} , respectivamente. Em relação ao terceiro ciclo, observou-se valor médio de SR igual a 21,58 $\text{MJ m}^{-2} \text{mês}^{-1}$, com Temp. oscilando entre valores de

23,5 e 28,4 °C, e média de 26,38 °C. A RH média foi igual a 52,3% e a WS média observada foi de 2,57 m s⁻¹ mês⁻¹.

3.1.2. Experimentos do Sítio II

As condições ambientais durante o período I e II são apresentadas na Fig. 3. Ao longo do primeiro ciclo observou-se uma precipitação pluvial acumulada de 1002,8 mm, onde os meses de fevereiro (100,6 mm) e abril (175,8) de 2017; fevereiro (166,4 mm) e março (108,8 mm) de 2018 foram os mais chuvosos, correspondendo a 55% do total precipitado desse período. Os valores mensais de ET₀ variaram de 3 a 6,2 mm, com média igual a 4,74 mm dia⁻¹. A R_s oscilou entre 13,55 e 24,83 MJ m⁻², com média mensal de 20,08 MJ m⁻². Os valores médios da Temp. e UR mínima e máxima foram iguais a 22,05 e 28,92 °C e 43,18 e 68,58%, respectivamente, com média igual a 26,28 °C e 56,46%, respectivamente. Em média, a velocidade do vento foi de 2,53 m s⁻¹ mês⁻¹.

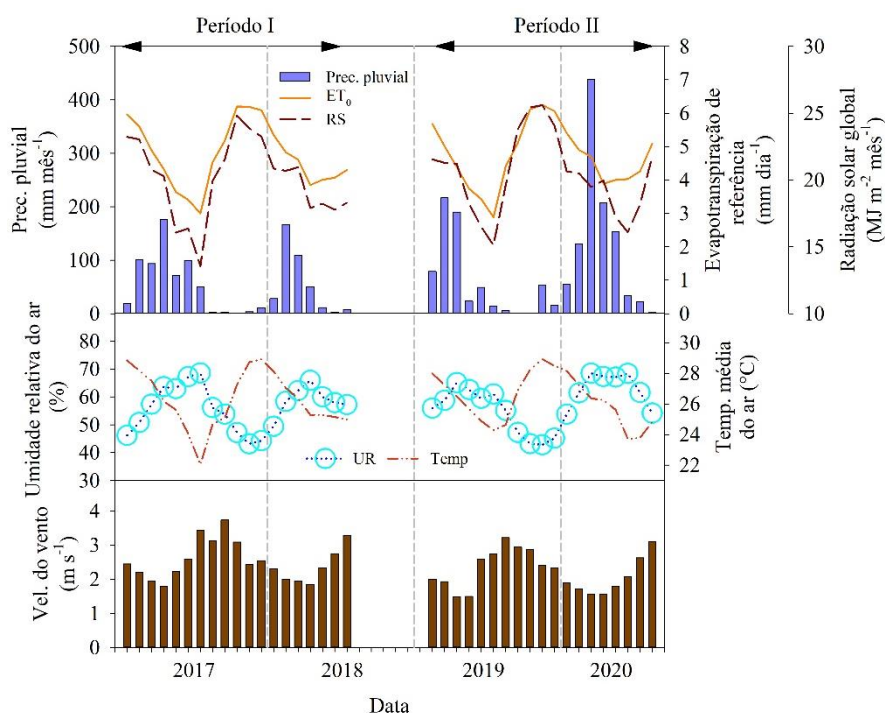


Figura 3. Condições ambientais durante o período experimental dos experimentos III e IV do Sítio II, em Serra Talhada, Pernambuco.

O segundo ciclo produtivo da cultura foi marcado pela elevada precipitação pluvial acumulada, igual a 1687,8 mm, sendo o ano de 2020 responsável por 61,75% do total precipitado. Nesse ano, os meses de fevereiro, março, abril e maio apresentaram valores

acumulados acima de 100 mm mês^{-1} , representando 55,10% do total observado. Em 2019, os meses de março e abril foram os mais chuvosos, com valores acumulados de 216,4 e 190 mm mês^{-1} , respectivamente. A ET_0 média mensal foi igual a 4,70 mm, com valores oscilando entre 2,88 e 6,25 mm dia^{-1} . A R_s observada foi semelhante à do período I, com média de 20,33 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$. Resultado semelhante foi verificado para Temp., UR e WS, que apresentaram valores médios iguais a 26,30 °C, 57,84% e 2,23 m s^{-1} , respectivamente.

3.2. Rendimento de matéria fresca (FMY) e seca (DMY) e conteúdo de matéria seca (DMC)

3.2.1. Experimentos do Sítio I

A Tabela 2 mostra que não houve interação entre os fatores estudados sobre o rendimento em massa fresca (FMY), seca (DMY) e o conteúdo de massa seca (DMC) da palma forrageira ($p > 0,05$) no experimento I. Contudo, foi observado que os clones avaliados apresentaram diferença entre si ($p < 0,05$), com maiores valores de FMY (85,20 Mg ha^{-1}) e DMY (6,56 Mg ha^{-1}) para a Orelha de Elefante Mexicana (OEM) ($p < 0,05$), e DMC superiores em OEM e Miúda (MIU) (0,08) em relação ao clone IPA Sertânia (IPA) ($p < 0,05$). No experimento II, os resultados mostraram que a interação entre os fatores regimes hídricos (WR) e sistemas de cultivo (CS) não influenciaram o rendimento do clone OEM nos três ciclos produtivos estudados ($p > 0,05$) (Tabela 3). Ao analisar os fatores isoladamente, percebeu-se que os CS durante todos os ciclos afetaram o FMY e DMY da cultura ($p < 0,05$), sendo o sistema com cobertura morta responsável pelos maiores valores em relação ao sistema sem cobertura (Tabela 3). Por outro lado, o fator WR não afetou o rendimento da cultura apenas no ciclo 2012-2013 ($p > 0,05$), sendo verificado influência sobre o DMY no ciclo 2013-2014, onde os regimes de 0 e 25% ET_0 favoreceram os maiores rendimentos (6,06 Mg ha^{-1}), e no ciclo 2014-2015, em que a FMY foi maior nos regimes de 25, 50, 75 e 100% ET_0 , com valor médio igual a 73,77 Mg ha^{-1} , enquanto a condição de sequeiro favoreceu maior DMC em relação aos demais tratamentos ($p < 0,05$) (Tabela 3).

Tabela 2. Análise de variância (ANOVA) para produtividade em matéria fresca (FMY), seca (DMY) e conteúdo de matéria seca (DMC) de clones de palma forrageira cultivados sob diferentes regimes hídricos e frequências de irrigação

Fonte de variação	Valor - p		
	FMY	DMY	DMC
Regimes hídricos (WR)	0,2178	0,4869	0,0285
Frequências (FR)	0,1447	0,3517	0,0506
Clones (CL)	0,0006**	<0,0001**	<0,0001**
WR x FR	0,3455	0,5925	0,1626
WR x CL	0,8162	0,6983	0,9726
FR x CL	0,5185	0,457	0,8759
WR x FR x CL	0,861	0,7047	0,8212
Clones	Médias		
	FMY	DMY	DMC
IPA	63,09b	4,12b	0,07b
MIU	54,63b	4,20b	0,08a
OEM	85,20a	6,56a	0,08a

Nota: valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,01$).

Os asteriscos (**) denotam significância de 0,01.

MS, matéria seca (Mg ha^{-1}); DMC, teor de matéria seca; MF, matéria fresca (Mg ha^{-1}).

Tabela 3. Análise de variância (ANOVA) para produtividade em matéria fresca (FMY), seca (DMY) e conteúdo de matéria seca (DMC) da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana sob diferentes regimes hídricos com e sem cobertura morta no solo

Ciclo 2012-2013			
Fonte de variação	Valor - p		
	FMY	DMY	DMC
Regimes hídricos (WR)	0,8821	0,5032	0,5014
Sistema de cultivo (CS)	0,0043**	0,0175*	0,5177
WR x CS	0,9175	0,7573	0,4923
Regimes hídricos	Média		
	FMY	DMY	DMC
0	140,46	8,70	0,058
25	153,10	9,03	0,057
50	152,42	9,21	0,057
75	146,79	7,58	0,091
100	128,13	7,71	0,058
Sistema de cultivo	Média		
	FMY	DMY	DMC
Sem cobertura	125,09b	7,52b	0,06

Com cobertura	163,03a	9,37a	0,06
Ciclo 2013-2014			
Fonte de variação	Valor - p		
	FMY	DMY	DMC
Regimes hídricos (WR)	0,1373	0,0275*	0,3769
Sistema de cultivo (CS)	<0,0001**	<0,0001**	0,0675
WR x CS	0,1668	0,1713	0,3180
Regimes hídricos	Média		
	FMY	DMY	DMC
0	100,54	6,56a	0,09
25	93,71	5,56a	0,08
50	83,87	4,98b	0,08
75	89,33	4,95b	0,07
100	71,35	4,26b	0,09
Sistema de produção	Média		
	FMY	DMY	DMC
Sem cobertura	58,04b	3,72b	0,09
Com cobertura	117,48a	6,81a	0,07
Ciclo 2014-2015			
Fonte de variação	Valor - p		
	FMY	DMY	DMC
Regimes hídricos (WR)	0,021*	0,2075	<0,0001**
Sistema de cultivo (CS)	<0,0001**	<0,0001**	<0,0001**
WR x CS	0,4849	0,2693	0,4713
Regimes hídricos	Média		
	FMY	DMY	DMC
0	41,36b	8,80	0,20a
25	71,80a	10,88	0,14b
50	81,75a	11,47	0,13b
75	69,65a	8,07	0,11b
100	71,91a	8,37	0,11b
Sistema de cultivo	Média		
	FMY	DMY	DMC
Sem cobertura	44,74b	4,70b	0,12b
Com cobertura	89,85a	14,33a	0,17a

Nota: valores médios seguidos da mesma letra minúscula no mesmo ciclo de produção não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,01$). Os asteriscos (**) e (*) denotam significância de 0,01 e 0,05, respectivamente. MS, matéria seca (Mg ha^{-1}); DMC, teor de matéria seca; MF, matéria fresca (Mg ha^{-1}).

Embora os WR não tenham influenciado o rendimento dos clones no primeiro ciclo produtivo, considerou-se o regime hídrico de 25% da ET_0 para a determinação das fenofases, evapotranspiração (ET_c) e coeficientes de cultivo (K_c , K_{cb} e K_e), devido ao maior valor de FMY observado nessa condição. Pelo mesmo motivo, adotamos as condições de 25% ET_0 e 50% ET_0 nos ciclos 2013-2014 e 2014-2015, respectivamente.

3.2.2. Experimentos do Sítio II

Os valores de FMY, DMY e DMC dos clones IPA, MIU e OEM cultivados sob diferentes WR (0%, 40%, 80% e 120% da ET_c) durante dois ciclos produtivos (2017-2018 e 2019-2020) são apresentados na Tabela 4. Não houve interação entre os clones de palma e os WR em ambos os ciclos ($p > 0,05$), mas ao avaliarmos os fatores de forma isolada, observamos diferença significativa entre os clones estudados ($p < 0,05$). Nos dois ciclos produtivos, a espécie OEM apresentou os maiores valores de FMY e DMY em comparação com os clones MIU e IPA, que não diferiram entre si ($p > 0,05$) (Tabela 4). Embora os WR não tenham apresentado efeito sobre o rendimento dos clones, maiores valores de FMY e DMY foram obtidos nas condições de 120% da ET_c e 40% da ET_c no primeiro e segundo ciclo, respectivamente. Por esse motivo, a análise das fenofases foram realizadas para essas condições (*sessão 3.3*), bem como a determinação da ET_c e coeficientes de cultivo.

Não foi verificado interação entre os fatores sistemas e clones sobre os FMY, DMY e DMC durante o ciclo 2017-2018 do experimento IV (Tabela 5). Houve efeito significativo do clone para as variáveis FMY, DMY e DMC ($p < 0,05$). O clone OEM apresentou os maiores rendimentos em FMY (310,76 Mg ha⁻¹) e DMY (32,99 Mg ha⁻¹) em comparação à IPA e MIU, que em média produziram 152,98 Mg ha⁻¹ e 27,14 Mg ha⁻¹ em FMY e DMY, respectivamente. Ao avaliarmos os sistemas de cultivo, as condições irrigado com cobertura (ICC), sequeiro com (SCC) e sem cobertura (SSC) favoreceram maiores rendimentos aos clones em relação ao sistema irrigado sem cobertura (ISC). Em média, o ICC, SCC e SSC apresentaram rendimentos iguais a 225,54 Mg ha⁻¹ em FMY e 21,27 Mg ha⁻¹ em DMY (Tabela 5). Apesar dos sistemas ICC, SCC e SSC não diferirem entre si, o primeiro foi utilizado para determinação da ET_c e dos coeficientes de cultivo, pelo fato dessa condição propiciar ao longo do período de estudo maior disponibilidade hídrica às plantas (Figura 5C, *sessão 3.4*).

Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) para produtividade em matéria fresca (FMY), seca (DMY) e conteúdo de matéria seca (DMC) de clones de palma forrageira cultivados sob diferentes regimes hídricos (% ET_c) durante dois ciclos produtivos

Source of variation	Ciclo 2017-2018			Ciclo 2019-2020		
	Valor - P			Valor - P		
	FMY	DMY	DMC	FMY	DMY	DMC
Clones (C)	<0,0001**	<0,0001**	<0,0012**	<0,0001**	<0,0001**	<0,0001**
Regimes hídricos (WR)	0,3088	0,24779	0,5957	0,4645	0,5671	0,342
C x WR	0,7242	0,6608	0,9713	0,2735	0,118	0,0792
Clones	Média			Média		
	FMY	DMY	DMC	FMY	DMY	DMC
IPA	82,57c	6,79c	0,084b	101,26b	7,32b	0,07b
MIU	190,67b	19,25b	0,097a	67,97b	5,27b	0,077b
OEM	312,38a	30,73a	0,104a	321,97a	28,41a	0,09a
Regimes hídricos	Média			Média		
	FMY	DMY	DMC	FMY	DMY	DMC
0	192,00	19,59	0,100	152,72	13,23	0,076
40	166,06	16,00	0,092	183,55	15,12	0,076
80	200,00	18,56	0,095	154,14	13,66	0,082
120	222,75	21,55	0,093	164,24	12,66	0,078

Nota: valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,01).

Os asteriscos (**) denotam significância de 0,01.

MS, matéria seca (Mg ha⁻¹); DMC, teor de matéria seca; MF, matéria fresca (Mg ha⁻¹).

Tabela 5. Análise de variância (ANOVA) para produtividade em matéria fresca (FMY), seca (DMY) e conteúdo de matéria seca (DMC) de clones de palma forrageira sob diferentes condições de cultivo

Fonte de variação	Valor - P		
	FMY	DMY	DMC
Clones (C)	<0,0001**	<0,0001**	0,0002**
Sistemas (S)	<0,005**	0,005**	0,1001
C x S	0,2265	0,2800	0,8953
Clones	Média		
	FMY	DMY	DMC
IPA	153,87b	11,94b	0,08b
MIU	152,10b	15,20b	0,10a
OEM	310,76a	32,99a	0,09a
Sistemas	Média		
	FMY	DMY	DMC
ISC	145,67b	15,38b	0,09
ICC	232,26a	21,27a	0,08
SSC	206,99a	20,32a	0,09
SCC	237,39a	23,21a	0,09

Nota: valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,01).

Os asteriscos (**) denotam significância de 0,01.

MS, matéria seca (Mg ha⁻¹); DMC, teor de matéria seca; MF, matéria fresca (Mg ha⁻¹).

No ciclo 2019-2020 do experimento IV, a interação entre os fatores avaliados não influenciou o rendimento em FMY, DMY e DMC dos clones de palma ($p > 0,05$) (Tabela 6). Nesse experimento, o clone OEM se sobressaiu em relação aos demais ($p < 0,05$), apresentando médias iguais a 770,10 Mg ha⁻¹ e 64,45 Mg ha⁻¹ para FMY e DMY, respectivamente. As frequências de irrigação (FR) não afetaram o desempenho produtivo dos clones ($p > 0,05$), todavia, maiores valores em FMY foram observados para a FR de 7 dias (Tabela 6). Portanto, a ET_c, K_c, K_{cb} e K_e foram definidos para essa condição (sessão 3.4).

Tabela 6. Análise de variância (ANOVA) para produtividade em matéria fresca (FMY), seca (DMY) e conteúdo de matéria seca (DMC) de clones de palma forrageira cultivados sob diferentes frequências de irrigação

Fonte de variação	Valor - p		
	FMY	DMY	DMC
Clones (C)	<0,0001**	<0,0001**	0,2272
Frequências de irrigação (FR)	0,8098	0,967	0,2124
C x FR	0,9973	0,6943	0,2617
Clones	Média		
	FMY	DMY	DMC
IPA	214,71b	15,30b	0,104
MIU	144,50b	13,60b	0,071
OEM	770,10a	64,45a	0,084
Frequência de irrigação	Média		
	FMY	DMY	DMC
7 dias	407,75	29,75	0,071
14 dias	347,09	30,94	0,081
21 dias	391,23	30,79	0,078
28 dias	359,67	33,00	0,115

Nota: valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,01$).

Os asteriscos (**) denotam significância de 0,01.

MS, matéria seca (Mg ha⁻¹); DMC, teor de matéria seca; MF, matéria fresca (Mg ha⁻¹).

3.3. Fenofases dos clones de palma forrageira

3.3.1. Experimentos do Sítio I

Na Figura 6 são apresentadas as fenofases do clone OEM sob regime hídrico de 25% ET₀ nos ciclos 2012-2013 (Fig. 4A e B) e 2013-2014 (Fig. 4C e D), e sob regime de 50% da ET₀ no ciclo 2014-2015 (Fig. 4E e F) cultivado com (WM) e sem (NM) cobertura morta sobre o solo. Para essas condições observou-se quatro fenofases bem definidas (P1,

P2, P3 e P4). Independente do ciclo, a P1 apresentou a menor duração em relação às demais, sobretudo quando a cultura foi cultivada em NM (Tabela 7). Durante o primeiro ciclo (Fig. 4A) a P1 teve duração de 7 dias (387 °C dias) sob sistema NM e 48 dias (497 °C dias) no sistema WM. A P2 foi a fenofase de maior duração, onde em NM durou 169 dias (583 °C dias) e WM 136 dias (537 °C dias). Assim como a P2, a fenofase P3 foi maior em NM, com duração de 96 dias (613 °C dias), em relação a WM (88 dias, 556 °C dias). Em ambos os sistemas a P4 teve duração semelhante, com 68 e 67 dias em NM e WM, respectivamente, perdurando até o final do ciclo da cultura.

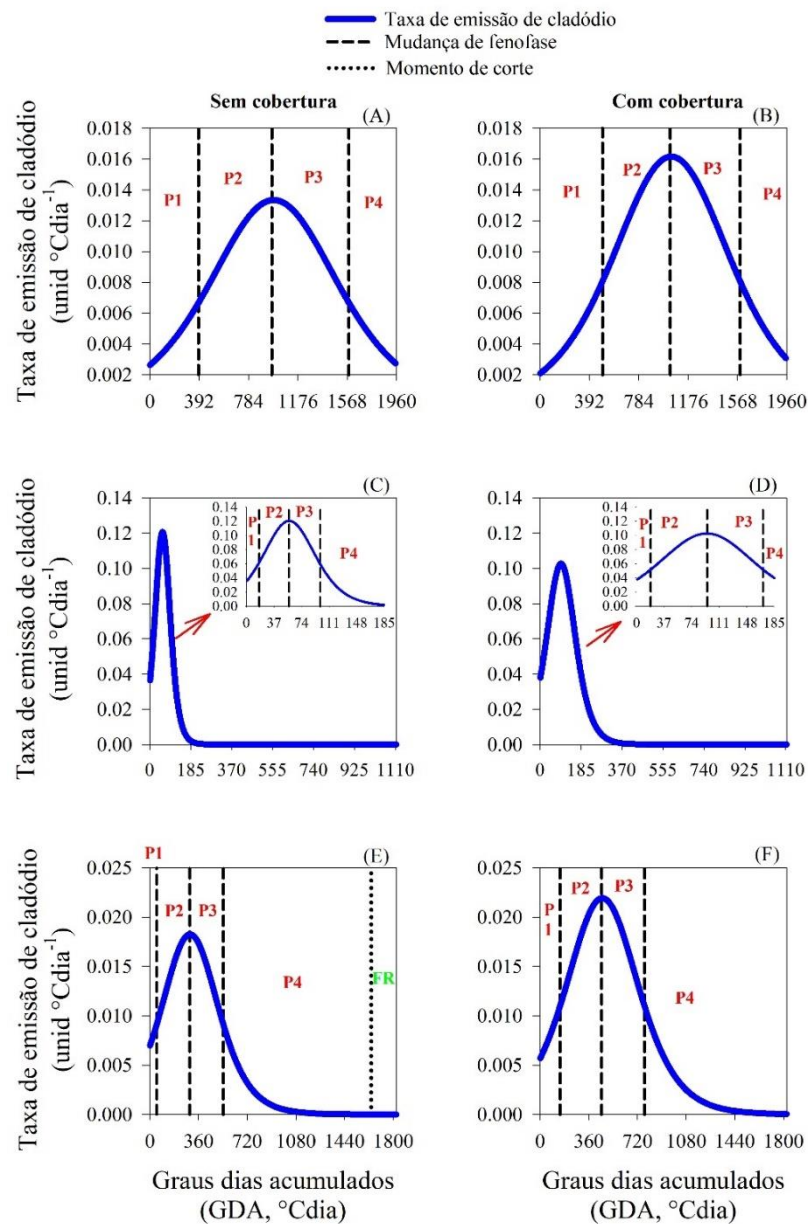


Figura 4. Taxa de emissão de cladódio e estágios fenológicos do clone de palma forrageira OEM em função dos graus dias acumulados sob diferentes lâminas de irrigação e condições de cultivo nas safras 2012-2013 (A e B), 2013-2014 (C e D) e 2014-2015 (E e F).

Tabela 7. Duração, graus-dia acumulados, evapotranspiração da cultura média diária e acumulada e coeficiente de cultura por fenofase do clone de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana sob regime hídrico de 25% da ET_o e diferentes condições de cultivo durante a safra 2012-2013

Sem cobertura														
Fenofases	Dur.	Dur. acum.	GD	GDA	ET_c	ΣET_c	K_c			K_{cb}	K_e	fT	fE	NTC
	dias	°Cdia	mm dia ⁻¹	mm	I	F	M	Unids.						
P1	7	7	387	387	0,65	5	0,15	0,17	0,16	0,01	0,15	8%	92%	4
P2	169	176	583	970	2,74	464	0,17	0,75	0,48	0,06	0,43	10%	90%	10
P3	96	272	613	1583	4,23	406	0,75	0,59	0,71	0,15	0,56	21%	79%	16
P4-HT	68	340	371	1954	2,28	155	0,58	0,30	0,44	0,15	0,29	34%	66%	18

Com cobertura														
Fenofases	Dur	Duração acum,	GD	GDA	ET_c	ΣET_c	K_c			K_{cb}	K_e	fT	fE	NTC
	dias	°Cdia	mm dia ⁻¹	mm	I	F	M	Unids,						
P1	48	48	497	497	0,96	46	0,16	0,30	0,23	0,02	0,21	8%	92%	4
P2	136	184	537	1034	3,31	450	0,31	0,75	0,56	0,07	0,49	11%	89%	11
P3	88	272	556	1590	4,22	371	0,75	0,61	0,71	0,17	0,54	25%	75%	16
P4-HT	67	339	364	1954	2,47	165	0,61	0,35	0,48	0,18	0,29	39%	61%	18

Graus dias (GD) e graus dias acumulados (GDA) calculados com uma temperatura base de 22°C;

HT - época de colheita;

RF - Período de reserva de forragem, mantendo a cultura no campo;

I, F e M – valores inicial, final e médio do coeficiente da cultura (K_c) por fenofase, respectivamente;

K_{cb} , K_e , fT e fE – coeficiente da cultura basal, coeficiente de evaporação do solo, fração da transpiração e fração evaporação, respectivamente;

NTC – número total de cladódios.

Em se tratando do ciclo 2013-2014, o comportamento da P1 foi semelhante entre os sistemas, com duração de 4 e 5 dias em NM e WM, respectivamente. Sob o sistema WM a fenofase P3 teve a maior duração observada, com 46 dias (76 °C dias), enquanto em NM a P2 e P3 tiveram duração semelhantes (Tabela 8). Em ambos os sistemas, uma maior taxa de emissão de cladódios foi observada antes da P4, com redução ao decorrer dessa fenofase, que por sua vez, apresentou uma curta duração, com 7 e 4 dias em NM e WM, respectivamente. Diferente do ciclo 2012-2013, nesse a condição WM favoreceu uma maior emissão de cladódios, sendo observado ao final do ciclo 17 cladódios por planta, em relação ao NM (11 cladódios planta) (Tabela 8).

Tabela 8. Duração, graus-dia acumulados, evapotranspiração da cultura média diária e acumulada e coeficiente de cultura por fenofase do clone de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana sob regime hídrico de 25% da ET_0 e diferentes condições de cultivo durante a safra 2013-2014

Sem cobertura														
Fenofases	Dur.	Dur. acum.	GD	GDA	ET _c	ΣET _c	K _c			K _{cb}	K _e	fT	fE	NTC
	dias	°Cdia	mm dia ⁻¹	mm	I	F	M	Unids.						
P1	4	4	17	17	0,30	1,2	0,07	0,07	0,07	0,01	0,06	17%	83%	3
P2	23	27	40	57	0,40	9,2	0,08	0,14	0,11	0,02	0,09	17%	83%	7
P3	25	52	42	99	0,75	18,8	0,14	0,24	0,19	0,03	0,16	17%	83%	11
P4-HT	7	59	15	114	1,27	8,9	0,25	0,27	0,26	0,04	0,22	17%	83%	11
P4-RF	-	>59	213	>213	2,64	546,7	0,28	0,17	0,46	0,08	0,38	17%	83%	>11

Com cobertura														
Fenofases	Dur	Duração acum.	GD	GDA	ET _c	ΣET _c	K _c			K _{cb}	K _e	fT	fE	NTC
	dias	°Cdia	mm dia ⁻¹	mm	I	F	M	Unids.						
P1	5	5	19	19	4,16	21	0,15	0,16	0,15	0,04	0,12	23%	77%	4
P2	46	51	76	95	3,85	177	0,16	0,36	0,25	0,06	0,19	23%	77%	10
P3	28	79	75	170	4,98	139	0,36	0,50	0,43	0,10	0,33	23%	77%	16
P4-HT	4	83	18	188	5,19	21	0,50	0,52	0,51	0,13	0,37	26%	74%	17
P4-RF	-	>83	395	>395	5,65	1034	0,52	0,21	0,53	0,16	0,37	31%	69%	>17

Graus dias (GD) e graus dias acumulados (GDA) calculados com uma temperatura base de 22°C;

HT - época de colheita;

RF - Período de reserva de forragem, mantendo a cultura no campo;

I, F e M – valores inicial, final e médio do coeficiente da cultura (K_c) por fenofase, respectivamente;

K_{cb}, K_e, fT e fE – coeficiente da cultura basal, coeficiente de evaporação do solo, fração da transpiração e fração evaporação, respectivamente;

NTC – número total de cladódios.

Sob o sistema WM as fenofases durante o 3º ciclo produtivo foram maiores em relação a NM (Fig. 6E e F), o que favoreceu um maior número de cladódios (Tabela 9). A P1 durou 35 dias (148 °C dias) em WM e 11 dias (51 °C dias) em NM. A P2 atingiu 61 dias (306 °C dias) e 49 dias (244 °C dias) em NM e WM, respectivamente. A P3 durou 60 dias (318 °C dias) em WM, enquanto em NM essa fenofase atingiu 54 dias (248 °C dias). Por fim, a P4 apresentou duração de 31 e 10 dias em NM e WM, respectivamente, com o sistema NM favorecendo a antecipação do corte em relação ao período conduzido (Fig. 4E).

Tabela 9. Duração, graus-dia acumulados, evapotranspiração da cultura média diária e acumulada e coeficiente de cultura por fenofase do clone de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana sob regime hídrico de 50% da ET_o e diferentes condições de cultivo durante a safra 2014-2015

Fenofases	Dur.	Dur. acum.	GD	GDA	ET_c	ΣET_c	K_c			K_{cb}	K_e	fT	fE	NTC
	dias	°Cdia	mm dia ⁻¹	mm	I	F	M	Unids.						
Sem cobertura														
P1	11	11	51	51	0,21	2	0,04	0,05	0,04	0,01	0,04	13%	87%	2
P2	49	60	244	295	0,69	34	0,05	0,21	0,12	0,02	0,10	13%	87%	6
P3	54	114	248	543	2,23	121	0,22	0,60	0,40	0,05	0,35	13%	87%	10
P4-HT	10	124	50	593	3,78	38	0,61	0,68	0,65	0,08	0,56	13%	87%	10
P4-RF	-	>124	1044	1637	2,21	658	0,69	0,00	0,47	0,08	0,40	18%	82%	>10
Com cobertura														
P1	35	35	148	148	0,62	22	0,06	0,16	0,11	0,02	0,09	19%	81%	3
P2	61	96	306	454	1,73	105	0,16	0,50	0,31	0,06	0,25	19%	81%	9
P3	60	156	318	772	3,79	227	0,50	0,86	0,70	0,13	0,57	19%	81%	14
P4-HT	31	187	147	919	4,55	141	0,87	0,92	0,90	0,18	0,72	20%	80%	15
P4-RF	-	>187	904	1823	1,67	391	0,92	0,01	0,38	0,09	0,28	27%	73%	>15

Graus dias (GD) e graus dias acumulados (GDA) calculados com uma temperatura base de 22°C;

HT - época de colheita;

RF - Período de reserva de forragem, mantendo a cultura no campo;

I, F e M – valores inicial, final e médio do coeficiente da cultura (K_c) por fenofase, respectivamente;

K_{cb} , K_e , fT e fE – coeficiente da cultura basal, coeficiente de evaporação do solo, fração da transpiração e fração evaporação, respectivamente;

NTC – número total de cladódios.

3.3.2. Experimentos do Sítio II

A taxa de emissão de cladódios, a delimitação das fenofases e o momento de corte dos clones de palma são mostradas nas Figuras 5, 6, 7 e 8. Quatro fenofases foram observadas durante os dois ciclos produtivos dos experimentos III e IV. A fenofase P1 no 1º ciclo foi mais curta em relação às demais fenofases, independente do clone. Para OEM, MIU e IPA a P1 teve duração igual a 68 dias (325 °C dias), 28 dias (127 °C dias) e 62 dias (295 °C dias), respectivamente (Fig. 5 e Tabela 10). Já a P2 teve duração de 153 dias (557 °C dias) e 260 dias (1100 °C dias) para a OEM e MIU, respectivamente, sendo essa a fenofase mais duradoura desses clones. Para a IPA, a P2 durou 270 dias (1333 °C dias), sendo a mais longa desse clone. A P3 dos clones OEM e MIU teve duração de 100 e 213 dias, respectivamente (Fig. 5 e Tabela 10). A fenofase 4 foi subdividida em duas fases, uma considerada como o momento de colheita e a outra como o período de reserva forrageira (RF), que se refere ao período que a cultura é mantida em campo após atingir o momento de corte. Com base na taxa de emissão de cladódios, o clone OEM atingiu um momento de colheita mais rápido, aos 1829 °C dias, sendo seguido dos clones MIU (2972 °C dias) e IPA (3249 °C dias) (Fig. 5).

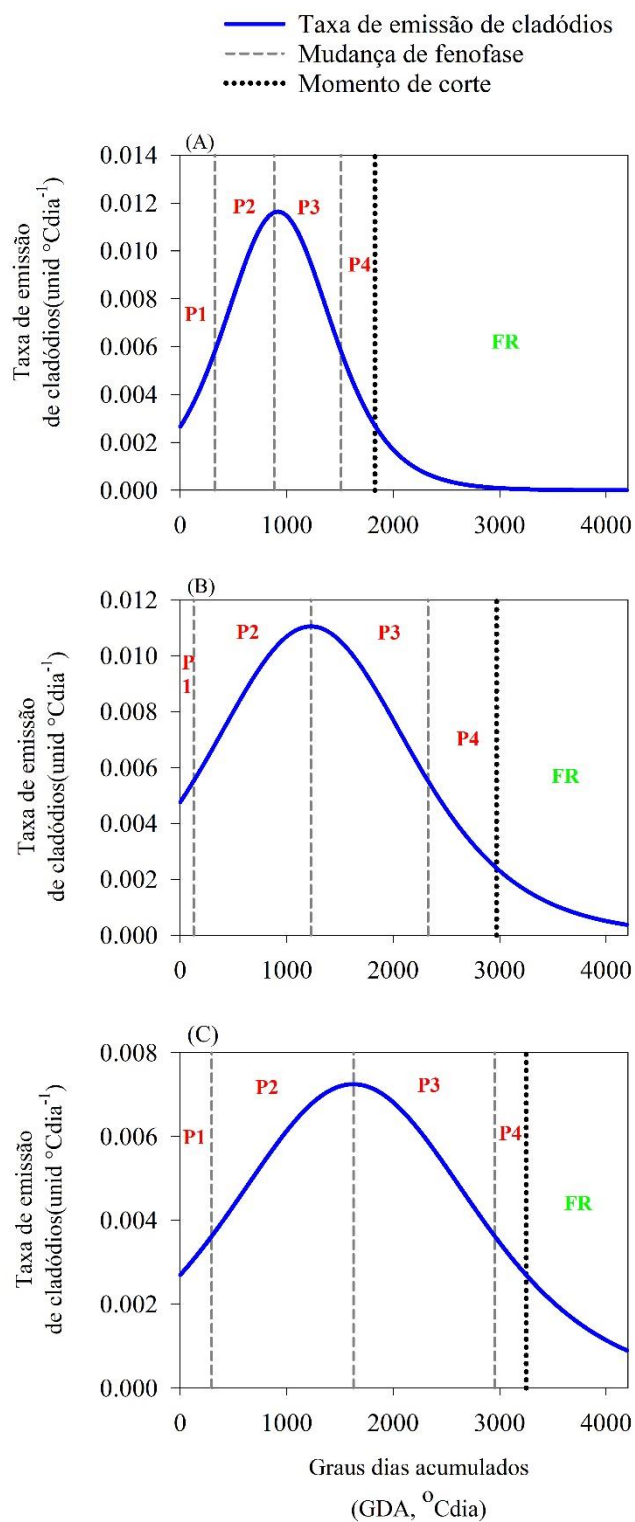


Figura 5. Taxa de emissão de cladódio e estágios fenológicos de clones de palma forrageira OEM (A), MIU (B) e IPA (C) em função dos graus dias acumulados, sob regime hídrico de 120%ET_c durante a safra 2017-2018.

Tabela 10. Duração, graus-dia acumulados, evapotranspiração da cultura média diária e acumulada e coeficiente de cultura por fenofase de clones de palma forrageira cultivados sob regime hídrico de 120% da ET_c durante a safra 2017-2018

Fenofases	Dur.	Dur	GD	GDA	ET_c	ΣET_c	K_c			K_{cb}	K_e	fT	fE	NTC
	dias	Acum.					$^{\circ}Cdia$	I	F					
Orelha de Elefante Mexicana														
P1	68	68	325	325	2,49	169	0,49	0,51	0,52	0,20	0,31	40%	60%	2
P2	153	221	557	882	2,79	427	0,54	0,65	0,60	0,24	0,36	40%	60%	7
P3	100	321	628	1510	4,31	431	0,65	0,70	0,68	0,27	0,41	40%	60%	13
P4-HT	41	362	319	1829	4,58	188	0,70	0,71	0,71	0,28	0,43	40%	60%	15
P4-RF	-	>363	2365	4194	3,18	1721	0,71	0,51	0,67	0,50	0,17	75%	25%	>15
Miúda														
P1	28	28	127	127	1,72	48	0,42	0,45	0,44	0,12	0,32	28%	72%	4
P2	260	288	1100	1227	2,88	748	0,45	0,65	0,56	0,15	0,40	28%	72%	14
P3	155	443	1101	2328	4,13	641	0,65	0,71	0,68	0,27	0,41	39%	61%	24
P4-HT	213	656	644	2972	3,01	641	0,71	0,68	0,71	0,43	0,28	61%	39%	26
P4-RF	-	>656	1222	4194	3,03	744	0,68	0,51	0,61	0,42	0,19	69%	31%	>26
IPA Sertânia														
P1	62	62	295	295	2,21	137	0,43	0,48	0,46	0,16	0,29	36%	64%	3
P2	270	332	1333	1628	3,20	863	0,48	0,66	0,58	0,21	0,37	36%	64%	11
P3	320	652	1326	2954	3,26	1044	0,66	0,67	0,69	0,39	0,30	56%	44%	19
P4-HT	45	697	295	3249	4,08	183	0,67	0,65	0,66	0,44	0,22	67%	33%	20
P4-RF	-	>697	945	4194	2,77	568	0,65	0,51	0,59	0,41	0,18	70%	30%	>20

Graus dias (GD) e graus dias acumulados (GDA) calculados com uma temperatura base de 22°C;

HT - época de colheita;

RF - Período de reserva de forragem, mantendo a cultura no campo;

I, F e M – valores inicial, final e médio do coeficiente da cultura (K_c) por fenofase, respectivamente;

K_{cb} , K_e , fT e fE – coeficiente da cultura basal, coeficiente de evaporação do solo, fração da transpiração e fração evaporação, respectivamente;

NTC – número total de cladódios.

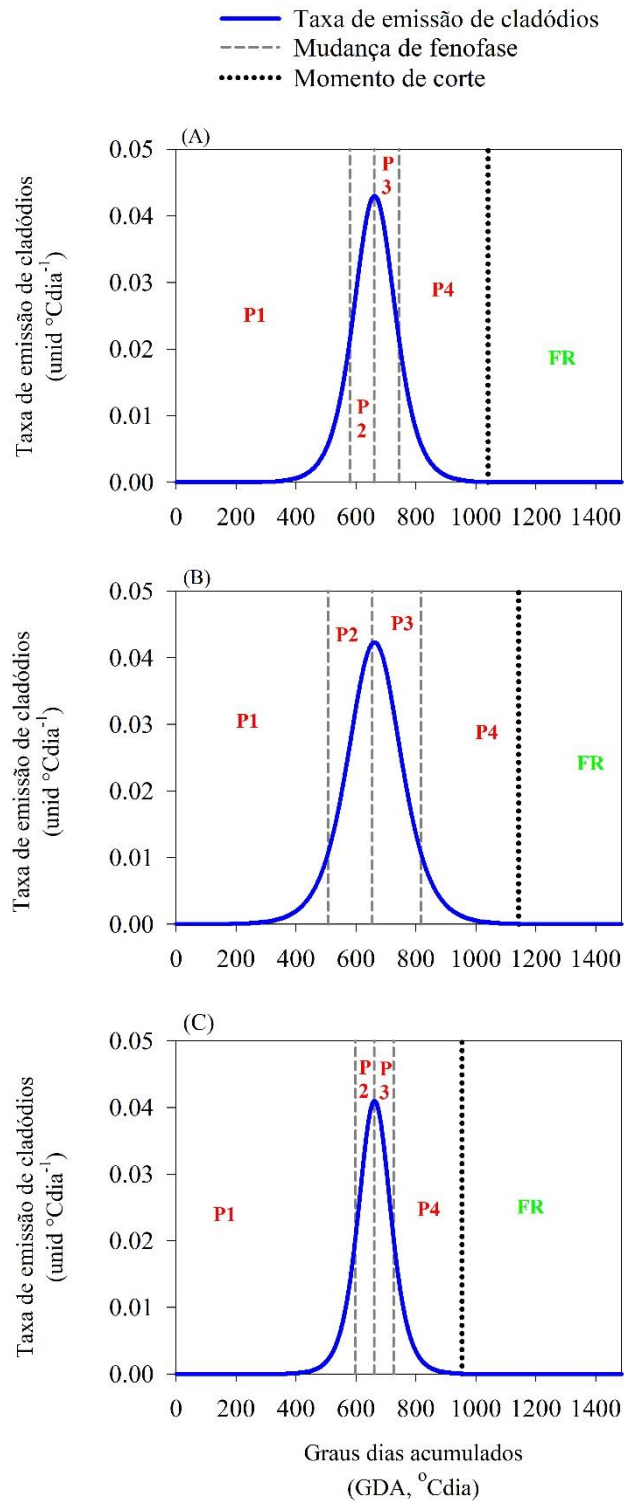


Figura 6. Taxa de emissão de cladódio e estágios fenológicos de clones de palma forrageira OEM (A), MIU (B) e IPA (C) em função dos graus dias acumulados, sob regime hídrico de 40% da ET_c durante a safra 2019-2020.

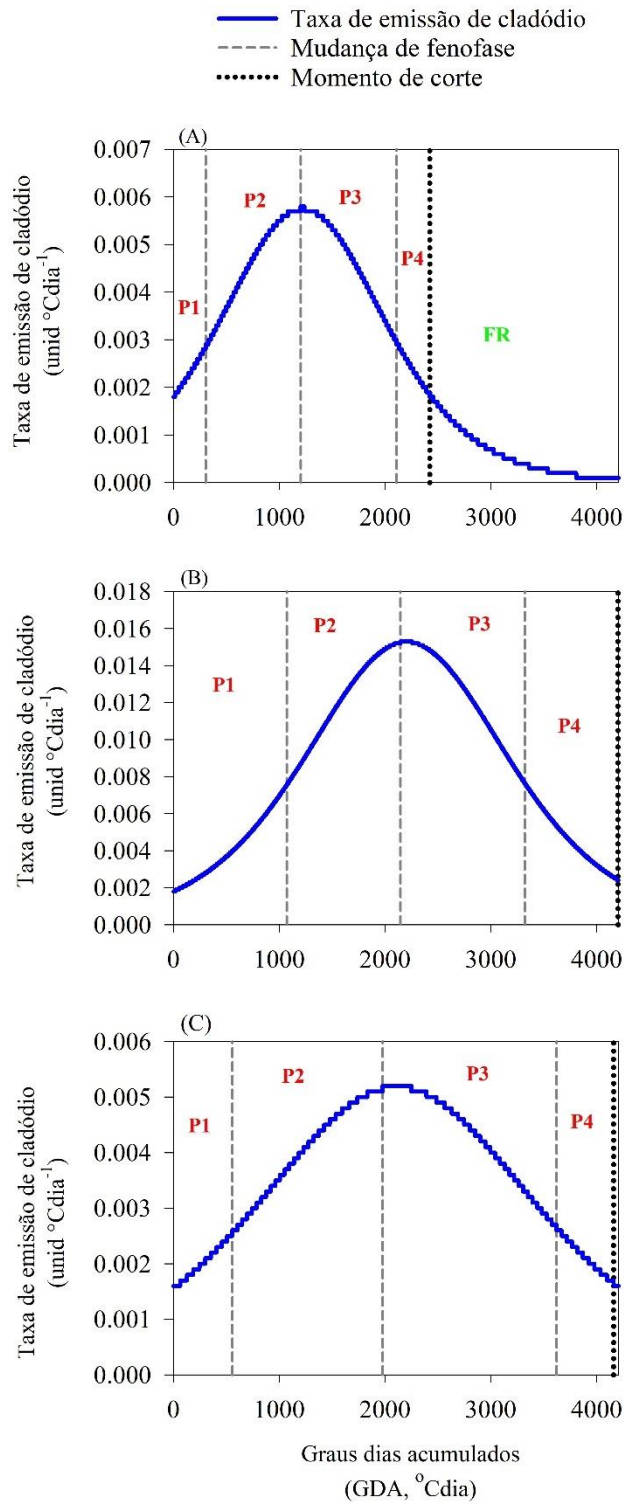


Figura 7. Taxa de emissão de cladódio e estágios fenológicos de clones de palma forrageira OEM (A), MIU (B) e IPA (C) em função dos graus dias acumulados, cultivados sob irrigação e com uso de cobertura morta durante a safra 2017-2018.

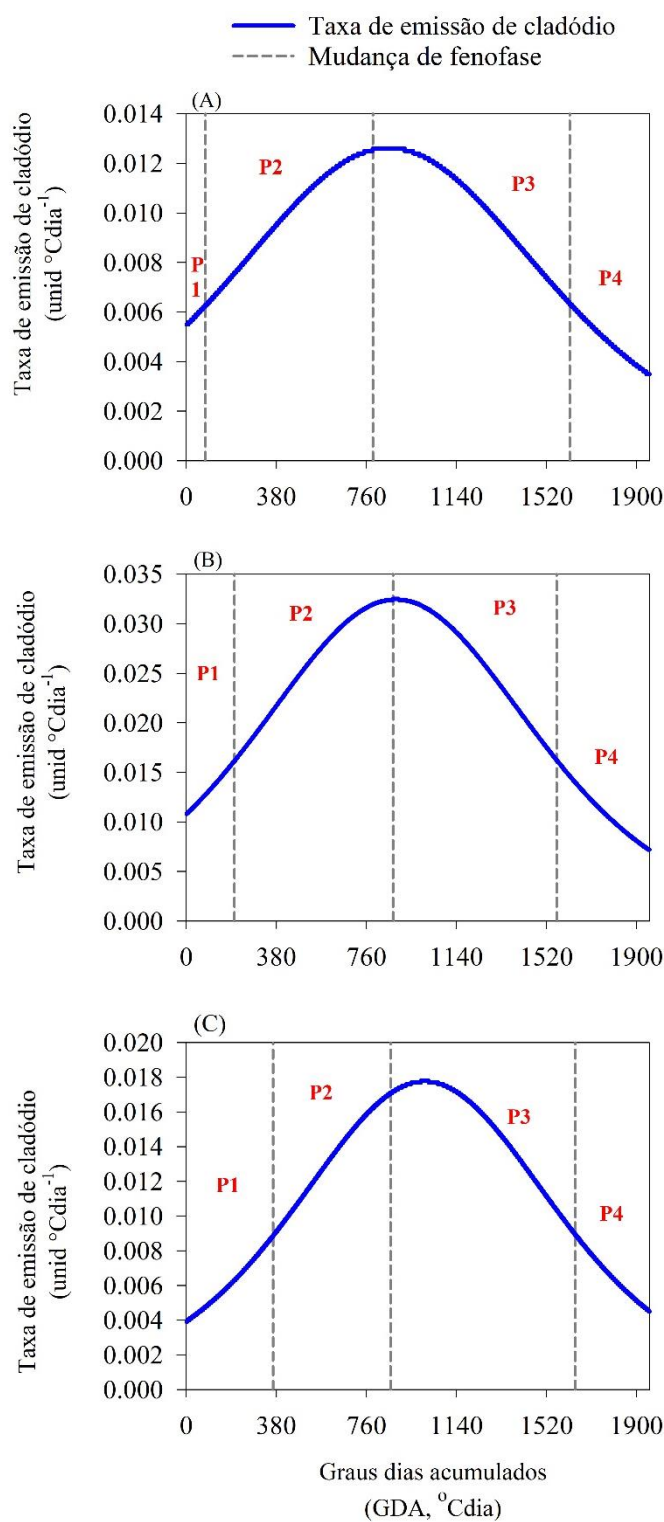


Figura 8. Taxa de emissão de cladódio e estágios fenológicos de clones de palma forrageira OEM (A), MIU (B) e IPA (C) em função dos graus dias acumulados, cultivados sob frequência de irrigação de 7 dias durante safra 2019-2020.

Se tratando do segundo ciclo produtivo, para todos os clones avaliados observou-se a antecipação do momento de corte (Fig. 6), onde o clone IPA apresentou o menor período para ser colhido, aos 954 °C dias (Fig. 6C), em relação aos clones OEM (1041 °C dias) (Fig. 6A) e MIU (1143 °C dias) (Fig. 6B). A P1 foi a fenofase de maior duração

em OEM e MIU, com 101 dias (580 °C dias) e 103 dias (558 °C dias), respectivamente (Tabela 11). Para o clone IPA, verificou-se a mesma tendência do primeiro ciclo, onde a P3 teve a maior duração (146 dias, 65 °C dias), seguida da P2 (129 dias, 63 °C dias) e da P1 (113 dias, 598 °C dias) (Tabela 11). Independente do ciclo, o clone MIU apresentou maior taxa de emissão de cladódios (0,025 unid. °Cdia), o que resultou em maior número de cladódios por planta ao final do ciclo (Tabela 10 e 11). Os clones OEM e IPA apresentaram em média taxas iguais a 0,011 e 0,007 unid. °C dia, respectivamente.

Tabela 11. Duração, graus-dia acumulados, evapotranspiração da cultura média diária e acumulada e coeficiente de cultura por fenofase de clones de palma forrageira cultivados sob regime hídrico de 40% da ET_c durante a safra 2019-2020

Fenofases	Dur. dias	Dur Acum. dias	GD °Cdia	GDA	ET_c mm dia ⁻¹	ΣET_c mm	K_c			K_{cb}	K_e	fT	fE	NTC Unids.
							I	F	M					
Orelha de Elefante Mexicana														
P1	108	108	580	580	3,16	340	0,47	0,78	0,66	0,31	0,35	47%	53%	2
P2	21	129	81	661	2,77	58	0,78	0,78	0,78	0,36	0,42	47%	53%	5
P3	22	151	83	744	3,29	72	0,78	0,75	0,77	0,36	0,41	47%	53%	8
P4-HT	101	252	297	1041	2,59	261	0,75	0,39	0,59	0,27	0,31	47%	53%	9
Miúda														
P1	103	103	558	558	3,24	333,76	0,46	0,82	0,67	0,23	0,44	34%	66%	2
P2	27	130	100	658	3,04	82,05	0,82	0,82	0,82	0,28	0,54	34%	66%	6
P3	34	164	108	766	3,30	112,35	0,82	0,82	0,79	0,27	0,52	34%	66%	10
P4-HT	108	272	377	1143	2,50	270,44	0,76	0,31	0,54	0,18	0,36	34%	66%	11
IPA Sertânia														
P1	113	113	598	598	3,35	378,00	0,48	0,70	0,84	0,23	0,47	33%	67%	2
P2	16	129	63	661	2,81	44,92	0,84	0,84	0,84	0,27	0,57	33%	67%	4
P3	17	146	65	726	3,57	60,63	0,83	0,82	0,81	0,27	0,56	33%	67%	6
P4-HT	87	233	228	954	2,72	236,55	0,81	0,66	0,47	0,21	0,44	33%	67%	7

Graus dias (GD) e graus dias acumulados (GDA) calculados com uma temperatura base de 22°C;

HT - época de colheita;

RF - Período de reserva de forragem, mantendo a cultura no campo;

I, F e M - valores inicial, final e médio do coeficiente da cultura (K_c) por fenofase, respectivamente;

K_{cb} , K_e , fT e fE - coeficiente da cultura basal, coeficiente de evaporação do solo, fração da transpiração e fração evaporação, respectivamente;

NTC - número total de cladódios.

Se tratando do 1º ciclo do experimento IV, a duração das fenofases variou de acordo com o clone analisado (Fig. 7). Enquanto para os clones OEM e IPA a fenofase P1 foi a mais curta, com 69 dias (304 °C dias) e 121 dias (555 °C dias), respectivamente, para o clone MIU a P1 juntamente com a P3 foram as mais duradouras, com 267 dias (1070 °C dias) e 298 °C dias (1176 °C dias), respectivamente (Tabela 12). Para o clone OEM a P2 foi a fenofase de maior duração (216 dias, 897 °C dias), ao passo que a P3 foi a mais duradoura para a IPA, com duração de 372 dias (1644 °C dias) (Tabela 12). Com base na subdivisão da fenofase 4, verificou-se que aos 2422 °C dias a colheita do clone OEM pode ser realizada (Fig. 7A), bem antes do observado para a MIU e IPA, que apresentaram um momento de corte de 4130 °C dias (Fig. 7B e C).

Tabela 12. Duração, graus-dia acumulados, evapotranspiração da cultura média diária e acumulada e coeficiente de cultura por fenofase de clones de palma forrageira cultivados sob irrigação e com cobertura morta durante a safra 2017-2018

Fenofases	Dur.	Dur	GD	GDA	ET _c	ΣET _c	K _c			K _{cb}	K _e	fT	fE	NTC
	dias	Acum.					°Cdia	I	F					
Orelha de Elefante Mexicana														
P1	69	69	304	304	3,19	220	0,62	0,67	0,65	0,26	0,39	40%	60%	3
P2	216	285	897	1201	3,79	818	0,67	0,78	0,74	0,29	0,44	40%	60%	7
P3	122	407	907	2108	4,91	599	0,78	0,77	0,78	0,33	0,45	42%	58%	11
P4-HT	63	470	314	2422	3,58	226	0,77	0,75	0,76	0,44	0,31	59%	41%	12
P4-RF	-	>470	1708	4130	2,69	1153	0,75	0,39	0,58	0,36	0,22	62%	38%	>12
Miúda														
P1	267	267	1070	1070	3,28	876	0,53	0,76	0,66	0,22	0,44	33%	67%	7
P2	146	413	1075	2145	4,96	724	0,76	0,80	0,79	0,28	0,51	35%	65%	20
P3	298	711	1176	3321	3,48	1036	0,80	0,65	0,75	0,47	0,27	64%	36%	34
P4-HT	187	898	809	4130	2,52	472	0,65	0,46	0,55	0,45	0,10	81%	19%	38
P4-RF	-	>898	-	>4130	2,52	472	0,65	0,46	0,55	0,45	0,10	81%	19%	>38
IPA Sertânia														
P1	121	121	555	555	3,00	363	0,56	0,67	0,62	0,19	0,43	30%	70%	4
P2	264	385	1421	1976	4,23	1117	0,67	0,77	0,74	0,22	0,51	30%	70%	9
P3	372	757	1644	3620	3,24	1204	0,77	0,52	0,67	0,30	0,37	45%	55%	16
P4-HT	141	898	510	4130	1,89	266	0,52	0,38	0,45	0,26	0,19	58%	42%	17
P4-RF	-	>898	-	>4130	1,89	266	0,52	0,38	0,45	0,26	0,19	58%	42%	>17

Graus dias (GD) e graus dias acumulados (GDA) calculados com uma temperatura base de 22°C;

HT - época de colheita;

RF - Período de reserva de forragem, mantendo a cultura no campo;

I, F e M – valores inicial, final e médio do coeficiente da cultura (K_c) por fenofase, respectivamente;

K_{cb}, K_e, fT e fE – coeficiente da cultura basal, coeficiente de evaporação do solo, fração da transpiração e fração evaporação, respectivamente;

NTC – número total de cladódios.

Em relação ao ciclo 2019-2020, a P1 teve a menor duração observada entre as fenofases, independente do clone (Fig. 8). Para OEM, MIU e IPA essa fenofase durou 14 dias, 35 dias e 61 dias, respectivamente (Tabela 13). Para os clones MIU e IPA, a P3 teve a maior duração, com 175 dias (691 °C dias) e 216 dias (779 °C dias), respectivamente. Por outro lado, o clone OEM apresentou uma maior duração da P4 (108 dias, 482 °C dias) (Tabela 13). Como observado na Tabela 13, o clone IPA finalizou o seu ciclo na fenofase 3, ao passo que a OEM e MIU na P4, mas sem o período de RF. Tanto no ciclo 2017-2018 como em 2019-2020 a espécie MIU apresentou maior taxa de emissão de cladódios em relação aos demais, com média de 0.09 unid. °C dias, o que favoreceu um maior número de cladódios por planta ao final dos ciclos produtivos.

Tabela 13. Duração, graus-dia acumulados, evapotranspiração da cultura média diária e acumulada e coeficiente de cultura por fenofase de clones de palma forrageira cultivados sob frequência de irrigação de 7 dias durante a safra 2019-2020

Fenofases	Dur.	Dur	GD	GDA	ET _c	ΣET _c	K _c			K _{cb}	K _e	fT	fE	NTC
	dias	Acum.					°Cdia	I	F					
Orelha de Elefante Mexicana														
P1	14	14	80	80	0,91	13	0,13	0,17	0,15	0,10	0,05	70%	30%	4
P2	98	112	707	787	2,25	221	0,17	0,58	0,36	0,25	0,11	70%	30%	11
P3	46	158	198	985	3,51	162	0,58	0,68	0,68	0,47	0,21	70%	30%	20
P4-HT	108	266	482	1467	3,65	394	0,78	0,86	0,86	0,60	0,26	70%	30%	20
Miúda														
P1	35	35	203	203	1,03	36	0,12	0,22	0,17	0,11	0,06	62%	38%	8
P2	103	138	669	872	2,66	274	0,22	0,69	0,44	0,28	0,17	62%	38%	26
P3	175	313	691	1563	3,24	567	0,69	0,59	0,79	0,50	0,30	62%	38%	44
P4-HT	74	387	203	1766	1,89	140	0,58	0,25	0,41	0,26	0,15	62%	38%	46
IPA Sertânia														
P1	61	61	366	366	1,51	92	0,14	0,36	0,24	0,13	0,10	57%	43%	5
P2	76	137	496	862	3,23	246	0,36	0,75	0,55	0,31	0,24	57%	43%	11
P3	216	353	779	1641	3,18	687	0,75	0,39	0,78	0,44	0,33	57%	43%	23

Graus dias (GD) e graus dias acumulados (GDA) calculados com uma temperatura base de 22°C;

HT - época de colheita;

I, F e M – valores inicial, final e médio do coeficiente da cultura (K_c) por fenofase, respectivamente;

K_{cb}, K_e, fT e fE – coeficiente da cultura basal, coeficiente de evaporação do solo, fração da transpiração e fração evaporação, respectivamente;

NTC – número total de cladódios.

3.4. Umidade do solo, evapotranspiração da cultura (ET_c) e coeficientes de cultura simples (K_c) e duplo (K_{cb} and K_e)

3.4.1. Experimentos do Sítio I

Embora no experimento I os clones tenham sido conduzidos sob irrigação durante todo o período experimental, o conteúdo de água no solo ficou abaixo da capacidade de campo (θ_{fc}) e do ponto de murcha permanente (θ_{wp}) durante a maior parte do período estudado, caracterizando uma condição de restrição hídrica. Os valores de umidade do solo variaram de 0,05 cm³ cm⁻³ a 0,21 cm³ cm⁻³, sendo a umidade na θ_{fc} e no θ_{wp} iguais a 0,17 cm³ cm⁻³ e 0,11 cm³ cm⁻³, respectivamente (Fig. 9A). Por esse motivo, a ET_c e os coeficientes de cultivo não foram determinados para os clones nesse experimento. Por outro lado, durante os três ciclos produtivos conduzidos no experimento II, o conteúdo de água no solo durante a maior parte do período estudado se concentrou acima do θ_{wp} , o que favorece uma maior quantidade de água disponível à cultura. Os valores de θ_{fc} e θ_{wp} nesse experimento foram iguais a 0,22 cm³ cm⁻³ e 0,11 cm³ cm⁻³, respectivamente, e a umidade do solo variou de valores de 0,10 a 0,25 cm³ cm⁻³ em 2012-2013, 0,11 a 0,25 cm³ cm⁻³ em 2013-2014 e 0,15 a 0,25 cm³ cm⁻³ em 2014-2015 (Fig. 9B, C e D).

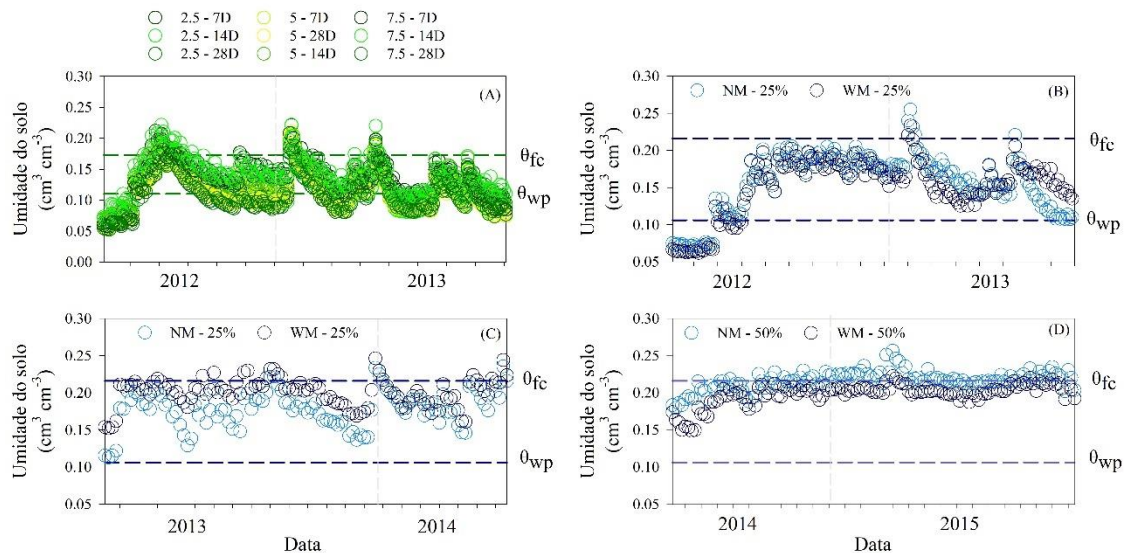


Figura 9. Umidade do solo nas áreas experimentais I (A) e II (B, C, D) do Sítio I durante os anos de 2012 a 2015.

A evapotranspiração da cultura (ET_c) média diária e acumulada, e os coeficientes de cultivo simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e) foram determinados por fenofases da palma nas distintas condições de cultivo do experimento II. O K_c foi definido para as fases inicial, média e final de desenvolvimento da cultura. Durante o primeiro ciclo produtivo da OEM cultivada sob regime hídrico de 25% da ET_0 , com (WM) e sem (NM) uso de cobertura morta no solo, a ET_c diária variou de 0,65 a 4,23 mm dia⁻¹ em NM e entre 0,96 a 4,22 mm dia⁻¹ em WM (Tabela 7). A ET_c diária apresentou maior intensidade na fenofase P3, enquanto a ET_c mais baixa foi verificada na fenofase P1 em ambos os sistemas de cultivo. Em termos cumulativos, a fenofase P2 apresentou os maiores valores em NM (464 mm) e WM (450 mm) devido a sua maior duração em relação às demais fenofases.

Os valores de K_c inicial, médio e final foram maiores no sistema WM, que apresentou valor médio igual a 0,50, enquanto NM apresentou K_c igual a 0,44 (Tabela 7). Por outro lado, ao analisar o K_c ajustado ao longo do ciclo (Fig. 10A), observou-se a mesma tendência entre os sistemas, contudo, com valores variando entre as fenofases dos clones. Isso indica, portanto, que o K_c muda conforme a duração de cada fenofase, que por sua vez, são diferentes entre os sistemas (Tabela 7). Os valores de K_{cb} e K_e pouco variaram entre as condições de cultivo (Tabela 7).

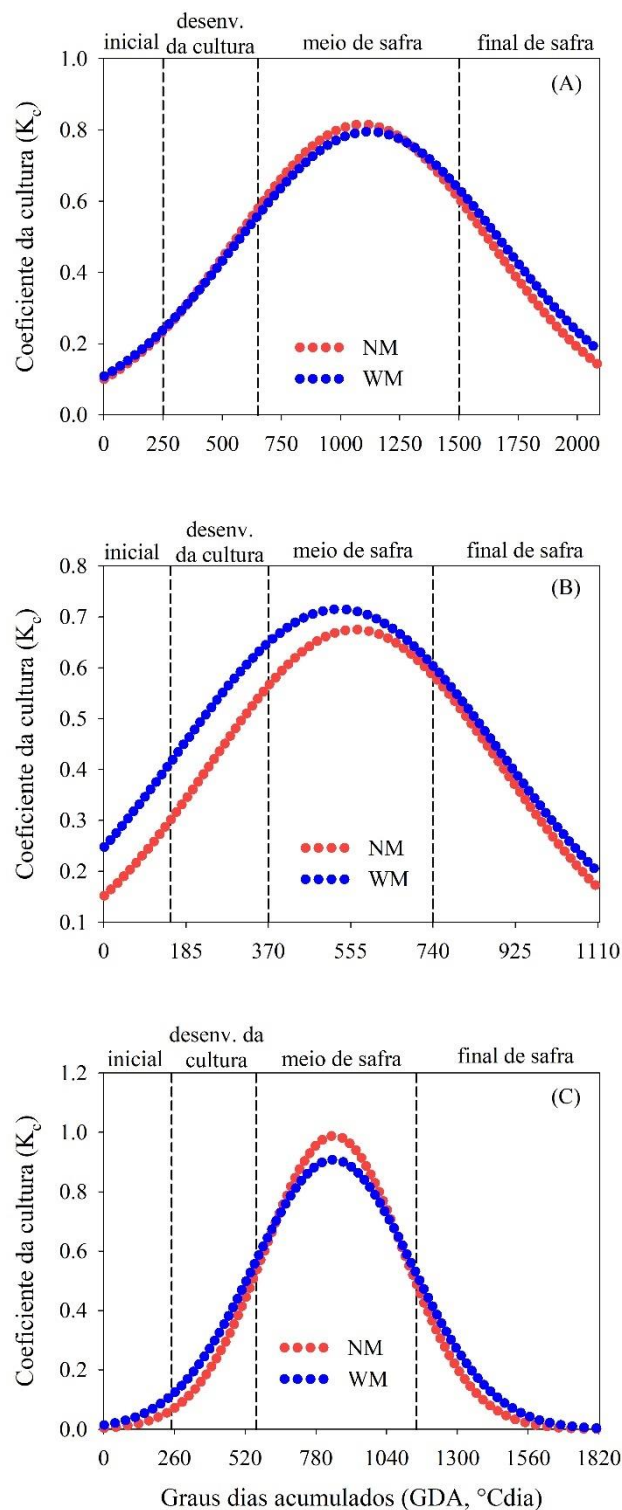


Figura 10. Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado para clones de palma forrageira em função dos graus acumulados, sob diferentes lâminas de irrigação e condições de cultivo nas safras 2012-2013 (A), 2013-2014 (B) e 2014-2015 (C).

Em se tratando do segundo ciclo produtivo da cultura, a variação da ET_c diária teve menor amplitude entre as fenofases em WM ($3,85$ a $5,65 \text{ mm dia}^{-1}$) do que em NM, onde os valores variaram de $0,30$ a $2,64 \text{ mm dia}^{-1}$ (Tabela 8). Em ambos os sistemas, a média diária da ET_c , bem como o seu valor acumulado, foi maior na fenofase P4 ($2,64$ e $3,65$

mm dia⁻¹, e 546,7 e 1034 mm, respectivamente). O menor valor de ET_c diária observado foi de 0,30 mm dia⁻¹ em NM e 3,85 mm dia⁻¹ em WM, nas fenofases P1 e P2, respectivamente.

Assim como observado na ET_c, os valores de K_c foram superiores em WM em comparação com NM, com diferenças diminuindo ao longo do ciclo (P1, 0,07 versus 0,15, diferença de 114%; P2, 127%; P3, 126%, P4 HT, 96% e P4 RF, 15%) (Fig. 10B). Tendência semelhante foi verificada para o K_{cb} e K_e. Contudo, ao analisar as frações transpiração (fT, T/ET) e evaporação (fE, E/ET), observou-se que o uso da cobertura morta reduziu a fE em cerca de 13% em relação ao sistema NM. Por outro lado, maior fT foi verificada em WM, sendo superior 48% em comparação a NM, o que pode ser reflexo do maior desenvolvimento das plantas nessa condição.

Quando o clone OEM foi cultivado sob regime hídrico de 50% da ET₀ (ciclo 3), os valores diários de ET_c variaram de 0,21 a 3,78 mm em NM, e 0,62 a 4,55 mm em WM, sendo os menores e maiores valores observados nas fenofases P1 e P4, respectivamente, em ambos os sistemas (Tabela 9). Em termos cumulativos, a maior intensidade foi observada nas fenofases P3 e P4 (HF e RF), e os menores valores na fenofase inicial de desenvolvimento da cultura (i.e., P1), independente do sistema. Os valores de K_c, K_{cb} e K_e foram maiores em WM (Tabela 9). Todavia, a mesma tendência ao longo do ciclo foi verificada em ambos os sistemas (Fig. 10C). Em média, o K_c, K_{cb} e K_e foi de 0,48, 0,10 e 0,38 em WM, e 0,33, 0,05 e 0,29 em NM, respectivamente. Verificamos ainda, por meio da fE, que a evaporação do solo foi menor cerca de 8% em WM em relação a NM.

3.4.2. Experimentos do Sítio II

Os valores de θ_{fc} e θ_{wp} foram de 0,20 cm³ cm⁻³ e 0,06 cm³ cm⁻³, respectivamente (Fig. 11). A partir da determinação dos tratamentos que propiciaram o maior rendimento produtivo para a cultura (*ver sessão 3.2*), observamos que durante maior parte do período experimental, tanto no primeiro (Fig. 11A, C) quanto no segundo ciclo produtivo (Fig. 11B, D) a umidade do solo se manteve entre o θ_{fc} e θ_{wp} , o que favoreceu condições de plena disponibilidade hídrica para as plantas. Os valores de umidade do solo variaram de 0,05 cm³ cm⁻³ a 0,23 cm³ cm⁻³. Dessa forma, os dados de água obtidos nos regimes de 120% da ET_c e 40% da ET_c do experimento III nos ciclos 2017-2018 e 2019-2020, respectivamente, e a condição de cultivo irrigado com uso de cobertura morta (ICC) no

ciclo 2017-2018 e frequência de irrigação de 7 dias no ciclo 2019-2020 no experimento IV foram utilizados para a determinação da ET_c e coeficientes de cultivos simples e duplo.

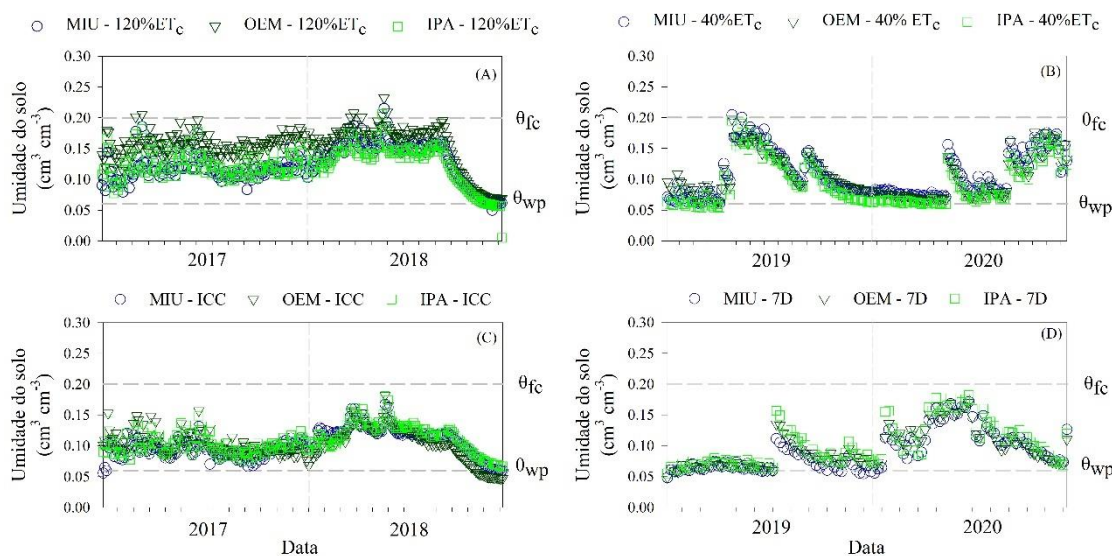


Figura 11. Umidade do solo nas áreas experimentais III (A, B) e IV (C, D) do Sítio II durante os anos de 2017 a 2020.

A ET_c diária e acumulada, e os coeficientes de cultivo simples e duplo dos clones OEM, MIU e IPA cultivados sob regime hídrico de 120% da ET_c durante o ciclo produtivo 2017-2018 no experimento III são apresentados na Tabela 10. Os valores diários de ET_c variaram de 2,49 a 4,58 mm dia^{-1} , 1,72 a 4,13 mm dia^{-1} e 2,21 a 4,08 mm dia^{-1} ao longo do ciclo dos clones OEM, MIU e IPA, respectivamente. Os maiores valores foram observados entre as fenofases P3 e P4, enquanto as menores intensidades ocorreram nas fenofases iniciais, independente do clone. Considerando a ET_c acumulada por fenofase, os valores para OEM, MIU e IPA variaram entre 169 a 1721 mm, 48 a 744 mm e 137 a 588 mm, respectivamente, sendo as fenofases mais duradouras as responsáveis pelos maiores valores de ET_c .

O K_c variou conforme os clones analisados. A espécie OEM apresentou os maiores valores de K_c inicial, médio e final em relação a MIU e IPA. Ao analisar o K_c ajustado (Fig. 12), verificou-se tendência semelhante entre os clones ao longo do ciclo, exceto nas fases inicial e de desenvolvimento da cultura, onde o clone OEM apresentou os maiores valores (Tabela 10). Em média, o K_c foi igual a 0,63, 0,60 e 0,59 para OEM, MIU, e IPA, respectivamente. No que se refere ao coeficiente de cultivo duplo, verificou-se que o clone OEM apresentou maior K_{cb} , o que pode ser devido ao maior desempenho produtivo desse clone em relação aos demais. Por outro lado, o maior K_c foi verificado na espécie

MIU, sobretudo, nas fases iniciais de desenvolvimento (P1 e P2), o que pode ser reflexo do pequeno dossel da planta no estágio inicial, bem como pela menor área dos seus cladódios. Tendência semelhante foi observada no clone IPA.

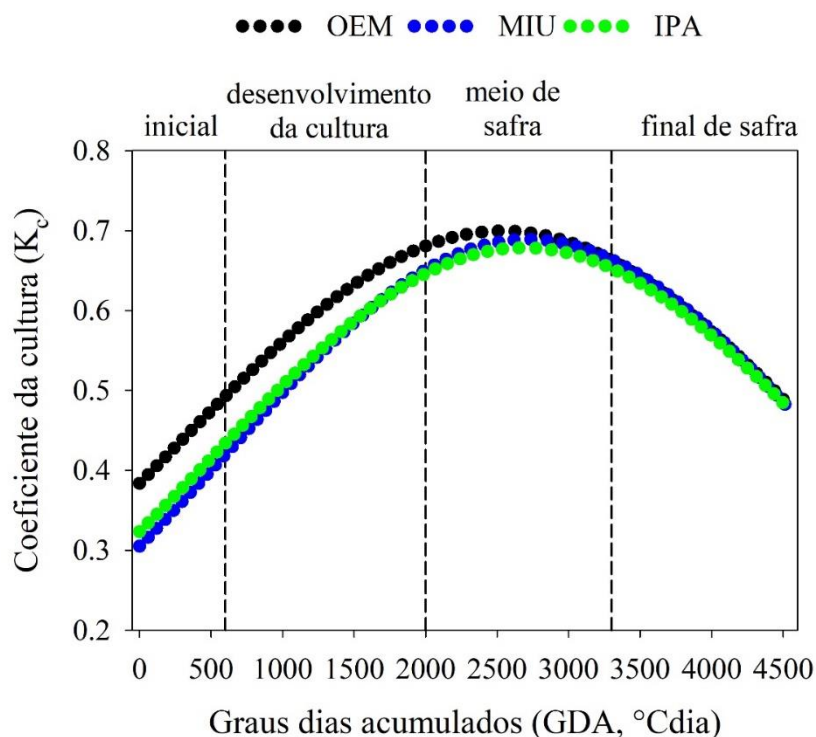


Figura 12. Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado para clones de palma forrageira em função dos graus dias acumulados (GDA), cultivados sob regime hídrico de $120\%ET_c$ durante a safra 2017-2018.

Quando submetidos ao regime de 40% da ET_c durante o ciclo 2019-2020, os clones OEM, MIU e IPA apresentaram ET_c diária variando de 2,59 a 3,29 mm dia^{-1} , 2,50 a 3,30 mm dia^{-1} e 2,72 a 3,57 mm dia^{-1} , respectivamente (Tabela 11). Em termos cumulativos, observou-se, independentemente dos clones, maiores valores nas fenofases 1 e 4, devido as suas maiores durações. A ET_c acumulada nessas fenofases foi igual a 340 (P1) e 261 mm (P4) para OEM, 333,76 e 270 mm para MIU e 378 e 236,5 mm para IPA.

Os valores de K_c foram semelhantes entre os clones de palma ao longo do período estudado, com pouca variação observada nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura (Tabela 11 e Fig. 13). Apenas na fase de médio desenvolvimento (Fig. 13), os clones MIU e IPA apresentaram maiores K_c em relação a OEM, com valores iguais a 0,82 e 0,84, respectivamente. Em média, o K_c para OEM, MIU e IPA sob regime de 40% da ET_c foi de 0,70, 0,71 e 0,74, respectivamente. Em se tratando do coeficiente de cultivo duplo,

maiores valores de K_{cb} foram verificados para OEM, com média de 0,33, enquanto MIU e IPA apresentaram maiores K_c ao longo do ciclo, com médias iguais a 0,46 e 0,51, respectivamente (Tabela 11).

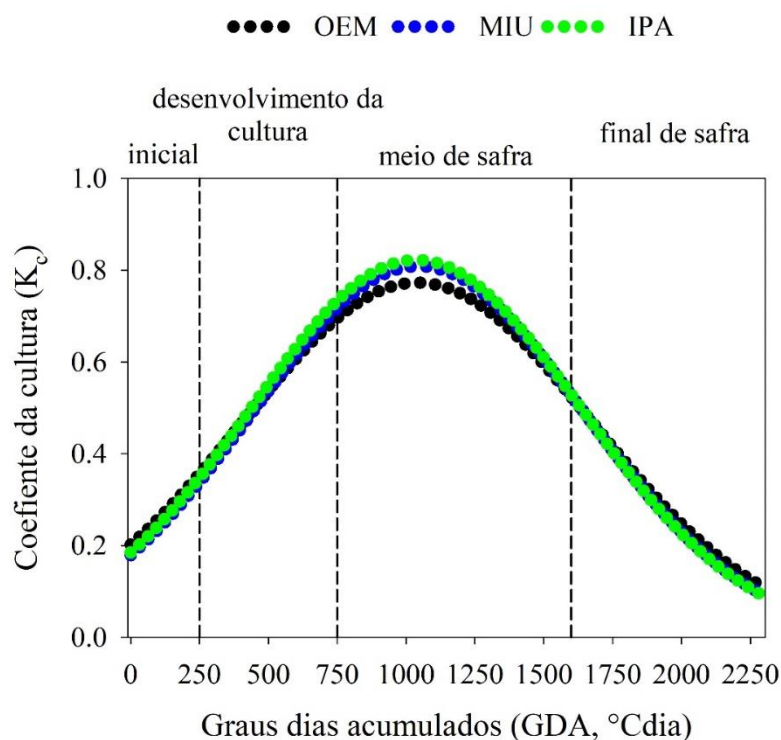


Figura 13. Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado para clones de palma forrageira em função dos graus dias acumulados (GDA), cultivados sob regime hídrico de 40% da ET_c durante a safra 2019-2020.

Os valores de ET_c diária e acumulada, e dos coeficientes de cultivo simples e duplo dos clones de palma cultivados sob irrigação e uso de cobertura morta no experimento IV, durante o ciclo produtivo 2017-2018 são apresentados na Tabela 12. Observou-se uma variação da ET_c diária de 2,69 a 4,91 mm dia^{-1} para OEM, 2,52 a 4,96 mm dia^{-1} para MIU e 1,89 a 4,26 mm dia^{-1} para IPA ao longo do ciclo das culturas. A ET_c acumulada foi maior nas fenofases de maior duração, com variação entre os clones. A fenofase 4 (RF) apresentou maior ET_c acumulada no clone OEM (1153 mm), enquanto a fenofase 3 favoreceu maior ET_c em MIU (1036 mm) e IPA (1204 mm).

Embora o comportamento da curva do K_c ajustado tenha sido semelhante entre os clones (Fig. 14), observou-se uma variação nos valores médios, onde o clone OEM apresentou maior K_c (0,70), seguido do clone MIU (0,66) e IPA (0,59) (Tabela 12). Em relação aos coeficientes de cultivo duplo, percebeu-se menores valores de K_{cb} no início do ciclo dos clones, e aumento com o passar das fenofases. Comportamento contrário foi

verificado em K_e , onde maiores valores foram observados no início do ciclo, e posterior redução nas fases finais de desenvolvimento da cultura (Tabela 12).

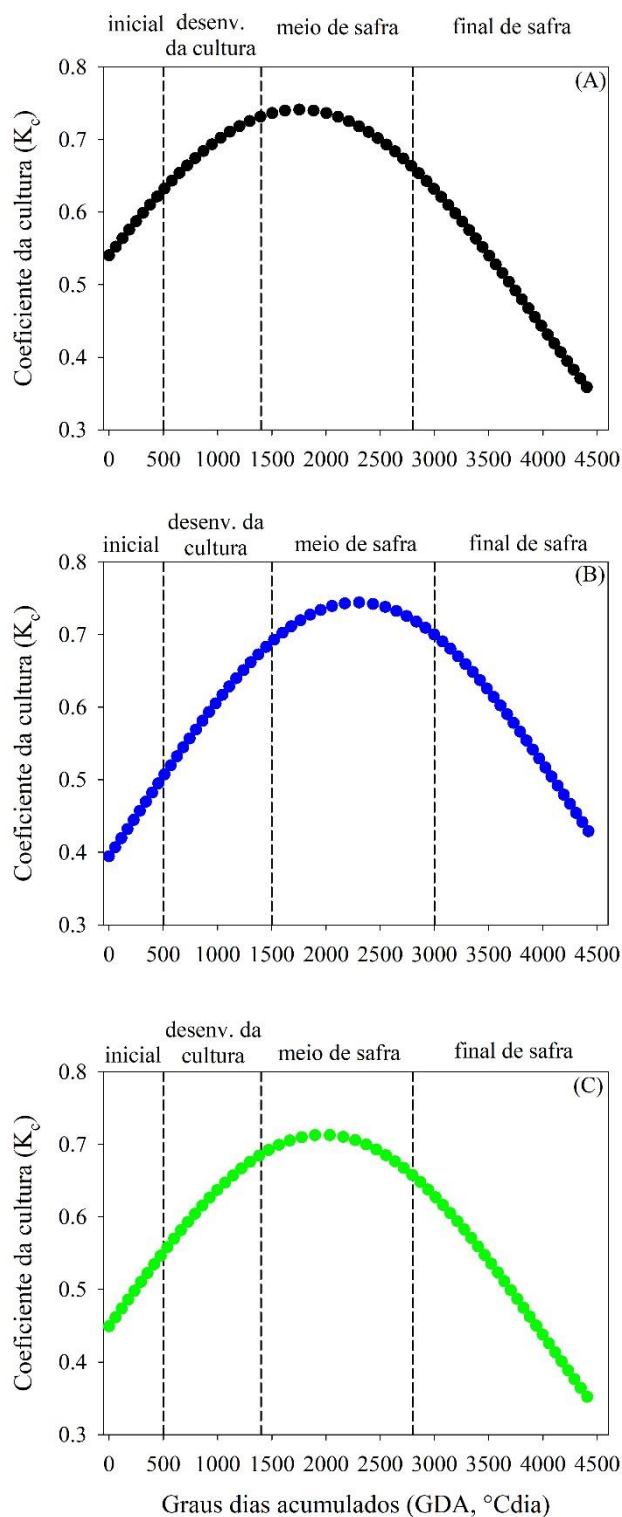


Figura 14. Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado para clones de palma forrageira OEM (A), MIU (B) e IPA (C) em função dos graus dias acumulados (GDA), cultivados sob irrigação e com uso de cobertura morta durante a safra 2017-2018.

Quando submetidos a frequência de irrigação de 7 dias, os clones OEM, MIU e IPA apresentaram uma ET_c diária variando de 0,941 a 3,65 mm, 1,03 a 3,24 mm e 1,51 a 3,23 mm, respectivamente, ao longo de 2019-2020. Em termos cumulativos, a ET_c variou de 13 a 394 mm em OEM, 36 a 567 mm em MIU e 92 a 687 mm em IPA, sendo os menores valores observados na fenofase 1, independente do clone, e os maiores na fenofase 4 em OEM, e 3 em MIU e IPA (Tabela 13).

A Figura 15 mostra os valores ajustados de K_c para os clones, onde é possível observar a mesma tendência entre eles. Ao analisar o valor médio ao longo do ciclo, os clones OEM, MIU e IPA apresentaram K_c igual a 0,51, 0,45 e 0,52, respectivamente. Em se tratando do coeficiente de cultivo duplo, o clone OEM apresentou maior K_{cb} (0,36) em relação a MIU e IPA, que apresentaram K_{cb} médio de 0,29. Para K_e não houve variação entre os clones, com valor médio de 0,16 (Tabela 13).

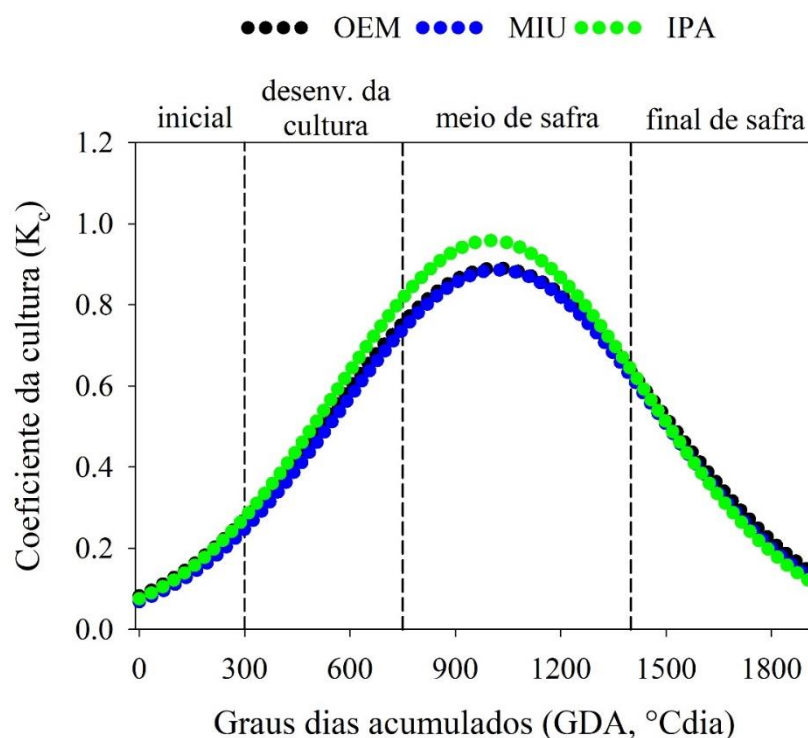


Figura 15. Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado para clones de palma forrageira em função dos graus dias acumulados (GDA), cultivados sob frequência de irrigação de 7 dias durante safra 2019-2020.

3.5. Indicadores de eficiência do uso da água

A produtividade da água da cultura (PA_c), a produtividade da água de irrigação (PA_i), e as produtividades econômicas da água da cultura (PEA_c) e de irrigação (PEA_i)

dos clones de palma forrageira do experimento I são apresentadas na Tabela 14 e Figura 16. Não foi verificado interação entre os fatores clones, regimes hídricos (WR) e frequências de irrigação (FR) sobre a PA_c e PEA_c da palma ($P>0,05$). Por outro lado, ao avaliar os fatores isoladamente, apenas o fator clone afetou os valores desses indicadores (Tabela 14), sendo a OEM superior aos clones MIU e IPA ($P<0,05$). Em média, os valores de PA_c e PEA_c desse clone foram $15,75 \text{ kg m}^{-3}$ e $43,87 \text{ US\$ m}^{-3}$, respectivamente. Em se tratando do PA_i e PEA_i , foi verificado interação entre os fatores WR e FR ($P<0,05$). Observou-se que o RW de 2.5 mm, independente do clone de palma, propiciou as maiores produtividades econômicas da água da cultura (Fig. 16A) e da irrigação (Fig. 16B) em comparação aos RW de 5 mm e 7,5 mm ($P<0,05$). Nessa condição, a frequência de irrigação de 28 dias favoreceu PA_i e PEA_i superiores às demais frequências avaliadas ($P<0,05$), com médias iguais a $6,09 \text{ kg m}^{-3}$ e $0,17 \text{ US\$ m}^{-3}$, respectivamente.

Tabela 14. Indicadores de eficiência do uso da água de clones de palma forrageira submetidos a diferentes regimes hídricos e frequências de irrigação em ambiente semiárido

Fontes de variação	Valor - P			
	PA_c	PA_i	PEA_c	PEA_i
Regimes hídricos (WR)	0,6325	<0,0001**	0,6327	<0,0001**
Frequência (FR)	0,9191	<0,0001**	0,9191	<0,0001**
Clones (CL)	<0,0001**	0,3024	0,003**	0,3111
WR versus FR	0,6087	0,0005**	0,3560	0,0005**
WR versus CL	0,7983	0,9244	0,7978	0,6985
FR versus CL	0,8123	0,3896	0,8237	0,9287
WR * FR * CL	0,6425	0,8364	0,9136	0,7365
Clones	Média			
	PA_c	PA_i	PEA_c	PEA_i
IPA	11,89b	1,67	33,03b	0,04
MIU	10,03b	1,66	27,85b	0,04
OEM	15,79a	2,26	43,87a	0,06

Nota: valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P<0,01$).

Os asteriscos (**) denotam significância de 0,01.

PA_c – produtividade de água da cultura (kg m^{-3}); PA_i – produtividade de água de irrigação (kg m^{-3}); PEA_c - produtividade econômica da água de cultivo (USD m^{-3}), e PEA_i - produtividade econômica da água de irrigação (USD m^{-3}), considerando o rendimento em matéria fresca.

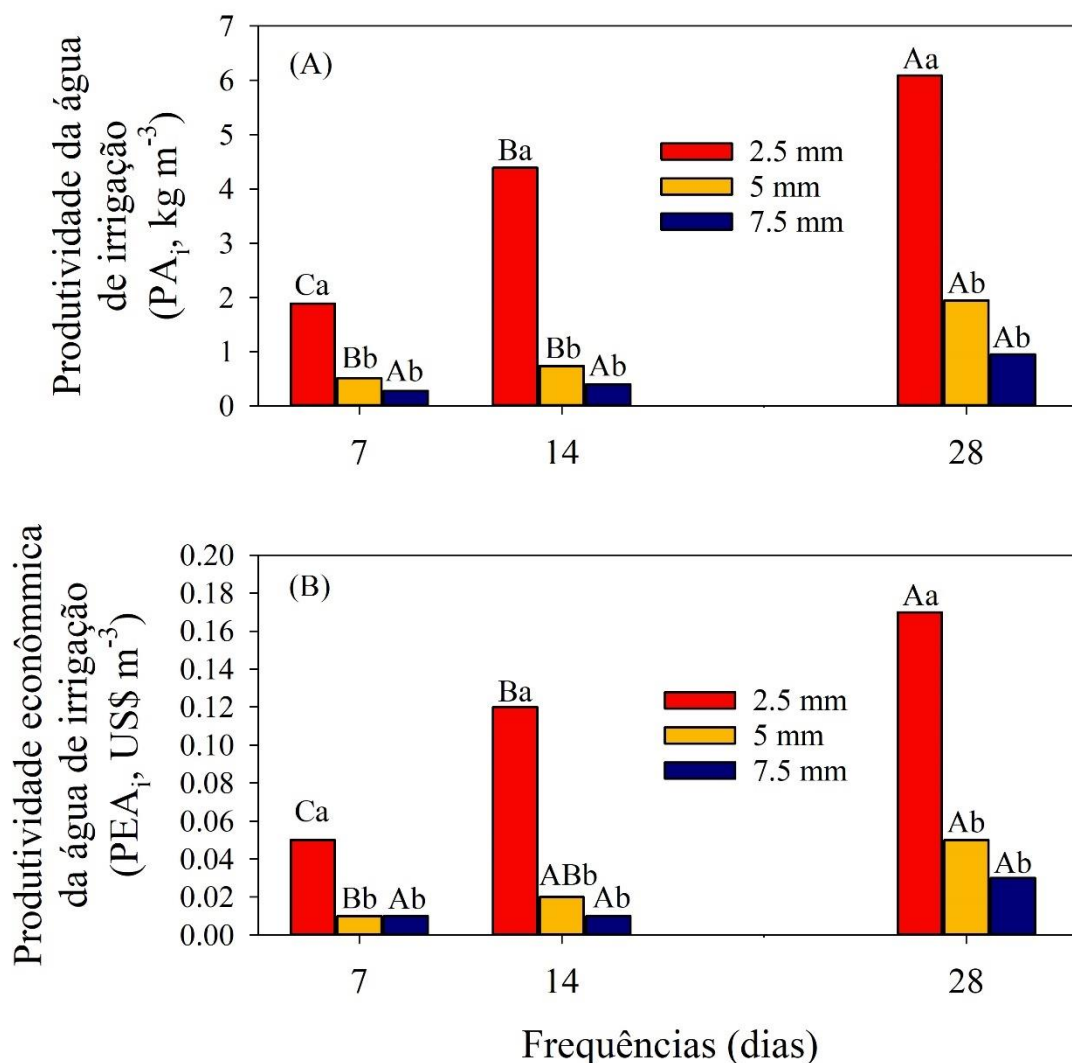


Figura 16. Interação entre regimes hídricos e frequência de irrigação para a produtividade de água da cultura (PA_i) e produtividade econômica da água de irrigação (PEA_i) dos clones de palma forrageira durante a safra 2012-2013.

Médias seguidas de mesma letra maiúscula para FR e minúscula para RW não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em relação ao experimento II, os indicadores de eficiência do uso da água do clone OEM nos regimes de 25% ET₀ nos ciclos 2012-2013 e 2013-2014, e no regime de 50% ET₀ no ciclo 2014-2015, sob sistema com (WM) e sem (NM) cobertura morta no solo são apresentados na Tabela 15. Apenas no 1º ciclo não foi verificado efeito dos sistemas de cultivo sobre os indicadores (P>0,05). Nos ciclos 2013-2014 e 2014-2015 o sistema WM favoreceu os maiores valores de PA_c, PA_i, PEA_c e PEA_i para a cultura em comparação ao sistema NM (P<0,05). No 2º ciclo produtivo os valores médios de PA_c, PA_i, PEA_c e PEA_i em WM foram 103%, 133%, 103% e 130% superiores ao sistema NM. Já no ciclo 2014-2015, esses valores foram ainda mais superiores, com média de 139%, 144%, 138% e 142% para PA_c, PA_i, PEA_c e PEA_i, respectivamente.

Tabela 15. Indicadores de eficiência do uso da água do clone Orelha de Elefante Mexicana em diferentes sistemas de cultivo em ambiente semiárido durante três ciclos produtivos

Ciclo 2012/2013				
Fontes de variação	Valor - P			
	PA _c	PA _i	PEA _c	PEA _i
Sistema de cultivo	0,171	0,450	0,171	0,448
Sem cobertura	183,28	22,18	3,39	0,61
Com cobertura	253,03	26,39	4,69	0,73
Ciclo 2012/2013				
Fontes de variação	Valor - P			
	PA _c	PA _i	PEA _c	PEA _i
Sistema de cultivo	0,021*	0,046*	0,026*	0,008**
Sem cobertura	132,94b	19,74b	2,46b	0,37b
Com cobertura	270,02a	46,09a	5,00a	0,85a
Ciclo 2012/2013				
Fontes de variação	Valor - P			
	PA _c	PA _i	PEA _c	PEA _i
Sistema de cultivo	0,008**	0,007**	0,008**	0,007**
Sem cobertura	86,73b	12,71b	1,61b	0,24b
Com cobertura	207,54a	31,10a	3,84a	0,58a

Nota: valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,01).

Os asteriscos (**) denotam significância de 0,01.

PA_c – produtividade de água da cultura (kg m⁻³); PA_i – produtividade de água de irrigação (kg m⁻³); PEA_c - produtividade econômica da água de cultivo (USD m⁻³), e PEA_i - produtividade econômica da água de irrigação (USD m⁻³), considerando o rendimento em matéria fresca.

3.6. Fator de resposta de produção (Ky)

Considerando que a palma no experimento I foi cultivada sob condições de déficit hídrico durante todo o ciclo produtivo 2012-2013, determinou-se o fator de resposta de produção (Ky, adimensional) para cada clone, independentemente dos regimes hídricos e das frequências de irrigação impostas, com o intuito de apontar possíveis efeitos sobre o rendimento da cultura. A partir do ajuste da função linear (Fig. 17), os clones OEM, IPA e MIU apresentaram valores de Ky iguais a 0,44, 0,47 e 0,41, respectivamente, indicando que a cultura foi tolerante ao déficit de água durante o ciclo estudado. Consequentemente, o rendimento da palma foi pouco afetado pelo o estresse, corroborando com os baixos

coeficientes de determinação observados (R^2 , OEM = 0.20; IPA = 0.12 e MIU = 0.10). Esses valores de R^2 permitem inferir que 20%, 12% e 10% da redução da produtividade da OEM, IPA e MIU, respectivamente, é provocada pela variabilidade da ET observada nas condições de cultivo estudadas.

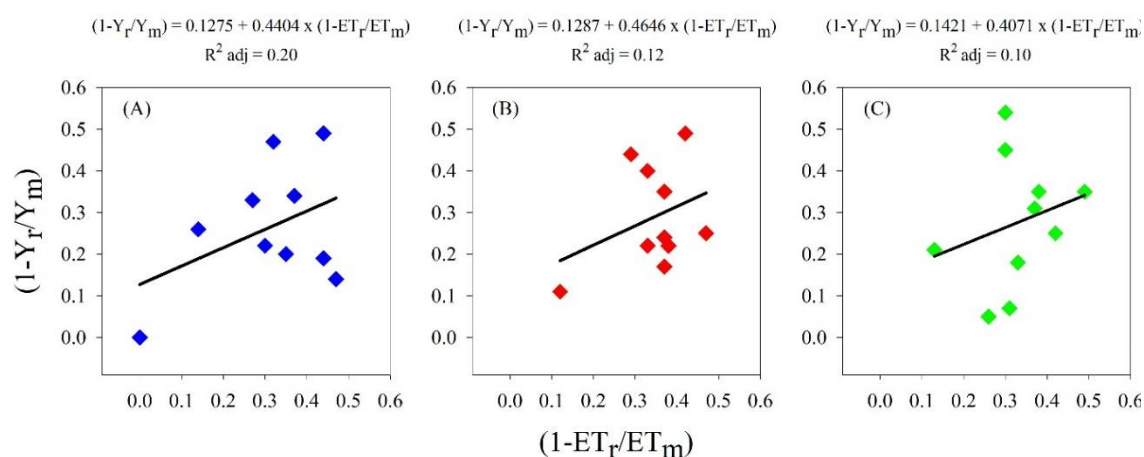


Figura 17. Ajuste do fator de resposta do rendimento (K_y) a partir da relação entre o déficit de evapotranspiração relativa ($1 - ET_r/ET_m$) e a diminuição do rendimento relativo ($1 - Y_r/Y_m$) dos clones OEM (A), IPA (B) e MIU (C) cultivados em ambiente semiárido durante safra 2012-2013.

4. DISCUSSÃO

4.1. Produtividade da cultura

Nas condições estudadas no experimento I, o clone OEM apresentou maiores rendimentos em relação aos clones MIU e IPA. Esse resultado também foi verificado durante os dois ciclos produtivos dos experimentos III e IV. Os cactos do gênero *Opuntia* apresentam maior potencial produtivo quando comparados com cactos do gênero *Nopalea*, sobretudo, quando cultivados sob irrigação, o que é atribuído a elevada eficiência do uso da água que essa espécie apresenta (MORAIS et al., 2017; ROCHA et al., 2017; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a). Além disso, características como o hábito de crescimento, arquitetura do dossel das plantas e tamanho dos cladódios favorecem maior área fotossintética e maior acúmulo de água, que possibilita uma elevada taxa de acúmulo de forragem ao longo do tempo (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a). Diferenças morfológicas e produtivas entre os clones estudados são reflexos de características intrínsecas de cada espécie, que podem variar conforme o ambiente de cultivo (BARBOSA et al., 2017a; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021b). Vale ressaltar que as plantas cultivadas no experimento I estiveram sob condições de déficit hídrico durante maior

parte do ciclo, enquanto nos experimentos III e IV a cultura foi conduzida sob condições ótimas de crescimento (i.e., regime hídrico de 120 e 40% ET_c nos ciclos 1 e 2 do experimento III, respectivamente, e irrigação com base em 120% ET_c no experimento IV). Isso evidencia o elevado potencial produtivo da OEM sob distintas condições de disponibilidade hídrica em relação aos clones MIU e IPA.

No experimento II, sob condições ótimas de crescimento (i.e., regime hídrico de 25% ET_0 nos ciclos 1 e 2, e 50% ET_0 no ciclo 3), o cacto OEM apresentou maior rendimento em FMY e DMY sob sistema de cultivo com cobertura morta (WM) em relação ao sistema sem cobertura (NM). Dentre vários benefícios, o uso de cobertura morta sobre o solo pode aumentar a produtividade das culturas devido ao aporte de nutrientes durante a sua decomposição (ALVES et al., 2022), a manutenção da umidade do solo por mais tempo (EL-MAGEED et al., 2018; ZHANG et al., 2018) e por melhorar os atributos físicos e químicos do solo (KADER et al., 2017; SOUZA et al., 2022), que por sua vez, possibilita o desenvolvimento do sistema radicular, com consequente melhoria na absorção de água e nutrientes pelas raízes (CARVALHO et al., 2017; SOUZA et al., 2022).

4.2. Evapotranspiração da cultura (ET_c) e coeficiente da cultura simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e)

Em condições de pleno desenvolvimento e produtividade máxima, a ET_c e o K_c refletem a necessidade de água da cultura a ser adotada na prática de irrigação (WANG et al., 2021; ALVES et al., 2022). Observamos no experimento I que a umidade do solo esteve abaixo do ponto de murcha permanente (θ_{wp}) durante a maior parte do ciclo produtivo e, portanto, os tratamentos estudados não compreenderam condições ótimas de desenvolvimento para os clones de palma (*ver sessão 3.4.1*). Por esse motivo, a ET_c , K_c , K_{cb} e K_e não foram determinados para esse experimento. Por outro lado, nas demais condições, os valores de ET_c e dos coeficientes de cultivo simples e duplo foram obtidos para as condições de plena disponibilidade hídrica e máximo rendimento da cultura, onde observamos os valores variando conforme as espécies estudadas, a duração das fenofases e os sistemas de cultivo.

A dinâmica de transferência da água na interface planta-atmosfera é influenciada pelas condições ambientais, características morfológicas e fenológicas da cultura, bem como pelo manejo adotado dentro do sistema de produção, que por sua vez, pode alterar

a disponibilidade de água no solo, e com isso, induzir variações morfofisiológicas na planta, com reflexos significativos em seu crescimento (QUEIROZ et al., 2015; BARBOSA et al., 2017b; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a). Nesse sentido, o uso de cobertura morta no experimento II favoreceu maiores valores da ET_c em relação ao NM, o que pode ser reflexo do maior rendimento observado nessa condição, bem como pela maior duração das fenofases. Embora o uso da cobertura morta esteja geralmente associado a proteção da superfície do solo, reduzindo a evaporação (CAO et al., 2021), seu uso pode aumentar a transpiração da cultura, por propiciar melhores condições para o seu desenvolvimento, sobretudo, aumentando o índice de área do cladódio (IAC) (CARVALHO et al., 2017; ALVES et al., 2022).

Assim como observado para ET_c , maiores valores de K_c foram atribuídos ao sistema WM. Resultado semelhante foi verificado por Alves et al. (2022) para o clone OEM cultivado em ambiente semiárido. O uso de cobertura modifica o microclima e as condições de desenvolvimento da cultura (BISWAS et al., 2022), favorecendo um maior desempenho produtivo às plantas (CARVALHO et al., 2017; QIN et al., 2023). A manutenção da umidade do solo favorece uma maior disponibilidade hídrica (ZRIBI et al., 2015), que por sua vez, está associada ao maior desempenho produtivo das plantas. O K_c representa a influência da planta sobre a ET total (ALLEN et al., 2011; PEREIRA et al., 2015, WANG et al., 2020), e é um importante indicador na avaliação das características de uso da água da cultura (PEREIRA et al., 2021a; BISWAS et al., 2022).

Quanto ao coeficiente de cultivo duplo, nossos resultados mostraram a mesma tendência observada no K_c , onde o sistema WM apresentou maiores valores de K_{cb} e K_e . O K_{cb} representa a transpiração da planta, enquanto K_e corresponde a evaporação do solo (PEREIRA et al., 2015). A diferença entre os valores em WM e NM diminuiu ao longo do desenvolvimento da cultura. Nas fenofases iniciais as plantas apresentam dossel pouco desenvolvido, o que favorece maiores valores de K_e . Com o avanço das fenofases e aumento do dossel da cultura, o K_e tende a diminuir, ao passo que o K_{cb} aumenta. O uso da cobertura diminuiu a fração evaporação (fE) nos ciclos 2 e 3, com reduções em cerca de 13% e 8%, respectivamente, em comparação ao sistema NM. Por outro lado, a fração transpiração (fT) foi superior em WM. A adoção da cobertura pode provocar efeitos compensatórios da transpiração sobre a dinâmica da evapotranspiração, uma vez que reduz o componente evaporativo, mas também pode favorecer melhor desenvolvimento da cultura, aumentando a transpiração e o processo de evapotranspiração, conseqüentemente (DING et al., 2018; ALVES et al., 2022).

Nossos resultados mostraram que o clone OEM apresentou maiores valores de ET_c em relação a MIU e IPA nos experimentos III e IV. Embora apresentem o mesmo mecanismo fotossintético (MAC), os clones de palma exibem especificidades morfológicas que refletem na dinâmica da ET_c (BARBOSA et al., 2017b). Por exemplo, o maior crescimento lateral do dossel e maior IAC geralmente apresentados pelo cacto OEM (PINHEIRO et al., 2014; SILVA et al., 2014a), reduzem a exposição do solo à radiação solar e, conseqüentemente, a perda de água por evaporação (ZHANG et al., 2018; SOUZA et al., 2021). Contudo, um maior IAC também reflete maiores taxas de transpiração da cultura e, portanto, ET_c mais elevadas (SILVA et al., 2014b; CARVALHO et al., 2017; UNKOVICH et al., 2018; ALVES et al., 2022).

Apesar do maior número de cladódios apresentado pela MIU e IPA, essas espécies exibem baixo IAC (SILVA et al., 2014a, PINHEIRO et al., 2014), o que resulta numa menor superfície de contato com o ambiente e maior exposição do solo (BARBOSA et al., 2017b). Tais diferenças fazem com que os componentes evaporação e transpiração apresentem dinâmicas distintas entre os clones dos gêneros *Opuntia* e *Nopalea*, como verificado nos valores de fT e fE , em que o clone OEM apresentou maior transpiração, enquanto a evaporação do solo foi mais pronunciada no cultivo de MIU e IPA.

Uma pequena variação foi observada nos valores de K_c dos clones OEM, MIU e IPA ao longo dos ciclos produtivos. Tendência semelhante foi verificada para o K_{cb} e K_e . Apesar da pequena variação, o cacto OEM sempre apresentou valores de K_c e K_{cb} superiores aos demais, o que pode ser reflexo do melhor desempenho produtivo nas condições estudadas. Por outro lado, o K_e foi elevado em MIU e IPA, principalmente nas fases iniciais de desenvolvimento (i.e., fenofases P1 e P2). O pequeno porte apresentado pelas espécies MIU e IPA no início do ciclo produtivo pode ser atribuído a menor área dos cladódios e, conseqüentemente, menor IAC da planta (SILVA et al., 2014a), que reduz a cobertura do solo e promove maiores taxas evaporativas. A cobertura do solo é um dos fatores que determinam a taxa de evaporação do solo. Portanto, o baixo índice de cobertura apresentado pela palma (QUEIROZ et al., 2016), sobretudo, pelos clones MIU e IPA, favorece maiores perdas de água por evaporação.

Os valores médios de K_c dos clones de palma forrageira obtidos ao longo dos ciclos produtivos no experimento II no Sítio I, e experimentos III e IV no Sítio II, são semelhantes aos reportados por Queiroz et al. (2016) para a espécie *O. stricta* cultivada durante 13 meses ($K_c = 0,52$); por Alves et al. (2022) que estudaram o consumo hídrico de *O. stricta* em ambiente semiárido com e sem uso de cobertura morta sobre o solo

(0,50); e ao relatado por Divíncula et al. (2019) para *Opuntia ficus-indica* (L.), que obtiveram valor médio igual a 0,72 para as condições do semiárido alagoano. A determinação do K_c para diferentes espécies de palma forrageira e fases de desenvolvimento da cultura em distintos locais de cultivo e manejos adotados, é essencial para uma melhor gestão de água na prática de irrigação (QUEIROZ et al., 2016; HAN et al., 2021), sobretudo, em regiões semiáridas. Além de variar ao longo do ciclo, o K_c e seu componentes sofrem influência do estágio de crescimento da cultura, quantidade e tipo de vegetação; data de plantio, duração e final do ciclo; espaçamento de plantio, altura das plantas e arquitetura do dossel; disponibilidade de água no solo e frequência de irrigação (PEREIRA et al., 2015; PEREIRA et al., 2021b).

4.3. Indicadores de eficiência do uso da água

No experimento I, a elevada produtividade em FMY apresentada pelo cacto OEM cultivado sob diferentes regimes hídricos (*ver sessão 3.2*) propiciou maiores PA_c e PEA_c a essa espécie, sendo em média 44% superior aos clones MIU e IPA. As peculiaridades morfológicas das espécies estudadas refletem na produtividade da cultura (BARBOSA et al., 2017a; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021b) e, portanto, nos indicadores de eficiência do uso da água. Ao considerar a PA_i e PEA_i , verificamos que a aplicação da lâmina 2,5 mm a cada 28 dias favoreceu maiores eficiências aos clones. Como visto anteriormente, mesmo sob irrigação, o rendimento dos clones não foi afetado pelos regimes hídricos impostos. Nesse sentido, a elevada produtividade obtida, associada a baixa quantidade de água resultante da lâmina de 2,5 mm e frequência de irrigação de 28 dias (i.e., 32,5 mm), ocasionaram maiores PA_i e PEA_i em comparação às demais condições.

Em se tratando do experimento II, a partir do segundo ciclo produtivo nossos resultados indicaram maiores PA_c , PA_i , PEA_c e PEA_i do clone OEM em WM. A adoção de cobertura morta favorece a proteção, manutenção da umidade e redução da amplitude térmica do solo (LI et al., 2018; SOUZA et al., 2022), que por sua vez, diminuem a perda de água do solo por evaporação (*ver sessão 3.4.2*) (LI et al., 2018; YIN et al., 2020) e, conseqüentemente, possibilita maior eficiência do uso da água pela cultura (JORDAN et al., 2010; ZHANG et al. 2015).

4.4. Fator de resposta de rendimento (K_y)

Nesse estudo, os fatores de resposta de rendimento (K_y) dos clones de palma forrageira do experimento I foram determinados independentemente dos regimes hídricos e frequências de irrigação, uma vez que todos os tratamentos estudados resultaram em condições de déficit hídrico à cultura. Conforme os critérios utilizados por Doorenbos e Kassam (1979), os clones OEM, IPA e MIU apresentaram tolerância ao déficit hídrico, com valores de $K_y < 1$ (0,44 0,47 e 0,41, respectivamente). Portanto, nossos resultados demonstraram que embora tenha sido conduzida sob déficit de água durante maior parte do ciclo experimental, a cultura não apresentou significativas perdas produtivas, evidenciando a sua alta capacidade de produção de biomassa sob condições de déficit hídrico (SILVA et al., 2017; JARDIM et al., 2021a, b; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021 a, b; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2022).

5. CONCLUSÃO

A dinâmica da evapotranspiração da cultura (ET_c) e os coeficientes de cultivo simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e) de clones de palma forrageira foi medida em condições ótimas de crescimento da cultura. Em situações de déficit hídrico, foi calculado o fator de resposta de rendimento (K_y). Além disso, indicadores de eficiência do uso da água foram quantificados para as condições de diferentes regimes hídricos e sistemas de produção com e sem o uso de cobertura morta.

A partir dos três experimento conduzidos em dois Sítios experimentais no decorrer dos anos de 2012 a 2020, percebemos que os valores de ET_c diária e acumulada, e dos coeficientes K_c , K_{cb} e K_e , variam conforme as espécies estudadas, a dinâmica de crescimento da cultura e os sistemas de cultivo. Logo, esses fatores devem ser considerados na determinação de parâmetros de consumo de água da cultura. Em média, o clone Orelha de Elefante Mexicana apresentou maior demanda hídrica em relação às espécies Miúda e IPA Sertânia, o que pode ser associado ao seu melhor desempenho produtivo. O uso da cobertura morta reduziu a perda de água por evaporação e aumentou o rendimento do cacto Orelha de Elefante Mexicana, resultando em maiores valores de ET_c , K_c e K_{cb} em comparação ao sistema sem cobertura.

Os indicadores de eficiência do uso da água mostraram que o cultivo da Orelha de Elefante Mexicana é mais viável em comparação ao cultivo de Miúda e IPA Sertânia, e que a adoção de sistemas com cobertura morta favorece maior retorno produtivo-econômico ao produtor. Os valores de K_y indicaram tolerância das espécies ao déficit

hídrico, evidenciando a grande capacidade adaptativa dessa cultura às condições do semiárido.

Trabalhos futuros são encorajados a quantificar o consumo da água de espécies de palma forrageira sob diferentes sistemas de produção, de forma a melhorar o manejo de irrigação e, conseqüentemente, incrementar o uso da água e a oferta de forragem em áreas cultivadas com essa cactácea.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTO, M. C. R.; QUILTY, J. R.; BURESH, R. J.; WASSMANN, R.; HAIDAR, S.; CORREA JUNIOR, T. Q.; SANDRO, J. M. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 136, p. 1-12, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.005>

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 899-920, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map of Brazil. **Meteorology Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ALVES, H. K. M. N.; SILVA, T. G. F.; JARDIM, A. M. R. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, C. A. A.; MOURA, M. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; CAMPOS, F. S.; CRUZ NETO, J. F. The use mulch in cultivating the forage cactus optimizes yield in less time and increases the water use efficiency of the crop. **Irrigation and Drainage**, p. 1-15, 2022b. <https://doi.org/10.1002/ird.2758>

ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, M. J.; ALVES, C. P.; SOUZA, C. A. A.; COSTA, S. A. T.; CUNHA, M. V.; SIMÕES, A. N.; SILVA, J. R. I.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F. Growth dynamics and accumulation of forage mass of forage cactus clones as affected by meteorological variables and water regime. **European Journal of Agronomy**, v. 131, p. 126375, 2021b <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126375>

ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B.; ALVES, C. P.; SALVADOR, K. R. S.; SOUZA, C. A. A.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, M. J. Phenophases, morphophysiological indices and cutting time in clones of the forage cacti under controlled water regimes in a semiarid environment. **Journal of Arid Environments**, v. 190, p. 104510, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104510>.

ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; SOUZA, M. S.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B.; SANTOS, J. P. A. S.; JARDIM, A. M. R. F.; ALVES, C. P.; ALVES, H. C. M. N. Productivity, bromatological composition and economic benefits of using irrigation in the forage cactus under regulated deficit irrigation in a semiarid environment. **Bragantia**, v. 80, p. 1221, 2021c. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200390>

ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, L. S. B.; JARDIM, A. M. R. F.; ALVES, C. P.; ASSIS, M. C. S.; SILVA, J. O. N.; SOUZA, C. A. A.; PINHEIRO, A. G.; OLIVEIRA, A. C.; SILVA, T. G. F. The association between morphological characteristics and yield in forage cactus clones varied according to water regimes: a principal component analysis. **Journal of the Professional Association for Cactus Development**, v. 24, p. 83-95, 2022.

ARAÚJO PRIMO, J. T.; SILVA, T. G. F.; SILVA, S. M. S.; MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B. Calibração de sondas capacitivas, funções físico-hídricas e variação do armazenamento de água em um argissolo cultivado com palma forrageira. **Revista Ceres**, v. 62, p. 20-29, 2015. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562010003>

BARBOSA, M. L.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA, S. M. S.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; JARDIM, A. M. R. F. Meteorological variables and morphological characteristics influencing the evapotranspiration of forage cactus. **Revista Ceres**, v. 64, n. 5, p. 466-475, 2017b. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764050003>

BARBOSA, M. L.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA, S. M. S.; MORAIS, J. E. F.; ASSIS, M. C. S. Association of morphological and water factors with irrigated forage cactus yield. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 600–605, 2017a. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n9p600-605>

BISWAS, T.; BANDYOPADHYAY, P. K.; NANDI, R.; MUKHERJEE, S.; KUNDU, A.; REDDY, P.; MANDAL, B.; KUMAR, P. Impacto f mulching and nutrientes on soil water balance and actual evapotranspiration of irrigated winter cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata L.). **Agricultural Water Management**, v. 263, p. 107456, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107456>

CAMPOS, A. R. F.; SILVA, A. J. P.; VAN LIER, Q. J.; NASCIMENTO, F. A. L.; FERNANDES, R. D. M.; ALMEIDA, J. N.; PAZ, V. P. S. Yield and morphology of forage cactus cultivars under drip irrigation management based on soil water matric potential thresholds. **Journal of Arid Environments**, v. 193, p. 104564, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104564>

CAO, Q.; WANG, Z.; YANG, X.; SHEN, Y. The effects of cocksfoot cover crop on soil water balance, evapotranspiration partitioning, and system production in an apple orchard on the Loess Plateau of China. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104788, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104788>

CARVALHO, A. A.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; TOLÊDO, M. P. S. Soil moisture in forage cactus plantations with improvement practices for their resilience. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 7, p. 481-487, 2017. <http://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n7p481-487>

CONSOLI, S.; INGLESE, G.; INGLESE, P. Determination of evapotranspiration and annual biomass productivity of a cactus pear [*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.)] orchard in

a semiarid environment. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. 8, p. 680-690, 2013. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000589](http://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000589)

DING, D.; ZHAO, Y.; FENG, H.; HILL, R. L.; CHU, X.; ZHANG, T.; HE, J. Soil water utilization with plastic mulching for a winter wheat-summer maize rotation system on the Loess Plateau of China. **Agricultural Water Management**, v. 201, p. 246–257, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.029>

DIVÍNCULA, J. S.; SILVA, C. B.; SANTOS, M. A. L.; SANTOS, D. P.; SANTOS, L. W. Crop coefficient and water requirement of prickly pear in the Agrest region of Alagoas state, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 925-929, 2019.

DOORENBOSS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water irrigation and drainage**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 1979, 257p.

DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; SANTOS, M. V. F.; CUNHA, M. V.; SANTOS, D. C.; SOUZA, R. T. A.; MELLO, A. C. L.; SOUZA, T. C. Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. **Animal Feed Science and Technology**, v. 275, p. 114890, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>

EL-MAGEED, T. A. A.; SAMNOUDI, I. M. E.; IBRAHIM, A. E. M.; ABD, A. R.; TAWWAB, E. Compost and mulching modulate morphological, physiological responses and water use efficiency in sorghum (*Bicolor* L. Moench) under low moisture regime. **Agricultural Water Management**, v. 208, p. 431–439, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.042>.

FERNÁNDEZ, J. E.; ALCON, F.; DIAZ-ESPEJO, A.; HARNANDEZ-SANTANA, V.; CUEVAS, M. V. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. **Agricultural Water Management**, v. 237, p. 106074, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074>

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portuguese)**. R package version 1.2.0, 2018. <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>

HAN, X.; WEI, Z.; ZHANG, B.; LI, Y.; DU, T.; CHEN, H. Crop evapotranspiration prediction by considering dynamic change of crop coefficient and the precipitation effect in back-propagation neural network model. **Journal of Hydrology**, v. 596, p. 126104, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126104>

JARDIM, A. M. R. F.; SANTOS, H. R. B.; ALVES, H. C. M. N.; FERREIRA-SILVA, S. L.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, M. S.; ARAÚJO, G. G. L.; SOUZA, C. A. A.; SILVA, T. G. F. Genotypic differences relative photochemical activity, inorganic and organic solutes and yield performance in clones of the forage cactus under semi-arid environment. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 162, p. 421-430, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.011>

JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; ALVES, H. C. M. N.; SOUZA, M. S.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B. Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. **Journal of Arid Environments**, v. 188, p. 104464, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104464>

JORDAN, A.; ZAVALA, L. M.; GIL, J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. **Catena**, v. 81, n. 1, p. 77-85, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.007>

KADER, M. A.; SENGE, M.; MOJID, M. A.; ITO, K. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. **Soil and Tillage Research**, v. 168, p. 155–166, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.001>.

LEITE, R. M. C.; SILVA, G. I. N.; CHAGAS, R. M. M.; ALVES, H. K. M. N.; SILVA, T. G. F. Coeficiente de extinção da palma forrageira depende do gênero e índice de área do cladódio. *In: XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia / V Simpósio de*

Mudanças Climáticas e Desertificação do Semiárido Brasileiro., 2017, Juazeiro, BA / Petrolina, PE. **Anais** [...] Juazeiro, BA / Petrolina, PE, 1-5, 2017.

LEMOS, M.; FERREIRA NETO, M.; FERNANDES, C. S.; LIMA, Y. B.; DIAS, N. S.; MEDEIROS, J. F.; BRITO, R. F.; SÁ, F. V. S. The effect of domestic sewage effluent and planting density on growth and yield of prickly pear cactus in the semiarid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 185, p. 104372, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104372>

LI, S.; LI, Y.; LIN, H.; FENG, H.; DYCK, M. Effects of different mulching technologies on evapotranspiration and summer maize growth. **Agricultural Water Management**, v. 201, p. 309–318, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.025>

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. P.; BIGGAR, J. W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society American Journal**, v. 44, p. 3-7, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400010001x>

MORAIS, J. E. F.; SILVA, T. G. F.; QUEIROZ, M. G.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N. Hydrodynamic changes of the soil-cactus interface, effective actual evapotranspiration and its water efficiency under irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 273-278, 2017. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n4p273-278>

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4-20, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; HUNSAKER, D. J.; LÓPEZ-URREA, R.; MOHAMMADI SHAD, Z. Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. **Agricultural**

Water Management, v. 243, p. 106466, 2021a.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106466>

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; LÓPES-URREA, R.; HUNSAKER, D. J.; MOTA, M.; MOHAMMADI, S. Z. Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106196, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106196>

PESSOA, D. V.; ANDRADE, A. P.; MAGALHÃES, A. L. R.; TEODORO, A. L.; SANTOS, D. C.; ARAÚJO, G. G. L.; MEDEIROS, A. N.; NASCIMENTO, D. B.; VALENÇA, R. L.; CARDOSO, D. B. Forage nutritional differences within the genus *Opuntia*. **Journal of Arid Environments**, v. 181, p. 104243, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104243>

PINHEIRO, K. M.; SILVA, T. G. F.; CARVALHO, H. F. S.; SANTOS, J. E. O.; MORAIS, J. E. F.; ZONIER, S.; SANTOS, D. C. Correlações do índice de área do cladódio com características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 939-947, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200004>

QIN, S.; LI, S.; CHENG, L.; ZHANG, L.; QIU, R.; LIU, P.; XI, H. Partitioning evapotranspiration in partially mulched interplanted croplands by improving the Shuttleworth-Wallace model. **Agricultural Water Management**, v. 276, p. 108040, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108040>

QUEIROZ, M. G.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA, S. M. S.; LIMA, L. R.; ALVES, J. O. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 10, p. 31-938, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p931-938>

QUEIROZ, M. G.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SIQUEIRA E SILVA, S. M.; SOUZA, C. A. A.; CARVALHO, H. F. S. Hydro-economic relations of forage cactus

cultivated in semiarid environment. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 141-154, 2016. <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p141-154>

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019. URL <https://www.R-project.org/>.

RICHARDS, L. A. **Diagnose and improvement of saline and alkali soils**. Washington: USDA. 1954. 60p.

ROCHA, R. S.; VOLTOLINI, T. V.; GAVA, C. A. T. Características produtivas e estruturais de genótipos de palma forrageira irrigada em diferentes intervalos de corte. **Revista Archivos de Zootecnia**, v. 66, n. 255, p. 365-373, 2017.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COLEHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO, A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solo**. 5 ed. Embrapa Solos, Brasília, p. 564, 2018.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. **Food analysis: chemical and biological methods**. Minas Gerais: UFV, 2005.

SILVA, T. G. F.; ARAÚJO PRIMO, J. T.; MOURA, M. S. B.; SILVA, S. M. S.; MORAIS, J. E. F.; PEREIRA, P. C. Soil water dynamics and evapotranspiration of forage cactus clones under rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 50, 7, 515-525, 2014b. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000700001>

SILVA, T. G. F.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B. Agrometeorological research on forage cactus and its advances in Brazil. **Amazonian Journal of Plant Research**, v. 2, p. 45-68, 2017. <https://doi.org/10.26545/b000006x>

SILVA, T. G. F.; MIRANDA, K. R.; SANTOS, D. C.; QUEIROZ, M. G.; SILVA, M. C.; CRUZ NETO, J. F.; ARAÚJO, J. E. M. Área do cladódio de clones de palma forrageira:

modelagem, análise e aplicabilidade. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 4, p. 633-641, 2014a.

SOUZA, M. S.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, L. S. B.; JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, G. I. N.; ARAÚJO, G. G. L.; CAMPOS, F. S.; LEITE, M. L. M.; TABOSA, J. N.; SILVA, T. G. F. Forage yield, competition and economic benefit of intercropping cactus and millet with mulch in a semi-arid environment. **African Journal of Range and Forage**, p. 1-13, 2022. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.2016967>

SOUZA, M. S.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; ALVES, H. K. M. N.; LEITE, R. M. C.; SOUZA, C. A. A.; ARAÚJO, G. G. L. D.; CAMPOS, F. S.; SILVA, M. J.; SOUZA, P. J. O. P. Growth, phenology and harvesting time of cactus millet intercropping system under biotic mulching. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 67, p. 1–15, 2021. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1852553>

UNKOVICH, M.; BALDOCK, J.; FARQUHARSON, R. Field measurements of bare soil evaporation and crop transpiration, and transpiration efficiency, for rainfed grain crops in Australia – A review. **Agricultural Water Management**, v. 205, p. 72-80, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.016>

WANG, Y.; CAI, H.; YU, L.; PENG, X.; XU, J.; WANG, X. Evapotranspiration partitioning and crop coefficient of maize in dry semi-humid climate regime. **Agricultural Water Management**, v. 236, p. 106164, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106164>

WANG, Y.; HORTON, R.; XUE, X.; REN, T. Partitioning evapotranspiration by measuring soil water evaporation with heat-pulse sensors and plant transpiration with sap flow gauges. **Agricultural Water Management**, v. 252, p. 106883, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106883>

YIN, W.; CHAI, Q.; ZHAO, C.; YU, A.; FAN, Z.; HU, F.; FAN, H.; GUO, Y.; COULTER, J. A. Water utilization in intercropping: A review. **Agricultural Water Management**, v. 241, p. 106335, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106335>

ZHANG, P.; TING, W.; HAIXIA, W.; MIN, W.; XIANGPING, M.; SIWEI, M.; RUI, Z.; ZHIKUAN, J.; QINGFANG, H. Effects of straw mulch on soil water and winter wheat production in dryland farming. **Scientific Reports**, v. 5, p. 10725, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep10725>

ZHANG, Y.; WANG, J.; GONG, S.; XU, D.; SUI, J.; WU, Z.; MO, Y. Effects of film mulching on evapotranspiration, yield and water use efficiency of a maize field with drip irrigation in Northeastern China. **Agricultural Water Management**, v. 205, p. 90-99, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.029>

ZHANG, Y.; WANG, J.; GONG, S.; XU, D.; SUI, J.; WU, Z.; MO, Y. Effects of film mulching on evapotranspiration, yield and water use efficiency of a maize field with drip irrigation in Northeastern China. **Agricultural Water Management**, v. 205, p. 90-99. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.029>

CAPÍTULO IV

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTES DA CULTURA E EFICIÊNCIA NO
USO DA ÁGUA DE CLONES DE PALMA FORRAGEIRA EM AMBIENTE
SEMIÁRIDO**

Evapotranspiração, coeficientes da cultura e eficiência no uso da água de clones de palma forrageira em ambiente semiárido

Resumo: O conhecimento da real necessidade hídrica da palma forrageira fornece informações para otimizar o gerenciamento dos recursos hídricos na prática de irrigação. Assim, objetivou-se mensurar a dinâmica da evapotranspiração diária e acumulada (ET_c) e o coeficiente da cultura ($K_c = K_{cb} + K_e$) ao longo da safra de diferentes espécies de palma forrageira cultivadas em ambiente semiárido. Entre 2012 e 2020, três experimentos foram realizados com diferentes clones de palma do gênero *Opuntia* e *Nopalea* submetidos a distintas estratégias de irrigação com base na evapotranspiração de referência (ET_0) e da cultura (ET_c). A ET_c , K_c , K_{cb} e K_e foram definidos por fenofases das espécies nas condições de máxima produtividade da cultura. Determinou-se também os indicadores de eficiência do uso da água para os diferentes clones estudados. Observou-se que a variação da ET_c foi mais associada com a duração das fenofases, e os valores de K_c diferiram mais em função dos ciclos produtivos do que entre as espécies. O K_{cb} é mais significativo para o K_c em espécies *Opuntia*, enquanto K_e é mais relevante em espécies *Nopalea*, contribuindo com até 78% e 86% do total da ET_c , respectivamente. Os indicadores mostraram que o cultivo de cactáceas do gênero *Opuntia* apresentou maior retorno produtivo e financeiro ao produtor em relação ao cultivo de espécies do gênero *Nopalea*. Concluiu-se que, as características intrínsecas das espécies, que condicionam a dinâmica de crescimento da cultura, e as condições ambientais vigentes na região devem ser consideradas no manejo de irrigação em áreas cultivadas com palma forrageira.

Palavras-chave: Características morfológicas, demanda hídrica, manejo de irrigação, *Nopalea* ssp., *Opuntia* ssp.

Evapotranspiration, crop coefficients and water use efficiency of forage cactus clones in a semi-arid environment

Abstract: Knowledge of the real need for forage cactus water provides informations to optimize the management of water resources in the practice of irrigation. Thus, the objective was to measure the dynamics of daily and accumulated evapotranspiration (ET_c) and the crop coefficient ($K_c = K_{cb} + K_e$) during the harvest of different species of forage cactus cultivated in a semi-arid environment. Between 2012 and 2020, three experiments were carried out with different cactus clones of the genus *Opuntia* and *Nopalea* submitted to different irrigation strategies based on reference evapotranspiration (ET_0) and crop (ET_c). The ET_c , K_c , K_{cb} and K_e were defined by species phenophases under conditions of maximum crop productivity. Water use efficiency indicators were also determined for the different studied clones. It was observed that the ET_c variation was more associated with the duration of the phenophases, and the K_c values differed more according to the productive cycles than among the species. K_{cb} is more significant for K_c in *Opuntia* species, while K_e is more relevant in *Nopalea* species, contributing up to 78% and 86% of the total ET_c , respectively. The indicators showed that the cultivation of cacti of the genus *Opuntia* presented a higher productive and financial return to the producer concerning the cultivation of species of the genus *Nopalea*. It was concluded that the intrinsic characteristics of the species, which condition the dynamics of crop growth and the prevailing environmental conditions in the region must be considered in the management of irrigation in areas cultivated with forage cacti.

Keywords: Irrigation management, morphological characteristics, *Nopalea* ssp., *Opuntia* ssp., water demand

CAPÍTULO IV: EVAPOTRANSPIRAÇÃO, COEFICIENTES DA CULTURA E EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA DE CLONES DE PALMA FORRAGEIRA EM AMBIENTE SEMIÁRIDO

1. INTRODUÇÃO

A palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) é a cactácea mais cultivada no mundo para fins de alimentação animal, sobretudo, no semiárido brasileiro (BARBOSA et al., 2017a; SILVA et al., 2017). Nessa região, as espécies Orelha de Elefante Mexicana [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], Miúda [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck] e IPA Sertânia [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck] são amplamente cultivadas por apresentarem resistência a cochonilha do carmim (*Dactylopius opuntiae*, Cockerell), o principal inseto-praga da cultura (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a). Além disso, apresentam elevada capacidade de produção de biomassa em condições ambientais que seriam limitantes para outros tipos de plantas forrageiras (DUBEUX JR et al., 2021; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021b; DANTAS et al., 2023).

Características como o alto rendimento e elevada eficiência no uso da água têm acelerado a expansão de áreas cultivadas com essa cactácea como estratégia para garantir alimento aos rebanhos nos períodos de estiagem (AMORIM et al., 2017). Nessas áreas, a irrigação tem sido uma prática adotada para melhorar o desempenho produtivo da cultura no sistema de produção (CAMPOS et al., 2022). Atrelado a isso, o cultivo de outras espécies de palma forrageira, como por exemplo, a F8 (*Opuntia atropes* Rose), a Orelha de Elefante Africana – OEA (*Opuntia undulata* Griffiths) e a V19 (*Opuntia larreyi* F.A.C Weber ex Coult.) também tem sido relatado (JARDIM et al., 2021).

Embora apresentem características semelhantes de adaptação a ambientes áridos e semiáridos, as espécies de palma forrageira diferem quanto a morfologia, que por sua vez, reflete em diferenças estruturais na formação do dossel e, conseqüentemente, na interação da planta com o ambiente (SILVA et al., 2017; BARBOSA et al., 2017b; ADLI et al., 2019; ARAÚJO JUNIOR et al., 2021b). Tais diferenças influenciam a capacidade fotossintética, a taxa de crescimento, a quantidade e duração das fenofases e a produtividade da cultura (BARBOSA et al., 2017a; AMORIM et al., 2017; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021c). Além disso, as distintas características morfológicas entre as espécies têm forte influência sobre o processo de evapotranspiração (ET) (BARBOSA et al., 2017a). Por exemplo, Barbosa et al. (2017a) relataram que o índice de área do cladódio

reduziu a ET na Orelha de Elefante Mexicana e IPA Sertânia, enquanto a quantidade de cladódios afetou a dinâmica da ET no clone Miúda.

Em condições ótimas de crescimento a ET recebe a denominação de evapotranspiração da cultura (ET_c), que representa a necessidade de água da planta (SILVA et al., 2017; ALVES et al., 2022; FENG et al., 2023). A ET_c pode ser determinada a partir da evapotranspiração de referência (ET_0) e do coeficiente da cultura (K_c) (PEREIRA et al., 2020; TAN et al., 2022). Esse último, reflete as características da planta sobre a ET (PEREIRA et al., 2021; AL TAMIMI et al., 2022), e consiste no coeficiente basal da cultura (K_{cb}) e no coeficiente de evaporação do solo (K_e) (TAN et al., 2022). O K_c varia ao longo dos estágios de crescimento da planta, e é determinado pelo tipo de clima, espécie e condições de cultivo (FENG et al., 2023).

Embora alguns estudos tenham mostrado a adoção de irrigação no cultivo da palma forrageira (ARAÚJO JÚNIOR et al. 2021a, b), poucos relataram a necessidade de água da cultura (QUEIROZ et al., 2016; ALVES et al., 2022), sobretudo, quando diferentes espécies são utilizadas no sistema de produção. O conhecimento da real necessidade hídrica dessa cactácea fornece informações para otimizar o gerenciamento dos recursos hídricos na prática de irrigação, melhorando, eventualmente, a eficiência no uso da água e o rendimento da cultura. Assim, objetivou-se mensurar a dinâmica da evapotranspiração diária e acumulada (ET_c), coeficiente da cultura e a eficiência no uso da água de diferentes espécies de palma forrageira cultivadas em ambiente semiárido.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição das áreas de estudo

Três estudos foram conduzidos em dois Sítios experimentais localizados no município de Serra Talhada, semiárido de Pernambuco, Brasil. Um experimento foi realizado na Estação Experimental Lauro Ramos Bezerra (Sítio I - IPA), pertencente ao Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA ($7^{\circ}56'S$, $38^{\circ}17'O$ e altitude 431 m), e dois no Centro de Referência Internacional de Estudos Agrometeorológicos de Palma e outras Plantas Forrageiras – CentroRef (Sítio II), localizado na Unidade Acadêmica de Serra Talhada – UFRPE/UAST ($7^{\circ}57'S$, $38^{\circ}17'O$ e altitude 431 m). A região apresenta um clima caracterizado como semiárido quente do tipo BShw', pela classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013), com precipitação pluvial média de 642 mm ano⁻¹, temperatura

média do ar de 24,8°C, umidade relativa do ar em torno de 62%, e demanda atmosférica anual acima de 1800 mm (PEREIRA et al., 2015; SOUZA et al., 2022).

Antes da instalação das áreas, foi realizado o preparo inicial do solo com aração, gradagem e sulcagem. Posteriormente, os cladódios de palma forrageira foram plantados em alinhamento dominó, enterrando-o 50% do comprimento total do cladódio no solo. O delineamento experimental, o material vegetal utilizado, os tratamentos impostos, o período de avaliações, entre outras informações de cada um dos experimentos são descritos a seguir.

2.2. Material vegetal, implementação dos experimentos e tratamentos aplicados

2.2.1. Sítio I

O tipo de solo presente nessa área foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, com textura franco arenosa (SANTOS, 2018). Os valores médios das propriedades químicas e físicas do solo nas camadas de 0,0 – 0,20 m de profundidade são apresentados na Tabela 1. A umidade do solo na capacidade de campo (θ_{wp}) e no ponto de murcha permanente (θ_{fc}) foi igual a 0,20 e 0,12 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente.

Tabela 1. Características químicas e físicas dos solos das áreas experimentais do Sítio I cultivadas com clones de palma forrageira, em Serra Talhada, PE

Características químicas						
Prof.	CE	pH	P _(Melich 1)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺
(cm)	mS cm ⁻¹		mg dm ⁻³	cmolc dm ⁻³		
0-20	0,8	6,5	40,3	0,45	1,52	3,25
Características físicas						
Prof.	Densidade		Porosidade	Partícula		
	(g dm ⁻³)			(%)	(g kg ⁻¹)	
(cm)	Solo	Partícula		Areia	Silte	Argila
0-20	1,53	2,57	40,34	683,66	252,55	63,79

CE – Condutividade elétrica

2.2.1.1. Experimento do Sítio I – Clones de palma forrageira irrigados

Foram avaliados, durante o ciclo produtivo de 2012 a 2014, os clones de palma forrageira Miúda – MIU [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck], IPA Sertânia – IPA [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck] e Orelha de Elefante Mexicana - OEM [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] (Fig. 1). A implantação da área ocorreu em janeiro de 2010, com o plantio dos clones sob espaçamento 1,6 x 0,2 m (31250 plantas ha⁻¹). Durante esse ano, a cultura foi conduzida em condições de sequeiro. A partir do corte de uniformização das plantas, realizado em abril de 2012, e do estabelecimento do sistema de irrigação por gotejamento, iniciou-se o período experimental do presente estudo. Os clones de palma foram dispostos em blocos casualizados com três repetições, numa área total de 691,2 m². Cada parcela experimental foi constituída por quatro fileiras de cultivo, com área total de 25,6 m². A área útil de cada parcela consistiu das duas fileiras centrais, excluindo duas plantas de cada extremidade, com área igual a 10,24 m².



Figura 1. Espécies de palma forrageira cultivadas no Sítio I, no município de Serra Talhada, PE. (A) Orelha de Elefante Mexicana – OEM [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.]; (B) Miúda – MIU [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck] e (C) IPA Sertânia – IPA [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck].

A lâmina de irrigação aplicada foi baseada em 35% da evapotranspiração de referência (ET₀). Para isso, a ET₀ foi calculada diariamente por meio do modelo de Penman-Monteith, parametrizado no boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998). Os dados meteorológicos necessários para o cálculo da ET₀ foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET), por meio de uma estação meteorológica automática situada a 1500 m da área experimental. A água utilizada foi proveniente de um açude, e apresentou ao longo do período estudado uma condutividade elétrica variando de 1,1 a 1,6 dS m⁻¹, sendo classificada como água com alta salinidade (C3S1), conforme Richards (1954). O total de água aplicada via irrigação foi de 1630,5 mm.

2.2.2. Sítio II

O solo das áreas experimentais foi classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico, com textura franco arenosa (SANTOS, 2018). A Tabela 2 mostra as características químicas e físicas na profundidade de 0,0 – 0,20 m do solo. A θ_{wp} e θ_{fc} o conteúdo de água foi igual a 0,06 e 0,20 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente.

Tabela 2. Características químicas e físicas dos solos das áreas experimentais do Sítio II cultivadas com clones de palma forrageira, em Serra Talhada, PE

Características químicas									
Prof.	CE	pH	P (Melich 1)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC	V
(cm)	mS cm ⁻¹		mg dm ⁻³	cmolc dm ⁻³			(%)		
0-20	0,56	6,8	72,3	1,0	0,03	4,25	1,9	7,8	92,5
Características físicas									
Prof.	Densidade		Porosidade		Partícula				
	(g dm ⁻³)		(%)		(g kg ⁻¹)				
(cm)	Solo	Partícula	Areia		Silte	Argila			
0-20	1,59	2,48	35,75	832,2	123,4	44,4			

CE – Condutividade elétrica, CTC – Capacidade de troca de cátions; V – Índice de soma de bases

2.2.2.1. Experimento I do Sítio II – Cultivo de clones de palma forrageira sob diferentes regimes hídricos

Nesse experimento os clones de palma forrageira OEM, MIU e IPA foram cultivados sob espaçamento de 1,0 x 0,2 m (50.000 plantas ha⁻¹), numa área de 960 m², durante dois ciclos produtivos. Ambos os ciclos tiveram 18 meses de duração, sendo o primeiro foi iniciado em janeiro de 2017 e finalizado em junho de 2018, e o segundo com início em fevereiro de 2019 e término em agosto de 2020.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, em esquema fatorial 4 x 3, em parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas experimentais foram constituídas por quatro regimes hídricos baseados na evapotranspiração da cultura - ET_c (0% - condição de sequeiro; 40% e 80% - déficit hídrico controlado e 120% - regime

hídrico acima do requerimento hídrico da cultura), enquanto as subparcelas foram constituídas pelos clones de palma forrageira. Cada parcela experimental apresentou 60 m², sendo compostas por quatro fileiras de cultivo, com 75 plantas em cada. As subparcelas apresentaram área igual a 20 m², contendo 100 plantas. As duas linhas centrais de cada subparcela, exceto uma planta de cada extremidade, foram consideradas as subparcelas úteis, com 46 plantas e área igual a 9,20 m².

2.2.2.2. Experimento II do Sítio II – Cultivo irrigado de clones de palma forrageira

Dois ciclos produtivos foram conduzidos para avaliar o desempenho de diferentes clones de palma submetidos a irrigação. O primeiro ciclo da cultura foi iniciado em janeiro de 2017, após a estabilização do estande de plantas e implementação do sistema de microirrigação, e perdurou até julho de 2018, totalizando 18 meses de avaliações. O segundo ciclo produtivo teve duração de 15 meses, com início em fevereiro de 2019 e conclusão em maio de 2020.

Foram utilizados seis clones de palma forrageira tolerantes à cochonilha do carmim [*Dactylopius opuntiae* (Cockerell, 1896)], os quais corresponderam aos tratamentos desse estudo: Orelha de Elefante Mexicana - OEM (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.); Miúda - MIU (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck); IPA Sertânia – IPA (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck); F8 (*Opuntia atropes* Rose); Orelha de Elefante Africana – OEA (*Opuntia undulata* Griffiths) e V19 (*Opuntia larreyi* F.A.C Weber ex Coult.) (Fig. 2). Os cladódios foram plantados sob espaçamento de 1,2 x 0,2 m (41.667 plantas ha⁻¹), e arranjadas em delineamento de blocos casualizados com três repetições. As parcelas experimentais foram compostas por três fileiras de cultivo, com 15 plantas de cada clone, totalizando 90 plantas por fileira, numa área total de 10,8 m².

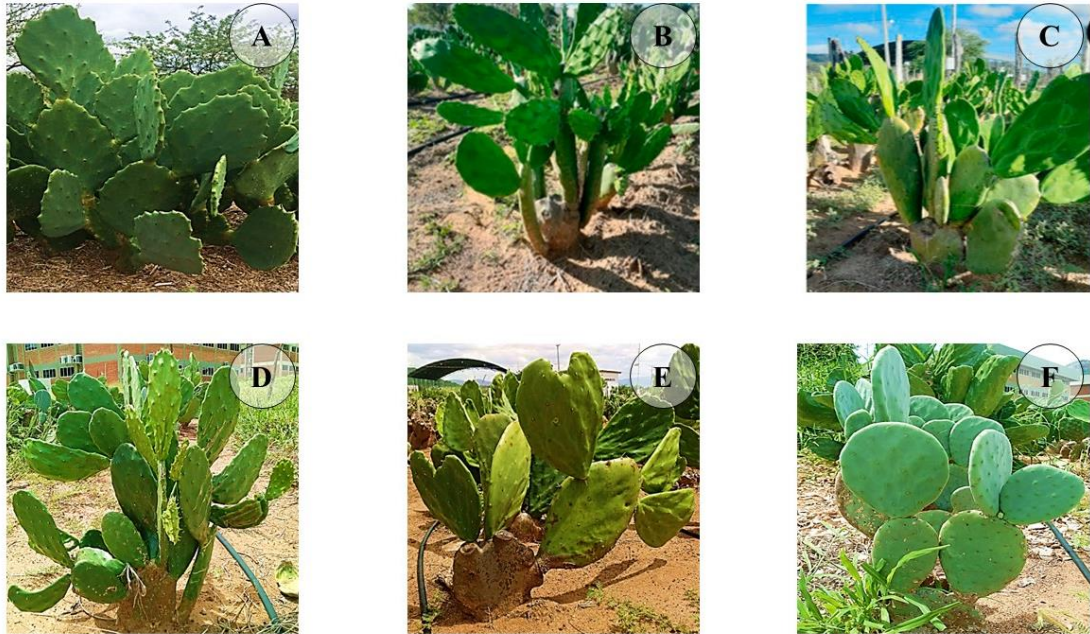


Figura 2. Espécies de palma forrageira cultivadas no experimento II, no município de Serra Talhada, PE. (A) Orelha de Elefante Mexicana – OEM [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.]; (B) Miúda – MIU [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck]; (C) IPA Sertânia – IPA [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck]; (D) F8 (*Opuntia atropes* Rose); (E) Orelha de Elefante Africana – OEA (*Opuntia undulata* Griffiths) e (F) V19 (*Opuntia larreyi* F.A.C Weber ex Coult.).

2.2.2.3. Manejo de irrigação e tratos culturais

A irrigação foi realizada por meio de fitas gotejadoras com emissores espaçados a 0,20 m, vazão de 2,25 L h⁻¹ a uma pressão de serviço igual a 100 kPa. A uniformidade de aplicação de água do sistema variou de 85% a 96% entre as áreas estudadas. A água utilizada foi proveniente de um poço artesiano, e apresentou condutividade elétrica variando de 1,51 a 1,65 dS m⁻¹; concentração média de sódio igual a 168,66 mg L⁻¹ e de potássio igual a 28,17 mg L⁻¹.

Os dados meteorológicos utilizados para o cálculo da ET₀ (modelo de Penman-Monteith FAO-56, Allen et al. (1998)) foram coletados por meio de uma estação automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET), localizada a aproximadamente 50 m das áreas experimentais. A ET_c foi obtida pelo produto da ET₀ e do coeficiente de cultura (K_c) médio igual a 0,52 (Queiroz et al., 2016). O total de água aplicado via irrigação no experimento I nas condições de 40, 80 e 120% da ET_c foi igual a 314,28 mm, 668,35 mm e 1025,87 mm no primeiro ciclo, e 232,33 mm,

476,47 mm e 728,29 mm no segundo ciclo, respectivamente. No experimento II o total de água recebido pela cultura via irrigação foi igual a 1025,87 mm e 728,29 mm nos ciclos I e II, respectivamente, referente a lâmina de 120% da ET_c .

Para garantir uma condição de pleno crescimento e desenvolvimento às plantas, realizou-se, quando necessário, o controle de plantas espontâneas, de pragas e doenças. A adubação química foi realizada a cada três meses, com a aplicação de 50 kg ha⁻¹ de NPK na formulação 14-00-08.

2.3. Características morfológicas e produtivas da cultura

As características morfológicas dos clones de palma foram monitoradas a partir de análises biométricas realizadas ao longo do período experimental. Nessas ocasiões, foram obtidos o número total de cladódios (NTC), comprimento, largura, espessura e perímetro dos cladódios (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a). De posse dos dados, procedeu-se com a estimativa da área e do índice de área dos cladódios, conforme os modelos matemáticos propostos por Silva et al. (2014a) e Pinheiro et al. (2014), respectivamente.

As fenofases dos clones de palma foram definidas com base na taxa de emissão dos cladódios. Para isso, foi realizado o ajuste de modelos sigmóides de três parâmetros entre o NTC e os graus dias acumulados (GDA, °Cdia); esse último obtido conforme Araújo Júnior et al. (2021a). As taxas foram calculadas a partir da derivada dos modelos obtidos (dNTC/dt). Considerou-se como a primeira fenofase (P1) o início da taxa de emissão até o momento em que a planta atingiu 50% do NTC. Após esse ponto, considerou-se o início da segunda fenofase (P2), que perdurou até o momento da máxima emissão de cladódio, que por sua vez, indica o início da fenofase três (P3) da planta. O final da P3 é considerado quando a dNTC/dt atingiu 50% do NTC posterior ao pico de emissão, dando início a fenofase 4 (P4), que tem duração até o final do ciclo cultura (ALVES et al., 2022).

A produtividade em biomassa fresca (FMY, Mg ha⁻¹) e seca (DMY, Mg ha⁻¹) foi obtida na ocasião da colheita (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021b). As plantas presentes nas parcelas úteis foram contabilizadas para determinação da densidade final de plantas. Todas as plantas presentes na parcela útil foram cortadas a partir dos cladódios de segunda ordem, e pesadas. Três cladódios representativos foram pesados (peso fresco), fracionados e acomodados em estufa de ventilação forçada de ar a 55°C até a obtenção do peso seco constante (SILVA & QUEIROZ, 2006). A razão entre o peso seco e o peso fresco dos cladódios resultou no conteúdo de matéria seca (DMC).

2.4. Evapotranspiração e coeficientes da cultura

A evapotranspiração (ET) foi determinada pelo o método simplificado do balanço de água no solo (BAS), conforme a Eq. 1 (LIBARDI, 2005).

$$-ET = P + I \pm Q - R - \Delta A \quad (1)$$

em que, P é a precipitação pluvial (mm); I é a irrigação (mm); Q é o fluxo vertical de água no solo (mm); R é o escoamento superficial (mm); e ΔA é a variação do armazenamento de água no solo (mm), para a camada de controle de 0,40 m.

O fluxo vertical de água no solo (Q) foi calculado a partir da Eq. de Darcy-Buckingham, conforme demonstrado na Eq. 2 (LIBARDI, 2005).

$$Q = -K(\theta) \times \frac{\Delta \Psi_t}{\Delta z} \quad (2)$$

em que, $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo (mm d^{-1}); $\frac{\Delta \Psi_t}{\Delta z}$ é o gradiente do potencial total de água no solo (m).

O R foi obtido de duas maneiras. Na área situada no Sítio I utilizou-se o método da curva número (CN), considerando um CN de 75, devido a melhor representação da taxa de infiltração, de plantio e condições hidrológicas observadas nos experimentos (ALVES et al., 2022). Para as áreas do Sítio II o R foi obtido a partir do ajuste da curva de regressão polinomial de grau 2 entre os dias em que houve precipitação pluvial e o volume de água escoado. Para tal, calhas de 1 m^2 foram instaladas na área experimental para captação do volume de água (litros) (Figura 3). O armazenamento de água no solo foi monitorado com o auxílio do sensor capacitivo, modelo Diviner 2000® Sentek Pty Ltd., Austrália, anteriormente calibrado conforme a metodologia de Araújo Primo et al. (2015). As leituras foram realizadas três vezes por semana, sempre antes das irrigações, em tubos de acesso nas parcelas experimentais. As leituras foram realizadas a cada 0,10 m, até a profundidade de 0,70 m do solo. A ΔA foi obtida pela diferença entre o armazenamento final e inicial de cada período avaliado. A condutividade hidráulica e o potencial total de água no solo foram obtidos a partir do método do perfil instantâneo (LIBARDI et al., 1980).



Figura 3. Calha utilizada para captação do volume de água da precipitação escoado.

O coeficiente de cultura simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e) foram calculados apenas para as condições onde a palma apresentou os maiores rendimentos produtivos. O K_c foi obtido a partir da razão entre a ET_c e ET_0 , conforme o boletim da FAO-56 (ALLEN et al., 1998):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (3)$$

em que, ET_c é a evapotranspiração da cultura, em mm dia^{-1} , e ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

O K_c duplo foi obtido a partir da separação dos componentes transpiração (K_{cb}) e a evaporação do solo (K_e). Para tal, a evapotranspiração foi particionada em transpiração (T) (Eq. 4) e evaporação (E) (ALBERTO et al., 2014) (Eq. 5) e, o K_{cb} e K_e foram calculados pelas Eqs. 6 e 7, respectivamente.

$$T = ET \times [1 - \exp^{(-k \times IAC)}] \quad (4)$$

$$E = ET - T \quad (5)$$

$$K_{cb} = \frac{T}{ET_0} \quad (6)$$

$$K_e = \frac{E}{ET_0} \quad (7)$$

em que, T é a transpiração da cultura (mm); k é o coeficiente de extinção luminosa; IAC é o índice de área do cladódio, em $m^2 m^{-2}$; E é a evaporação da água do solo (mm). Os valores de k para a palma OEM, MIU, IPA, OEA, V19 e F8 foram 0,42, 0,57, 0,52, 0,42, 0,42 e 0,52, respectivamente, estimados conforme Leite et al. (2017).

A curva do K_c foi determinada a partir do ajuste de modelos gaussianos de três parâmetros gerados de regressões entre o K_c observado e os dias de cultivo. A taxa de emissão de cladódios foi utilizada para avaliar o desenvolvimento da planta (i.e., fenofases), e a partir da determinação do comprimento de cada fenofase o $K_{c\text{ inicial}}$, $K_{c\text{ médio}}$ e $K_{c\text{ final}}$ foram identificados (ALLEN et al., 1998).

2.5. Indicadores de eficiência no uso da água

A produtividade de água da cultura (PA_c , $Mg m^{-3}$) e a produtividade de água de irrigação (PA_i , $Mg m^{-3}$) foram calculadas para as condições estudadas, a partir das Eqs. 8 e 9, respectivamente (FERNÁNDEZ et al., 2020).

$$PA_c = \frac{Y}{\sum(ET_c)} \quad (8)$$

$$PA_i = \frac{Y}{\sum(I)} \quad (9)$$

em que, ET_c é a evapotranspiração da cultura (m^3); P é a precipitação pluvial total ao longo do período experimental (m^3); I é a irrigação total ao longo do período experimental (m^3); Y é a produtividade da cultura em base fresca ($kg ha^{-1}$).

A produtividade econômica de água da cultura (PEA_c , $US\$ m^{-3}$) (Eq. 10) e a produtividade econômica da água de irrigação (PEA_i , $US\$ m^{-3}$) (Eq. 11) (FERNÁNDEZ et al., 2020) foram determinadas a fim de verificar a viabilidade econômica do uso de irrigação em sistemas de produção com palma forrageira.

$$PEA_c = \frac{LU}{\sum(ET_c)} \quad (10)$$

$$PEA_i = \frac{LU}{\sum(I)} \quad (11)$$

em que, LU é o lucro obtido por área, em $US\$ ha^{-1}$, considerando os custos para implantação dos sistemas produtivos (FERNÁNDEZ et al., 2020) e a venda de forragem (i.e., valor da tonelada de palma igual a $US\$ 27,80$ (i.e., dólar igual a $R\$ 5,40$) com base

no comércio local), ET_c é a evapotranspiração da cultura ($m^3 ha^{-1}$), e I é a irrigação acumulada ao longo do ciclo (m^3).

2.6. Análise estatística

Os dados de produtividade e dos indicadores de eficiência do uso da água foram submetidos a teste de normalidade (Shapiro-Wilk test) e homocedasticidade a 5% de significância (Oneill e Mathews test). Atendendo aos pressupostos, procedeu-se com teste de análise de variância e, quando significativos, realizou-se o teste de média de Tukey a 5% de probabilidade. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados com o pacote Exp.des.pt (FERREIRA et al., 2018) do software R (R CORE TEAM, 2019).

3. RESULTADOS

3.1. Condições ambientais

Os valores diários de precipitação pluvial e da ET_0 do Sítio I são apresentados na Figura 4. Durante o período de abril de 2012 a março 2014 o total da precipitação pluvial foi igual a 883,7 mm, sendo os meses de janeiro, abril e dezembro de 2013 e fevereiro de 2014 os mais chuvosos do período estudado, com valor acumulado igual a 491,9 mm. A ET_0 variou entre valores mínimos de 2,01 mm e máximos de 8,01 mm, apresentando média igual a 5,24 mm dia⁻¹.

Durante maior parte do período experimental a umidade do solo esteve entre a θ_{fc} e θ_{wp} , variando de 0,08 a 0,23 $cm^3 cm^{-3}$, 0,09 a 0,25 $cm^3 cm^{-3}$ e 0,07 a 0,24 $cm^3 cm^{-3}$ entre os clones IPA, MIU e OEM, respectivamente (Fig. 5A).

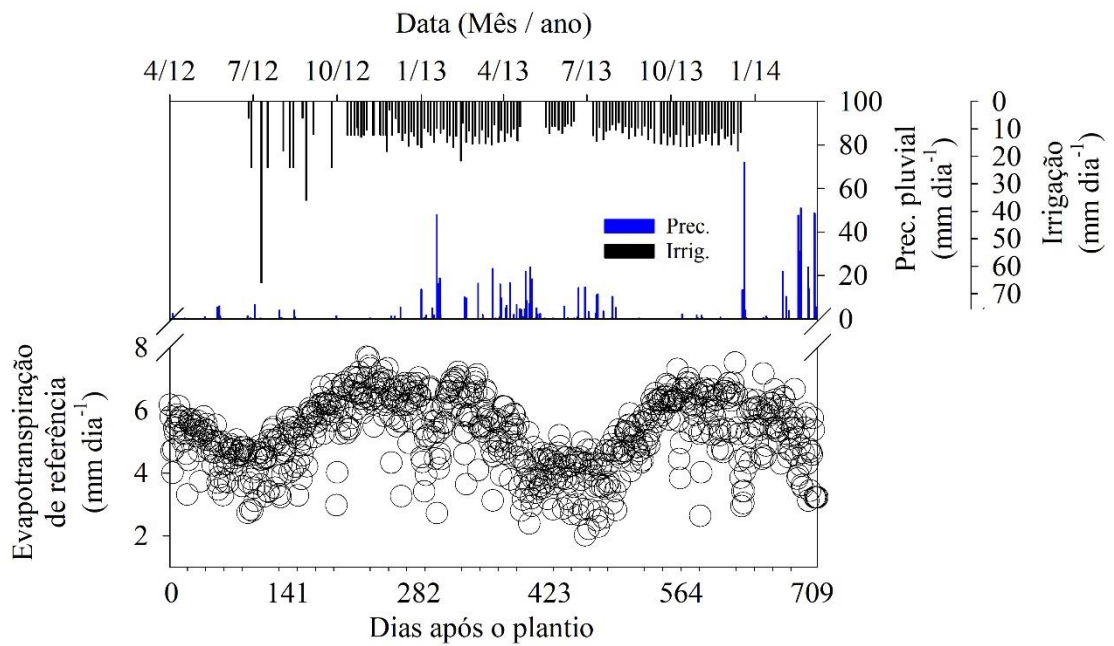


Figura 4. Valores diários de precipitação pluvial, irrigação e da ET_0 ao longo do período experimental 2012-2014.

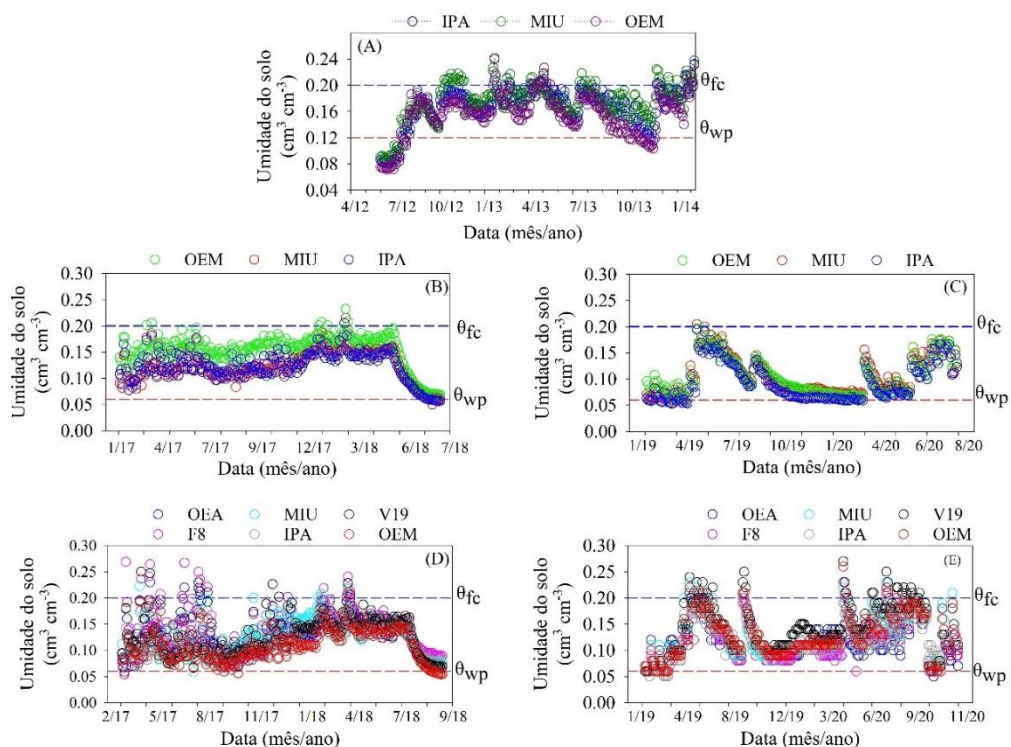


Figura 5. Umidade do solo ao longo do ciclo produtivo da área experimental do Sítio I (A) e experimentos I (B e C) e II (D e E) do Sítio II, durante os anos 2012 a 2020.

A Figura 6 mostra as condições ambientais ocorridas durante o primeiro e segundo ciclo dos experimentos I (Fig. 6A) e II (Fig. 6B) do Sítio II. A precipitação pluvial total observada no ciclo I foi igual a 1002,8 mm, com os meses de fevereiro (100,6 mm) e abril (175,8 mm) de 2017 e fevereiro (166,4 mm) e março (108,8 mm) de 2018 sendo os mais chuvosos do período, correspondendo a 55% do total precipitado. Os valores diários de ET_0 variaram de 1,8 a 7,52 mm, com média igual a 4,74 mm dia⁻¹. O segundo ciclo produtivo da cultura foi marcado pela elevada precipitação acumulada, igual a 1665,8 mm no experimento I e 1630,8 mm no experimento II, sendo o ano de 2020 responsável por 61,75% do total precipitado. Nesse ano, os meses de fevereiro, março, abril e maio apresentaram valores acumulados acima de 100 mm mês⁻¹, representando 55,10% do total observado. Em 2019, os meses de março e abril foram os mais chuvosos, com valores acumulados de 216,4 e 190 mm mês⁻¹, respectivamente. A ET_0 média foi igual a 4,53 mm dia⁻¹, com valores oscilando entre 1,52 e 6,96 mm dia⁻¹.

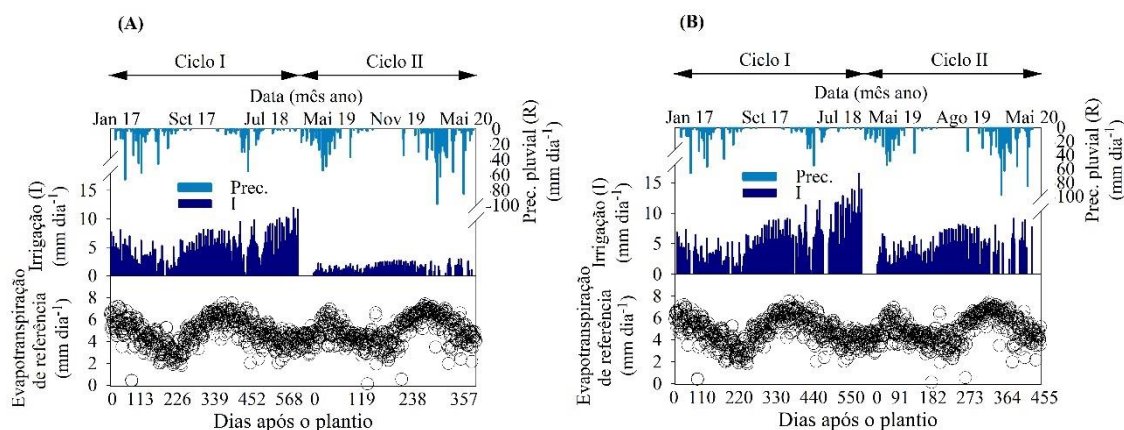


Figura 6. Condições ambientais ocorridas durante o primeiro e segundo ciclo dos experimentos I e II do Sítio II.

Os valores médios de umidade do solo variaram de 0,08 a 0,21 cm³ cm⁻³ e 0,062 a 0,20 cm³ cm⁻³ no decorrer do primeiro (Fig. 4B) e segundo (Fig. 4C) ciclo, respectivamente, do experimento I. No experimento II, a variação da umidade do solo foi de 0,055 a 0,26 cm³ cm⁻³ nos dois ciclos experimentais (Fig. 5D e E), mantendo-se entre a θ_{fc} e θ_{wp} durante maior parte dos períodos estudados.

3.2. Produtividade e fenofases da cultura

3.2.1. Produtividade em matéria fresca, seca e conteúdo de matéria seca

Os valores médios da produtividade em matéria fresca (FMY), seca (DMY) e conteúdo de matéria seca (DMC) dos clones de palma cultivados no Sítio I são apresentados na Tabela 3. Para FMY e DMY, o clone OEM apresentou maiores valores em relação aos demais ($p < 0,05$), com média de 182,51 Mg ha⁻¹ e 19,26 Mg ha⁻¹, respectivamente. Os clones MIU e IPA não diferiram entre si ($p > 0,05$), apresentando rendimento médio igual a 93,54 Mg ha⁻¹ em FMY e 9,83 Mg ha⁻¹ em DMY. Um DMC médio de 0,10 foi verificado para os clones ($p > 0,05$).

Tabela 3. Análise de variância (ANOVA) para produtividade em matéria fresca (FMY), seca (DMY) e conteúdo de matéria seca (DMC) de clones de palma forrageira irrigados em ambiente semiárido, durante safra 2012-2014

Fonte de variação	Valor - p		
	FMY	DMY	DMC
Clones (CL)	<0,0001**	0,0012**	0,1842
Clones	Médias		
	FMY	DMY	DMC
IPA	109,66b	10,41b	0,09
MIU	77,43b	9,24b	0,11
OEM	182,51a	19,26a	0,10

Nota: valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,01$).

Os asteriscos (**) denotam significância de 0,01.

DMY, matéria seca (Mg ha⁻¹); DMC, teor de matéria seca; FMY, matéria fresca (Mg ha⁻¹).

Durante o primeiro e segundo ciclo produtivo da cultura no experimento I do Sítio II, observamos que não houve interação entre os clones e os regimes hídricos impostos sobre FMY, DMY e DMC (Tabela 4). Por outro lado, o rendimento da cultura foi influenciado pelos clones ($p < 0,05$), onde a OEM apresentou os maiores valores em relação às demais. Em média, a FMY e DMY dessa espécie no primeiro ciclo foi igual a 312,38 Mg ha⁻¹ e 30,73 Mg ha⁻¹, respectivamente, enquanto o clone MIU apresentou valores iguais a 190,67 Mg ha⁻¹ para FMY e 19,25 Mg ha⁻¹ para DMY, e o clone IPA 82,57 Mg ha⁻¹ para FMY e 6,79 Mg ha⁻¹ em DMY. Para DMC, os clones OEM e MIU não diferiram entre si, com média igual a 0,10. No segundo ciclo, a média do clone OEM foi igual a 321,97 Mg ha⁻¹ em FMY, 28,41 Mg ha⁻¹ em DMY e 0,09 para CSM, sendo

esses valores 280%, 351% e 22%, respectivamente, superiores aos observados em MIU e IPA ($p < 0,05$).

Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) para produtividade em matéria fresca (FMY), seca (DMY) e conteúdo de matéria seca (DMC) de clones de palma forrageira cultivados sob diferentes regimes hídricos (% ET_c) durante dois ciclos produtivos

Fonte de variação	Ciclo 2017-2018			Ciclo 2019-2020		
	Valor - p			Valor - p		
	FMY	DMY	DMC	FMY	DMY	DMC
Clones (C)	<0,0001**	<0,0001**	<0,0012**	<0,0001**	<0,0001**	<0,0001**
Regimes hídricos (WR)	0,3088	0,24779	0,5957	0,4645	0,5671	0,342
C x WR	0,7242	0,6608	0,9713	0,2735	0,118	0,0792
Clones	Média			Média		
	FMY	DMY	DMC	FMY	DMY	DMC
IPA	82,57c	6,79c	0,084b	101,26b	7,32b	0,07b
MIU	190,67b	19,25b	0,097a	67,97b	5,27b	0,077b
OEM	312,38a	30,73a	0,104a	321,97a	28,41a	0,09a
Regimes hídricos	Média			Média		
	FMY	DMY	DMC	FMY	DMY	DMC
0	192,00	19,59	0,100	152,72	13,23	0,076
40	166,06	16,00	0,092	183,55	15,12	0,076
80	200,00	18,56	0,095	154,14	13,66	0,082
120	222,75	21,55	0,093	164,24	12,66	0,078

Nota: valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,01$).

Os asteriscos (**) denotam significância de 0,01.

DMY, matéria seca ($Mg\ ha^{-1}$); DMC, teor de matéria seca; FMY, matéria fresca ($Mg\ ha^{-1}$).

Embora os regimes hídricos não tenham influenciado o rendimento dos clones, verificamos maiores valores de FMY nos tratamentos de 120% ET_c (222,75 $Mg\ ha^{-1}$) e 40% ET_c (183,55 $Mg\ ha^{-1}$) no primeiro e segundo ciclo, respectivamente. Além disso, a Figura 5B e C mostra que nessas condições a umidade do solo se manteve entre a θ_{fc} e θ_{wp} durante maior parte do período experimental, caracterizando um ambiente de plena disponibilidade hídrica para a cultura. Desse modo, consideramos esses tratamentos para a determinação da ET_c e coeficientes de cultivo simples e duplo dos clones, por favorecer um melhor desempenho produtivo às plantas.

No experimento II (Tabela 5), durante o ciclo I, o rendimento em FMY dos clones OEA, V19 e OEM foi superior aos observados nos demais clones, com média de 266,24 $Mg\ ha^{-1}$ ($p < 0,05$). Em se tratando da DMY, o clone OEM apresentou maior produtividade (22,60 $Mg\ ha^{-1}$), seguido dos clones OEA, V19 e MIU, que não diferiram entre si ($p > 0,05$). Comportamento semelhante foi verificado para o DMC.

Tabela 5. Análise de variância (ANOVA) para produtividade em matéria fresca (FMY), seca (DMY) e conteúdo de matéria seca (DMC) de clones de palma forrageira irrigados durante dois ciclos produtivos

Fonte de variação	Ciclo 2017-2018			Ciclo 2019-2020		
	Valor - p			Valor - p		
	FMY	DMY	DMC	FMY	DMY	DMC
Clones (C)	<0,0001**	<0,0001**	<0,029*	0,0469*	0,0187*	0,1078
Clones	Média			Média		
	FMY	DMY	DMC	FMY	DMY	DMC
OEA	252,57a	13,22b	0,05b	448,13a	25,55a	0,06
F8	21,34c	1,17c	0,06ab	14,87c	0,85c	0,06
MIU	102,81b	8,40bc	0,07ab	162,62b	9,53b	0,06
IPA	43,43c	3,28c	0,07ab	157,53b	11,05b	0,07
V19	287,27a	13,24b	0,05b	181,95b	9,76b	0,06
OEM	258,90a	22,60a	0,09a	630,68a	42,17a	0,07

Nota: valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,01$). Os asteriscos (**) denotam significância de 0,01. DMY, matéria seca (Mg ha^{-1}); DMC, teor de matéria seca; FMY, matéria fresca (Mg ha^{-1}).

No segundo ciclo, os clones OEM e OEA apresentaram o maior rendimento em FMY, com média de $539,40 \text{ Mg ha}^{-1}$, seguido dos clones MIU, IPA e V19, que não diferiram entre si ($p < 0,05$), e apresentaram rendimento médio igual a $167,37 \text{ Mg ha}^{-1}$. A espécie F8 apresentou o pior desempenho em ambos os ciclos estudados. Ao considerar a DMY, verificou-se o mesmo comportamento da FMY, com os clones OEM e OEA apresentando rendimento superior aos demais ($33,86 \text{ Mg ha}^{-1}$). Para o DMC, observou-se média igual a 0,06 para os clones ($p > 0,05$).

3.2.2. Fenofases

A partir da taxa de emissão de cladódios observou-se a ocorrência de quatro fenofases nos clones de palma forrageira ao longo do período estudado no Sítio I (Fig. 7). A duração de cada fenofase e o número total de cladódios (NTC) variaram de acordo com os clones. Maior NTC foi verificado no clone MIU (29 unidades), seguido dos clones OEM (16 unidades) e IPA (14 unidades) (Tabela 6).

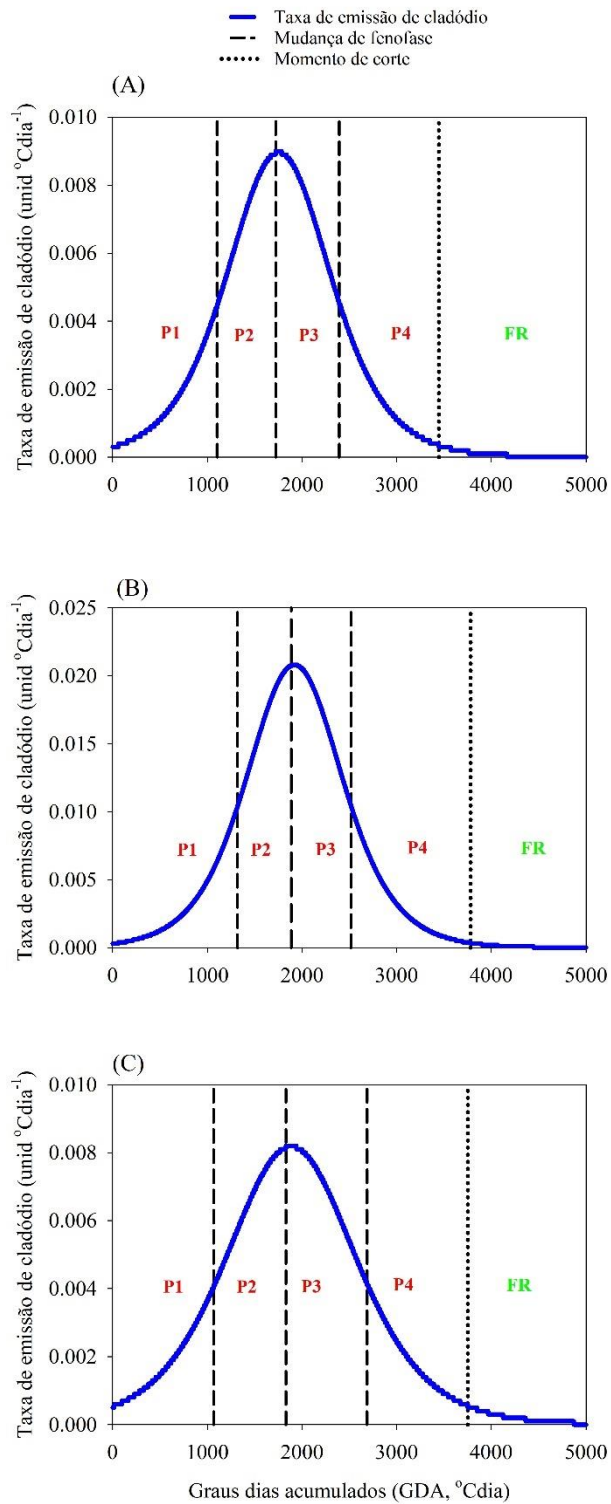


Figura 7. Taxa de emissão de cladódio e estágios fenológicos de clones de palma forrageira em função dos graus dias acumulados. P1, P2, P3, P4 e FR correspondem a fenofase 1, 2, 3, 4 e reserva de forragem, respectivamente. (A) IPA Sertânia; (B) Miúda e (C) Orelha de Elefante Mexicana.

Tabela 6. Duração, graus-dia acumulados, evapotranspiração média diária e acumulada e coeficiente de cultura por fenofase de clones de palma forrageira, durante a safra 2012-2014

Fenofase	Dur.		GD	GDA	ET	ΣET	K _c			K _{cb}	K _e	fT	fE	NTC
	Dur.	Acumu					I	F	M					
	dias	l.	°Cdia	mm dia ⁻¹	mm	Unid.								
IPA Sertânia														
P1	267	267	1103	1103	2,10	561	0,15	0,63	0,37	0,02	0,36	4%	96%	3
P2	97	364	620	1723	4,04	392	0,63	0,76	0,70	0,08	0,62	12%	88%	7
P3	200	564	671	2394	3,39	679	0,76	0,63	0,74	0,15	0,58	21%	79%	12
P4-HT	255	819	1053	3447	2,03	519	0,63	0,16	0,38	0,13	0,24	36%	64%	14
P4-RF	-	>819	721	4168	0,39	80	0,16	0,02	0,07	0,03	0,04	36%	64%	> 14
Miúda														
P1	301	301	1318	1318	2,23	670	0,14	0,69	0,40	0,06	0,34	15%	85%	5
P2	102	403	568	1886	4,02	411	0,69	0,79	0,76	0,26	0,50	34%	66%	14
P3	184	587	633	2519	3,47	638	0,79	0,59	0,73	0,33	0,40	45%	55%	25
P4-HT	351	938	1263	3782	1,40	487	0,59	0,05	0,27	0,15	0,11	58%	42%	29
P4-RF	-	> 938	665	4447	0,14	19	0,05	0,01	0,03	0,02	0,01	58%	42%	> 29
Orelha de Elefante Mexicana														
P1	260	260	1066	1066	1,98	515	0,13	0,62	0,35	0,01	0,34	4%	96%	3
P2	124	384	764	1830	4,08	506	0,62	0,79	0,72	0,23	0,49	32%	68%	8
P3	231	615	858	2688	3,43	793	0,79	0,53	0,72	0,37	0,34	52%	48%	14
P4-HT	318	933	1065	3753	1,23	391	0,53	0,05	0,24	0,13	0,11	56%	44%	16
P4-RF	-	> 933	1119	4872	0,09	22	0,05	0,00	0,02	0,01	0,01	56%	44%	> 16

Graus dias (GD) e graus dias acumulados (GDA) calculados com uma temperatura base de 22°C;

HT - época de colheita;

RF - Período de reserva de forragem, mantendo a cultura no campo;

I, F e M - valores inicial, final e médio do coeficiente da cultura (K_c) por fenofase, respectivamente;

K_{cb}, K_e, fT e fE - coeficiente da cultura basal, coeficiente de evaporação do solo, fração da transpiração e fração evaporação, respectivamente;

NTC - número total de cladódios.

A fenofase 3 (P3), caracterizada pela redução da taxa de emissão de cladódios até 50% do NTC, teve maior duração no clone OEM (231 dias, 858 °Cdia). Já para os clones IPA e MIU a P3 contabilizou 200 dias (671 °Cdia) e 184 dias (633 °Cdia), respectivamente. A fenofase 4 (P4) foi subdividida em duas fases, uma até o momento ideal de colheita da cultura (P4-HT) determinado com base na taxa de emissão de cladódios, e a outra o período após P4-HT, denominado como reserva forrageira (P4-FR). A primeira fase da P4 teve maior duração no clone MIU (351 dias, 1263 °Cdia) que, conseqüentemente, resultou em maior tempo para ser colhida em relação aos clones IPA (255 dias, 1053°Cdia) e OEM (318 dias, 1065 °Cdia). Ao considerar a fase P4-FR, um adicional de 721 °Cdia, 665 °Cdia e 1119 °Cdia para os clones IPA, MIU e OEM, respectivamente, é necessário, aumentando o ciclo produtivo da cultura para 21 meses. Na prática, manter a cultura em campo após o momento de colheita pode ser uma estratégia para alimentação dos rebanhos em períodos em que o aporte forrageiro é menor.

No experimento I do Sítio II foram definidas quatro fenofases para os clones OEM (Fig. 8A), MIU (Fig. 8B) e IPA (Fig. 8C) submetidos ao regime hídrico de 120%ET_c (i.e., 1º ciclo produtivo). A duração de cada fenofase, bem como o NTC são exibidos na Tabela 7. Os resultados mostraram que o clone MIU apresentou menor duração da P1 em relação às demais fenofases, e aos clones OEM e IPA, que por sua vez, apresentaram menor duração da P4. Em contrapartida, a P2 teve maior duração em OEM e MIU, atingindo

153 dias (557 °Cdia) e 260 dias (1110 °Cdia), respectivamente. Para o clone IPA, a fenofase 3 atingiu 320 dias (1326 °Cdia), sendo a de maior duração dessa espécie. Com base na subdivisão de P4, verificou-se uma redução do momento de colheita do clone OEM em relação a MIU e IPA. Enquanto o HT da OEM foi aos 362 dias (1829 °Cdia), os clones MIU e IPA atingiram esse momento após os 600 dias de cultivo.

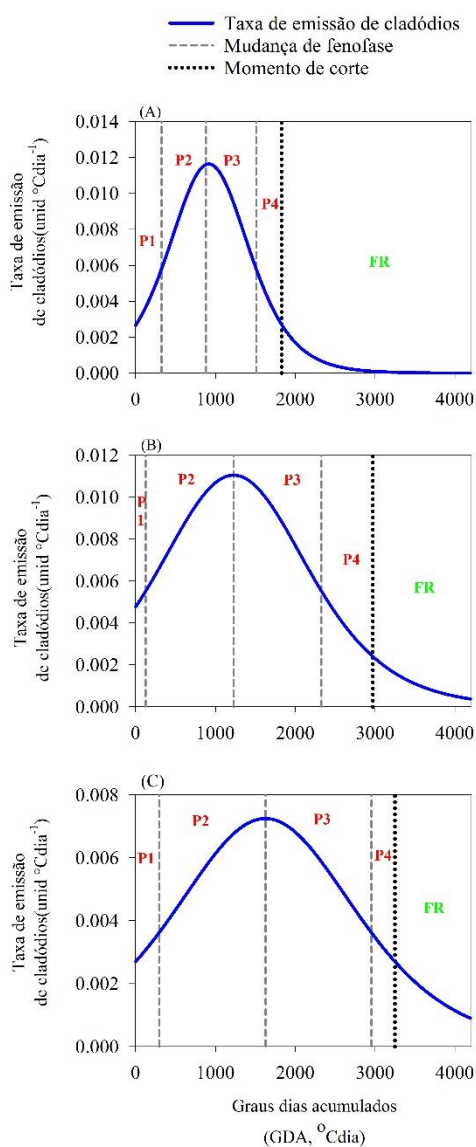


Figura 8. Taxa de emissão de cladódio e estágios fenológicos de clones de palma forrageira OEM (A), MIU (B) e IPA (C) em função dos graus dias acumulados, sob regime hídrico de 120%ET_c durante a safra 2017-2018.

Tabela 7. Duração, graus-dia acumulados, evapotranspiração da cultura média diária e acumulada e coeficiente de cultura por fenofase de clones de palma forrageira cultivados sob regime hídrico de 120% da ET_c durante a safra 2017-2018

Fenofase	Dur.	Dur.	GD	GDA	ET	ΣET	K_c			K_{cb}	K_e	fT	fE	NTC
	dias	Acumul.					$^{\circ}Cday$	I	F					
Orelha de Elefante Mexicana														
P1	68	68	325	325	2,49	169	0,49	0,51	0,52	0,20	0,31	40%	60%	2
P2	153	221	557	882	2,79	427	0,54	0,65	0,60	0,24	0,36	40%	60%	7
P3	100	321	628	1510	4,31	431	0,65	0,70	0,68	0,27	0,41	40%	60%	13
P4-HT	41	362	319	1829	4,58	188	0,70	0,71	0,71	0,28	0,43	40%	60%	15
P4-RF	-	>363	2365	4194	3,18	1721	0,71	0,51	0,67	0,50	0,17	75%	25%	>15
Miúda														
P1	28	28	127	127	1,72	48	0,42	0,45	0,44	0,12	0,32	28%	72%	4
P2	260	288	1100	1227	2,88	748	0,45	0,65	0,56	0,15	0,40	28%	72%	14
P3	155	443	1101	2328	4,13	641	0,65	0,71	0,68	0,27	0,41	39%	61%	24
P4-HT	213	656	644	2972	3,01	641	0,71	0,68	0,71	0,43	0,28	61%	39%	26
P4-RF	-	>656	1222	4194	3,03	744	0,68	0,51	0,61	0,42	0,19	69%	31%	>26
IPA Sertânia														
P1	62	62	295	295	2,21	137	0,43	0,48	0,46	0,16	0,29	36%	64%	3
P2	270	332	1333	1628	3,20	863	0,48	0,66	0,58	0,21	0,37	36%	64%	11
P3	320	652	1326	2954	3,26	1044	0,66	0,67	0,69	0,39	0,30	56%	44%	19
P4-HT	45	697	295	3249	4,08	183	0,67	0,65	0,66	0,44	0,22	67%	33%	20
P4-RF	-	>697	945	4194	2,77	568	0,65	0,51	0,59	0,41	0,18	70%	30%	>20

Graus dias (GD) e graus dias acumulados (GDA) calculados com uma temperatura base de 22°C;

HT - época de colheita;

RF - Período de reserva de forragem, mantendo a cultura no campo;

I, F e M - valores inicial, final e médio do coeficiente da cultura (K_c) por fenofase, respectivamente;

K_{cb} , K_e , fT e fE - coeficiente da cultura basal, coeficiente de evaporação do solo, fração da transpiração e fração evaporação, respectivamente;

NTC - número total de cladódios.

Quatro fenofases também foram observadas quando a cultura foi submetida ao regime hídrico de 40% ET_c , durante o segundo ciclo produtivo (Fig. 9). Verificou-se que as fenofases P2 e P3 tiveram menores durações em relação a P1 e P4, diferentemente do observado no ciclo anterior. A fenofase P1 foi a de maior duração nos clones OEM e IPA, que atingiram 108 dias (580 $^{\circ}Cdia$) e 113 dias (598 $^{\circ}Cdia$), respectivamente, enquanto a P4 perdurou por mais tempo no clone MIU (108 dias, 317 $^{\circ}Cdia$) (Tabela 8). O momento de corte foi semelhante entre as espécies, podendo ser realizado aos 252 dias no clone OEM (Fig. 9A), 272 dias no clone MIU (Fig. 9B) e 233 dias no clone IPA (Fig. 9C).

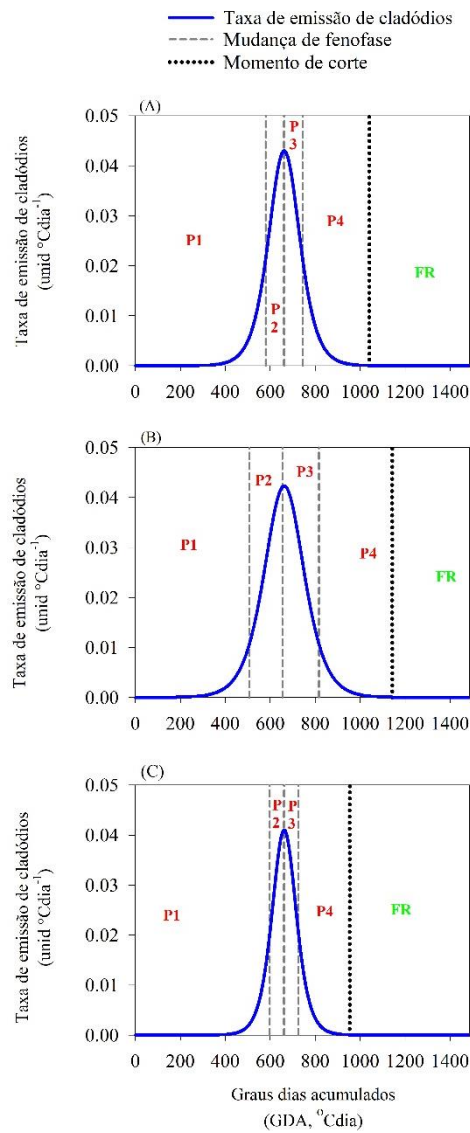


Figura 9. Taxa de emissão de cladódio e estágios fenológicos de clones de palma forrageira OEM (A), MIU (B) e IPA (C) em função dos graus dias acumulados, sob regime hídrico de 40% da ET_c durante a safra 2019-2020.

Tabela 8. Duração, graus-dia acumulados, evapotranspiração da cultura média diária e acumulada e coeficiente de cultura por fenofase de clones de palma forrageira cultivados sob regime hídrico de 40% da ET_c durante a safra 2019-2020

Fenofase	Dur. Acumul. dias	GD GDA °Cdia	ET mm dia ⁻¹	ΣET mm	K _c			K _{cb}	K _e	fT	fE	NTC Unid.		
					I	F	M							
Orelha de Elefante Mexicana														
P1	108	108	580	580	3,16	340,79	0,47	0,78	0,66	0,31	0,35	47%	53%	2
P2	21	129	81	661	2,77	58,27	0,78	0,78	0,78	0,36	0,42	47%	53%	5
P3	22	151	83	744	3,29	72,47	0,78	0,75	0,77	0,36	0,41	47%	53%	8
P4-HT	101	252	297	1041	2,59	261,17	0,75	0,39	0,59	0,27	0,31	47%	53%	9
P4-RF	-	>252	445	1486	0,73	164,98	0,39	0,01	0,12	0,06	0,06	47%	53%	>9
Miúda														
P1	103	103	558	558	3,24	333,76	0,46	0,82	0,67	0,23	0,44	34%	66%	2
P2	27	130	100	658	3,04	82,05	0,82	0,82	0,82	0,28	0,54	34%	66%	6
P3	34	164	108	766	3,30	112,35	0,82	0,82	0,79	0,27	0,52	34%	66%	10
P4-HT	108	272	377	1143	2,50	270,44	0,76	0,31	0,54	0,18	0,36	34%	66%	11
P4-RF	-	>272	343	1486	0,53	111,06	0,31	0,00	0,09	0,03	0,06	34%	66%	>11
IPA Sertânia														
P1	113	113	598	598	3,35	378,00	0,48	0,70	0,84	0,23	0,47	33%	67%	2
P2	16	129	63	661	2,81	44,92	0,84	0,84	0,84	0,27	0,57	33%	67%	4
P3	17	146	65	726	3,57	60,63	0,83	0,82	0,81	0,27	0,56	33%	67%	6
P4-HT	87	233	228	954	2,72	236,55	0,81	0,66	0,47	0,21	0,44	33%	67%	7
P4-RF	-	>233	532	1486	0,78	190,93	0,46	0,00	0,13	0,04	0,09	33%	67%	>7

Graus dias (GD) e graus dias acumulados (GDA) calculados com uma temperatura base de 22°C;

HT - época de colheita;

RF - Período de reserva de forragem, mantendo a cultura no campo;

I, F e M - valores inicial, final e médio do coeficiente da cultura (K_c) por fenofase, respectivamente;

K_{cb}, K_e, fT e fE - coeficiente da cultura basal, coeficiente de evaporação do solo, fração da transpiração e fração evaporação, respectivamente;

NTC - número total de cladódios.

No primeiro ciclo do experimento II foram observadas quatro fenofases em cada um dos seis clones estudados (Fig. 10). A taxa de emissão de cladódios e, conseqüentemente, a duração das fenofases e o NTC variaram conforme as espécies. Um maior NTC foi observado no cacto MIU (56 unidades), enquanto o clone V19 apresentou menor emissão (11 unidades) (Tabela 9). A P1 foi a fenofase de menor duração em todos os clones, com tempo variando de 1 a 66 dias (Tabela 9). No geral, observou-se que as espécies do gênero *Opuntia* apresentaram P3 mais duradoura em relação as demais fenofases. Essa tendência não foi verificada no clone OEA, que apresentou P2 mais demorada, assim como as espécies MIU e IPA (Tabela 9).

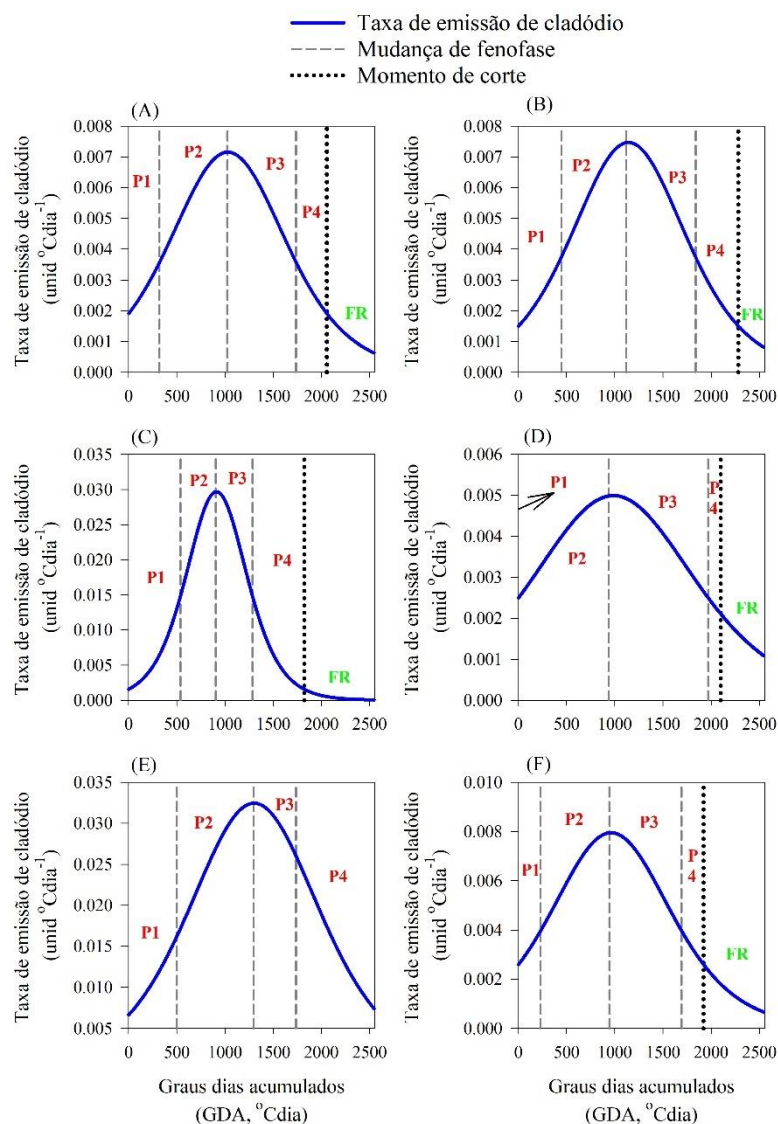


Figura 10. Taxa de emissão de cladódio e estágios fenológicos de clones de palma forrageira em função dos graus dias acumulados. P1, P2, P3, P4 e FR correspondem a fenofase 1, 2, 3, 4 e reserva de forragem, respectivamente. (A) Orelha de Elefante Africana; (B) IPA Sertânia; (C) F8; (D) V19; (E) Miúda e (F) Orelha de Elefante Mexicana.

A fenofase P3 em F8, V19 e OEM atingiu 144 dias (381 °Cdia), 233 dias (1031 °Cdia) e 183 dias (748 °Cdia), respectivamente. Por outro lado, a duração da P2 na OEA foi igual a 205 dias (703 °Cdia), na MIU igual a 241 dias (795 °Cdia) e na IPA igual a 216 dias (675 °Cdia). Ao considerar a primeira fase da P4, verificou-se que o clone F8 apresentou o menor HT, podendo ser colhido aos 378 dias de cultivo (1823 °Cdia) (Fig. 10C). O clone OEM atingiu o HT aos 394 dias (1922 °Cdia) (Fig. 10F), enquanto a OEA (Fig. 10A), MIU (Fig. 10E), IPA (Fig. 10B) e V19 (Fig. 10D) alcançaram o momento de colheita após os 400 dias de cultivo.

Tabela 9. Duração, graus-dia acumulados, evapotranspiração média diária e acumulada e coeficiente de cultura por fenofase de clones de palma forrageira, durante a safra 2017-2018

Fenofases	Dur.	Dur. acum.	GD	GDA	ET _c	ΣET _c	K _c			K _{cb}	K _e	fT	fE	NTC
	dias	°Cdia					I	F	M					
Orelha de Elefante Africana														
P1	28	28	320	320	0,76	21,32	0,11	0,14	0,13	0,01	0,11	12%	88%	3
P2	205	233	703	1023	1,25	256,87	0,14	0,52	0,32	0,09	0,23	27%	73%	7
P3	130	363	714	1737	3,79	492,85	0,53	0,73	0,64	0,30	0,34	46%	54%	11
P4-HT	61	424	320	2057	3,66	223,02	0,73	0,74	0,74	0,49	0,25	67%	33%	12
P4-RF	-	>424	490	2547	2,78	394,61	0,74	0,56	0,67	0,44	0,22	66%	34%	>12
F8														
P1	66	66	538	538	0,89	58,94	0,12	0,21	0,16	0,01	0,15	6%	94%	5
P2	88	154	367	905	1,19	105,14	0,21	0,38	0,29	0,05	0,24	16%	84%	13
P3	144	298	381	1286	2,55	367,61	0,39	0,69	0,54	0,19	0,35	35%	65%	22
P4-HT	80	378	537	1823	4,44	355,36	0,69	0,77	0,74	0,32	0,41	44%	56%	26
P4-RF	-	> 378	724	2547	3,44	918,30	0,69	0,55	0,71	0,24	0,47	34%	66%	>26
Miúda														
P1	58	58	500	500	0,87	50,39	0,12	0,19	0,15	0,01	0,15	3%	97%	10
P2	241	299	795	1295	1,86	447,93	0,19	0,64	0,41	0,17	0,24	36%	64%	30
P3	64	363	442	1737	4,19	267,88	0,64	0,72	0,68	0,49	0,19	72%	28%	44
P4-HT	202	565	810	2547	3,05	616,83	0,72	0,58	0,69	0,54	0,15	78%	22%	56
P4-RF	-	> 565	>2574	>2574	3,05	612,58	0,72	0,58	0,69	0,54	0,15	78%	22%	>57
IPA Sertânia														
P1	49	49	445	445	0,86	42,14	0,12	0,18	0,15	0,003	0,15	2%	98%	3
P2	216	265	675	1120	1,53	329,71	0,18	0,57	0,37	0,05	0,32	12%	88%	7
P3	114	379	720	1840	3,97	452,87	0,58	0,71	0,66	0,21	0,45	32%	68%	11
P4-HT	101	480	443	2283	3,16	318,77	0,71	0,68	0,71	0,28	0,43	40%	60%	12
P4-RF	-	> 480	264	2547	2,89	531,42	0,71	0,56	0,67	0,30	0,37	45%	55%	>12
V19														
P1	1	1	1	1	0,76	0,76	0,13	0,13	0,13	0,00	0,12	3%	97%	3
P2	168	169	937	938	1,23	206,51	0,13	0,48	0,28	0,04	0,25	11%	89%	6
P3	233	402	1031	1969	3,86	899,40	0,48	0,85	0,73	0,19	0,54	25%	75%	11
P4-HT	2	404	6	1975	4,18	8,36	0,85	0,85	0,85	0,29	0,55	34%	66%	11
P4-RF	-	> 404	572	2547	3,03	496,68	0,85	0,53	0,72	0,28	0,44	39%	61%	>11
Orelha de Elefante Mexicana														
P1	16	16	231	231	0,76	12,17	0,12	0,13	0,12	0,01	0,12	4%	96%	3
P2	159	175	713	944	1,07	169,54	0,13	0,40	0,25	0,06	0,20	21%	79%	7
P3	183	358	748	1692	3,07	561,20	0,40	0,71	0,57	0,21	0,36	36%	64%	12
P4-HT	36	394	230	1922	3,93	141,41	0,71	0,73	0,72	0,41	0,31	57%	43%	13
P4-RF	-	> 394	625	2547	3,03	626,95	0,71	0,56	0,68	0,41	0,27	61%	39%	>13

Graus dias (GD) e graus dias acumulados (GDA) calculados com uma temperatura base de 22°C;

HT - época de colheita;

RF - Período de reserva de forragem, mantendo a cultura no campo;

I, F e M - valores inicial, final e médio do coeficiente da cultura (K_c) por fenofase, respectivamente;

K_{cb}, K_e, fT e fE - coeficiente da cultura basal, coeficiente de evaporação do solo, fração da transpiração e fração evaporação, respectivamente;

NTC - número total de cladódios.

No segundo ciclo produtivo, o número de fenofases variou de acordo com o clone, sendo verificada quatro fenofases nas espécies OEA (Fig. 11A), IPA (Fig. 11B), F8 (Fig. 11C), e MIU (Fig. 11E), e três fenofases em V19 (Fig. 11D) e OEM (Fig. 11F). A duração de cada fenofase e o NTC são mostrados na Tabela 10. A P1 foi a fenofase de menor duração, exceto no clone MIU, que apresentou P4 curta (28 dias). Nos demais, a P1 atingiu valores variando de 1 a 37 dias. A fenofase P3 foi a mais duradoura nos clones OEA, F8 e IPA, alcançando 232 dias (988 °Cdia), 46 dias (221 °Cdia) e 116 dias (358

°Cdia), respectivamente. Por outro lado, nas espécies MIU, V19 e OEM, a P2 foi a fenofase de maior duração, com 149 dias (842 °Cdia), 224 dias (941 °Cdia) e 191 dias (715 °Cdia), respectivamente.

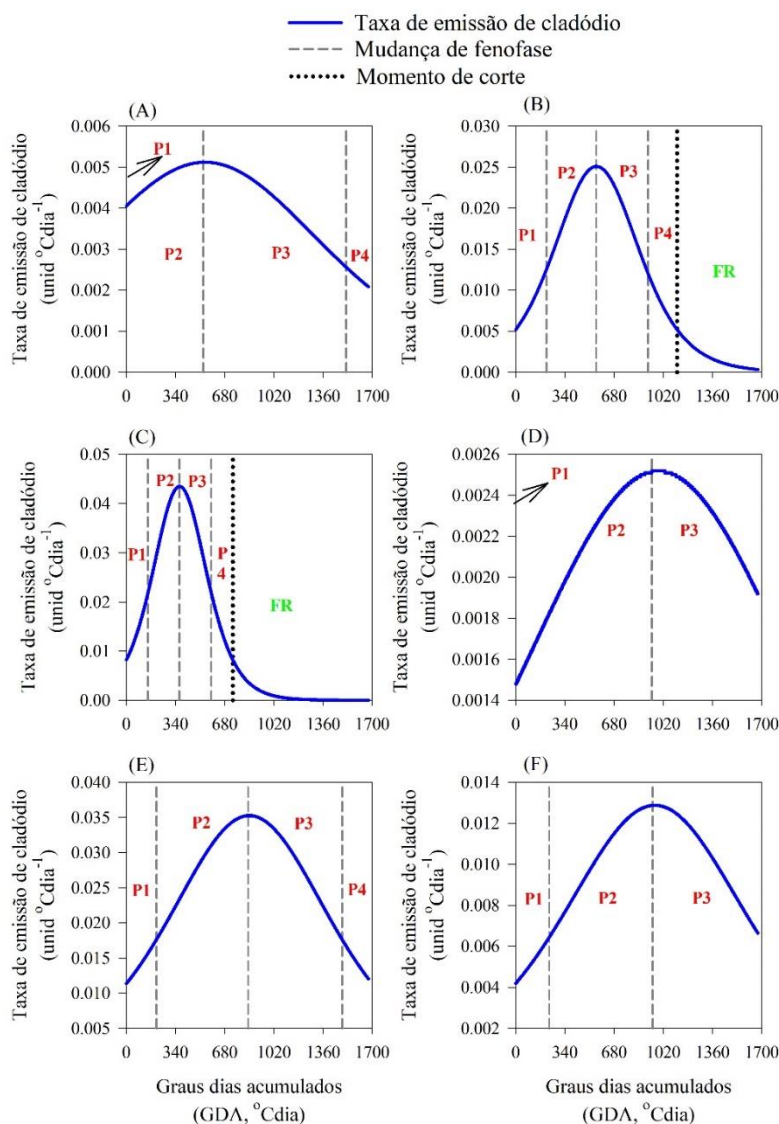


Figura 11. Taxa de emissão de cladódio e estágios fenológicos de clones de palma forrageira em função dos graus dias acumulados. P1, P2, P3, P4 e FR correspondem a fenofase 1, 2, 3, 4 e reserva de forragem, respectivamente. (A) Orelha de Elefante Africana; (B) IPA Sertânia; (C) F8; (D) V19; (E) Miúda e (F) Orelha de Elefante Mexicana.

Não houve HT para os clones V19 e OEM, que ao final do experimento estavam na fenofase P3. Em contrapartida, a HT foi verificada nos clones IPA e F8 (Fig. 11B e C), podendo ser colhidos aos 145 dias (737 °Cdia) e 265 dias (1116 °Cdia), respectivamente. Os clones OEA (Fig. 11A) e MIU (Fig. 11E) finalizaram o período experimental quando a fenofase P4 estava no início e, portanto, não atingiram o HT.

Tabela 10. Duração, graus-dia acumulados, evapotranspiração média diária e acumulada e coeficiente de cultura por fenofase de clones de palma forrageira, durante a safra 2019-2020

Fenofases	Dur.	Dur. acum.	GD	GDA	ET _c	ΣET _c	K _c			K _{cb}	K _e	fT	fE	NTC
	dias	°Cdia	mm dia ⁻¹	mm	mm	I	F	M					Unids.	
Orelha de Elefante Africana														
P1	1	1	1	1	5,91	5,91	0,64	0,64	0,64	0,02	0,62	3%	97%	4
P2	95	96	531	532	5,37	504,60	0,64	0,75	0,70	0,05	0,65	7%	93%	7
P3	232	328	988	1520	4,54	1053,73	0,75	0,53	0,69	0,21	0,48	31%	69%	11
P4	23	351	154	1674	6,21	142,73	0,52	0,48	0,50	0,29	0,21	59%	41%	11
F8														
P1	24	24	149	149	3,24	77,71	0,51	0,59	0,55	0,00	0,55	0%	100%	4
P2	37	61	218	367	3,73	138,14	0,59	0,72	0,66	0,00	0,65	0%	100%	12
P3	46	107	221	588	3,56	163,64	0,72	0,85	0,79	0,02	0,77	2%	98%	19
P4-HT	38	145	149	737	3,35	127,18	0,85	0,92	0,89	0,07	0,81	8%	92%	22
P4-RF	-	>145	935	1672	3,76	771,67	0,92	0,51	0,80	0,23	0,57	30%	70%	>22
Miúda														
P1	33	33	209	209	3,58	118,09	0,55	0,64	0,59	0,02	0,58	3%	97%	9
P2	149	182	633	842	3,28	489,40	0,64	0,87	0,80	0,13	0,67	15%	85%	26
P3	140	322	650	1492	3,89	544,39	0,87	0,63	0,78	0,37	0,41	48%	52%	45
P4	28	350	182	1674	3,63	101,68	0,63	0,55	0,59	0,44	0,15	75%	25%	47
IPA Sertânia														
P1	34	34	213	213	4,08	138,56	0,63	0,72	0,68	0,03	0,65	4%	96%	4
P2	66	100	344	557	3,84	253,75	0,72	0,84	0,78	0,05	0,73	6%	94%	11
P3	116	216	358	915	3,01	348,76	0,84	0,81	0,85	0,10	0,75	11%	89%	18
P4-HT	49	265	201	1116	3,75	183,91	0,81	0,72	0,77	0,12	0,65	16%	84%	20
P4-RF	-	>165	558	1674	3,40	401,78	0,71	0,40	0,56	0,16	0,41	29%	71%	>20
V19														
P1	1	1	1	1	2,61	2,61	0,44	0,44	0,44	0,01	0,43	3%	97%	2
P2	224	225	940	941	3,20	716,92	0,45	0,89	0,76	0,09	0,68	10%	90%	4
P3	125	350	733	1674	4,17	521,38	0,89	0,53	0,73	0,18	0,56	25%	75%	6
Orelha de Elefante Mexicana														
P1	37	37	232	232	3,50	129,37	0,53	0,65	0,59	0,03	0,56	4%	96%	4
P2	191	228	715	947	3,35	638,98	0,65	0,87	0,83	0,16	0,68	18%	82%	11
P3	123	351	727	1674	4,25	522,32	0,87	0,57	0,74	0,33	0,41	46%	54%	19

Graus dias (GD) e graus dias acumulados (GDA) calculados com uma temperatura base de 22°C;

HT - época de colheita;

RF - Período de reserva de forragem, mantendo a cultura no campo;

I, F e M – valores inicial, final e médio do coeficiente da cultura (K_c) por fenofase, respectivamente;

K_{cb}, K_e, fT e fE – coeficiente da cultura basal, coeficiente de evaporação do solo, fração da transpiração e fração evaporação, respectivamente;

NTC – número total de cladódios.

3.3. Evapotranspiração e coeficientes da cultura

Os valores diários e acumulados de evapotranspiração da cultura (ET_c) e os coeficientes de cultivo (K_c, K_{cb} e K_e) por fenofases dos clones de palma do experimento I do Sítio I são apresentados na Tabela 6 e Figura 12. A ET_c variou com base no regime hídrico, demanda atmosférica e crescimento da cultura. Em termos diários, a ET_c apresentou maior intensidade durante setembro de 2012, e janeiro, fevereiro e setembro de 2013, períodos no qual a demanda atmosférica foi elevada, com média de 6,09 mm dia⁻¹, e a ocorrência de precipitação pluvial (60 mm) e, ou aplicação de água via irrigação (50 mm) foram altas (Fig. 12A). Em média, os valores máximos observados para OEM,

MIU e IPA foram iguais a 4,88 mm, 4,9 mm e 4,9 mm, respectivamente. A ET_c mais baixa ocorreu no início e final do ciclo produtivo, com valores médio similares entre os clones ($1,8 \text{ mm dia}^{-1}$) (Fig. 12A). Semelhante a ET_c , os maiores valores de K_c foram observados em setembro de 2012 (OEM = 0,7, MIU = 0,7 e IPA = 0,71) e janeiro (OEM = 0,9, MIU = 1,2 e IPA = 1,1), fevereiro (OEM = 0,9, MIU = 0,9 e IPA = 1,0) e setembro de 2013, no qual os clones apresentaram valor máximo igual a 0,8. Já os menores K_c foram observados no início e final do ciclo, com valores médios entre os clones iguais a 0,15 e 0,20, respectivamente (Fig. 12B).

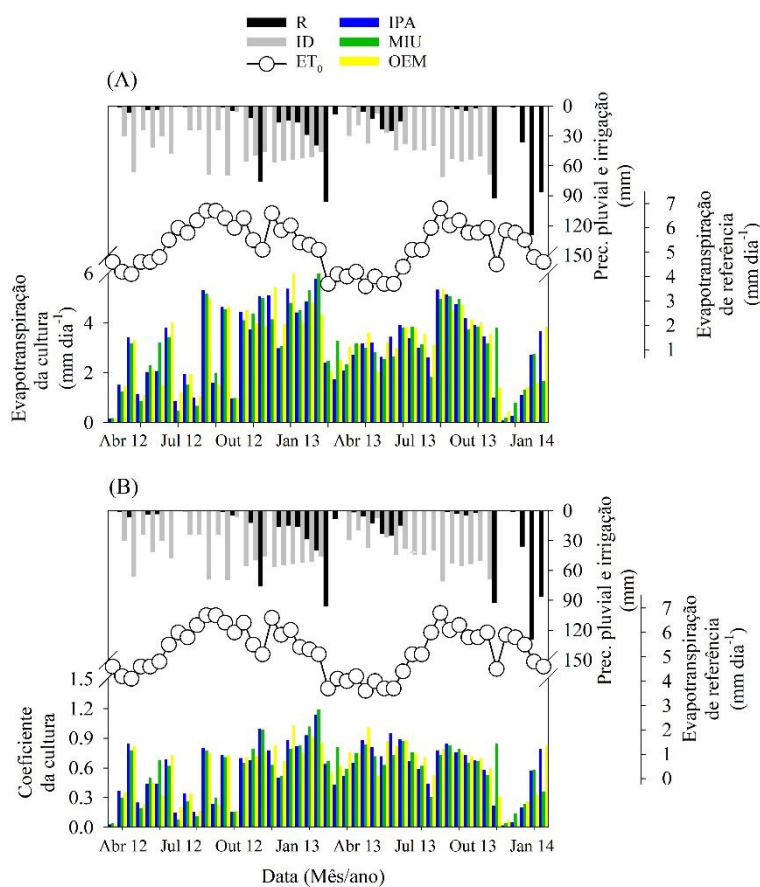


Figura 12. Evapotranspiração da cultura (A) e coeficiente de cultivo de clones de palma forrageira (B) durante a safra 2012-2014

Na fenofase P1 a ET_c diária foi igual a 2,10, 2,23 e 1,98 mm para IPA, MIU e OEM, respectivamente, com valores acumulados de 561 mm, 670 mm e 515 mm (Tabela 6). Durante a P2 observou-se ET_c de $4,04 \text{ mm dia}^{-1}$ para a IPA, $4,02 \text{ mm dia}^{-1}$ para a MIU e $4,08 \text{ mm dia}^{-1}$ para a OEM, sendo a ET_c acumulada igual a 392 mm, 411 mm e 506 mm, respectivamente. A ET_c na P3 foi de $3,39 \text{ mm dia}^{-1}$, $3,47 \text{ mm dia}^{-1}$ e $3,43 \text{ mm dia}^{-1}$ para IPA, MIU e OEM, nessa ordem, que acumularam 679, 638 e 793 mm, respectivamente.

Na P4-HT o valor médio da ET_c foi de $2,03 \text{ mm dia}^{-1}$ para a IPA, $1,40 \text{ mm dia}^{-1}$ para a MIU e $1,23 \text{ mm dia}^{-1}$ para o clone OEM, acumulando 519, 487 e 391 mm, respectivamente. No período posterior, denominado de reserva forrageira (P4-RF), os valores médios de ET_c diária e acumulada diminuíram para $0,39 \text{ mm dia}^{-1}$, $0,14 \text{ mm dia}^{-1}$ e $0,09 \text{ mm dia}^{-1}$, 80 mm, 19 mm e 22 mm para os clones IPA, MIU e OEM, nessa ordem.

A partir do ajuste do K_c em função dos graus dias acumulados (GDA, °Cdia) observou-se a mesma tendência entre os clones estudados (Fig. 13). Ao analisar por fenofase, os valores de K_c inicial, médio e final variaram conforme a sua duração, que por sua vez apresentou pequenas variações entre as espécies (Tabela 6). Em média, o K_c dos clones IPA, MIU e OEM foi de 0,45, 0,44 e 0,41, respectivamente. Em se tratando do coeficiente de cultivo duplo, verificou-se que o K_e no clone IPA foi sempre superior ao K_{cb} , com a diferença entre os valores diminuindo com o passar das fenofases. Por outro lado, para a MIU e OEM o K_e foi elevado durante as fases iniciais de desenvolvimento da cultura, com posterior aumento do K_{cb} até o final do ciclo produtivo.

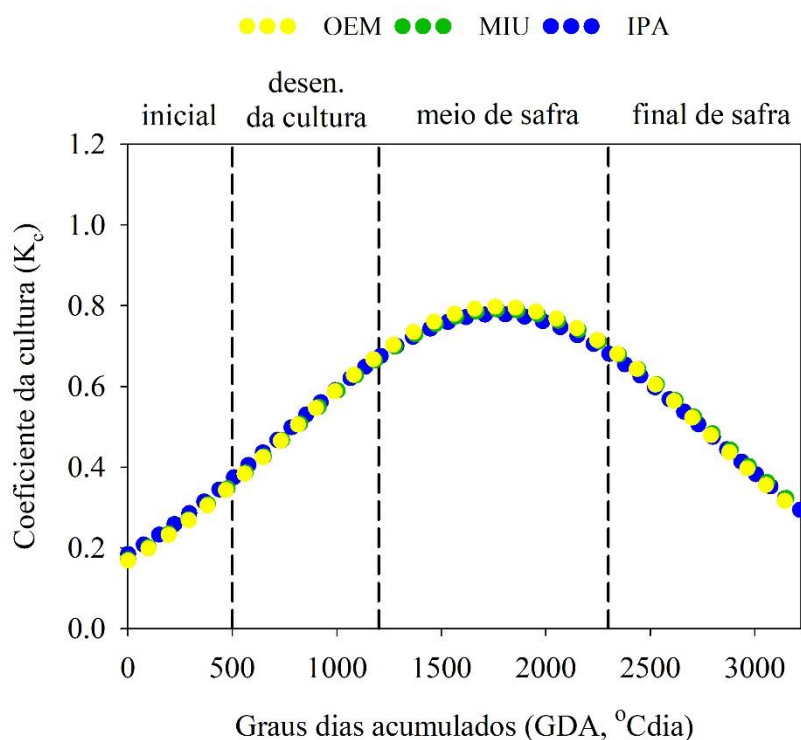


Figura 13. Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado para os clones IPA Sertânia (IPA), Miúda (MIU) e Orelha de Elefante Mexicana (OEM), em função dos graus dias acumulados (GDA).

Em se tratando do experimento I do Sítio II durante o primeiro ciclo produtivo, considerando o regime hídrico de $120\%ET_c$, verificou-se maior intensidade da ET_c diária durante o ano de 2017, sendo os maiores valores observados no início (janeiro e fevereiro) e meio (setembro a novembro) da safra, períodos no qual a ET_0 estava alta e a irrigação e a ocorrência de chuvas foram frequentes (Fig. 14A). Vale ressaltar que nesse experimento não foi realizado o corte de uniformização das plantas para o início do período experimental, o que explica a alta intensidade da ET_c no começo do ciclo. Em média, os maiores valores observados foram $4,05 \text{ mm dia}^{-1}$, $4,00 \text{ mm dia}^{-1}$ e $4,02 \text{ mm dia}^{-1}$ para os clones MIU, OEM e IPA, respectivamente. As menores ET_c foram observadas durante o mês de abril de 2017, quando a ET_0 foi bem inferior à média verificada ao longo do ciclo ($4,74 \text{ mm dia}^{-1}$), com média de $2,00 \text{ mm dia}^{-1}$ entre as espécies. Durante o ano de 2018 observou-se pouca variação da ET_c ao longo do tempo e entre os clones estudado, com valor médio de $2,2 \text{ mm dia}^{-1}$. Assim como a ET_c , os valores de K_c foram maiores no período de maior demanda atmosférica, com pouca variação entre os clones, que por sua vez, apresentaram média igual a 0,60 (Fig. 14B). Todavia, no início do período experimental, o clone OEM mostrou valor de K_c igual a 0,52, sendo esse superior aos observados em MIU (0,44) e IPA (0,45) (Fig. 14B). Os menores valores, verificados no final do ciclo, apresentaram média igual a 0,40 entre as espécies.

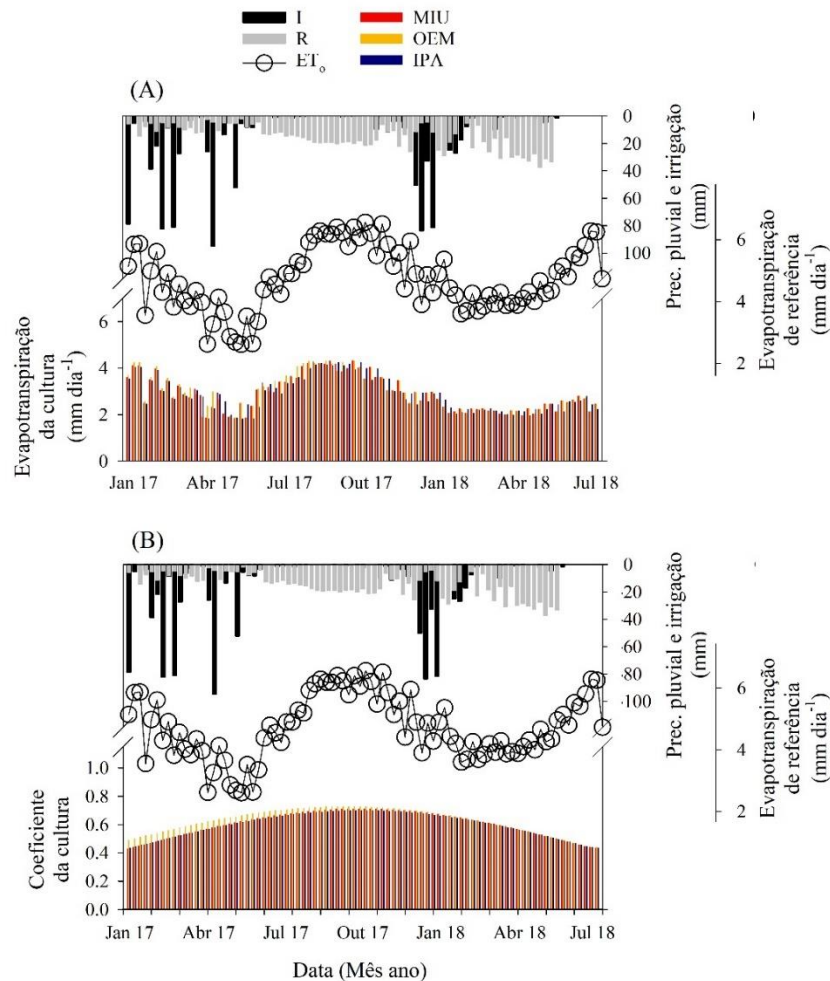


Figura 14. Evapotranspiração da cultura (A) e coeficiente de cultivo de clones de palma forrageira (B) durante a safra 2019-2020.

Ao considerar as fenofases, os valores diários de ET_c dos clones OEM, MIU e IPA variaram de 2,49 a 4,58 mm dia^{-1} , 1,72 a 4,13 mm dia^{-1} e 2,21 a 4,08 mm dia^{-1} , respectivamente (Tabela 7). A ET_c acumulada foi maior nas fenofases mais duradouras, com valores iguais a 1721 mm, 744 mm e 588 mm para os clones OEM, MIU e IPA, nessa ordem. O K_c variou conforme as fenofases, que por sua vez, tiveram duração distintas entre os clones estudados. Em média, o valor de K_c para OEM, MIU e IPA foi 0,63, 0,60 e 0,59, respectivamente. A variação do K_c ao longo tempo é mostrada na Figura 15, onde o clone OEM apresentou maiores valores nas fases inicial e de desenvolvimento da cultura em relação aos clones MIU e IPA. A partir da fase de meio de safra até o final do ciclo, observou-se uma tendência similar entre as espécies. Em relação ao coeficiente de cultivo duplo, verificou-se que o clone OEM apresentou maior K_{cb} quando comparado ao K_e , que por sua vez, foi mais acentuado nos clones MIU e IPA, principalmente nas fases iniciais de desenvolvimento (i.e., P1 e P2).

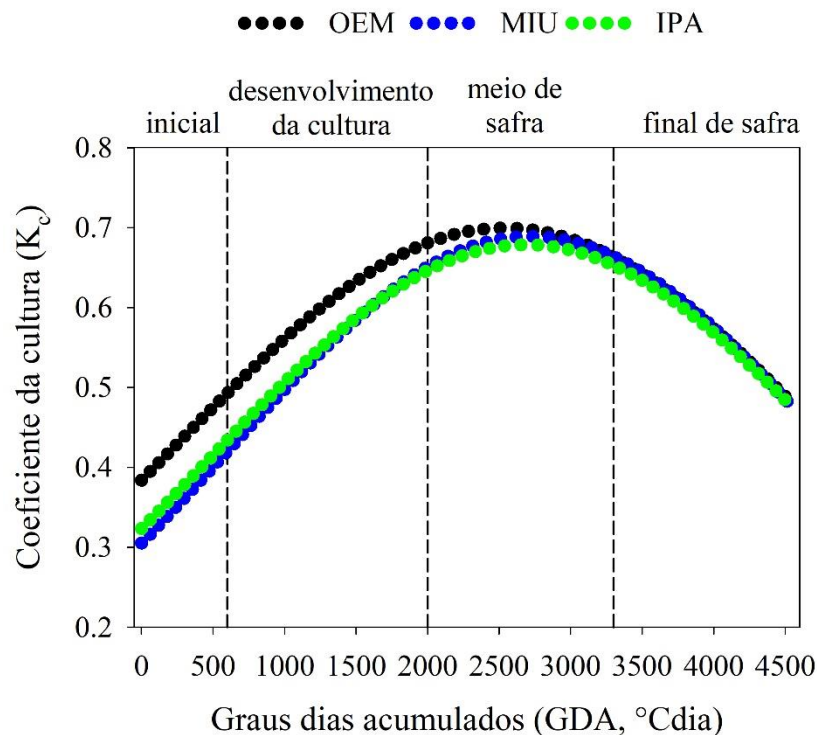


Figura 15. Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado para clones de palma forrageira em função dos graus dias acumulados (GDA), cultivados sob regime hídrico de $120\%ET_c$ durante a safra 2017-2018.

Durante o segundo ciclo produtivo, considerando o regime hídrico de $40\%ET_c$ (Fig. 16), verificou-se ET_c diárias elevadas a partir de outubro a dezembro de 2019, com valores chegando a $5,33 \text{ mm dia}^{-1}$ para a MIU, $5,12 \text{ mm dia}^{-1}$ para a OEM e $5,39 \text{ mm dia}^{-1}$ para a IPA (Fig. 16A). Em maio de 2020, no final do período experimental, foram verificadas as menores intensidades de ET_c , com valores iguais a 0,34, 0,40 e 0,33 para os clones MIU, OEM e IPA, nessa ordem. Comportamento semelhante foi observado para o K_c (Fig. 16B), sendo o período de outubro a dezembro de 2019 responsável pelos maiores valores (MIU = 0,80, OEM = 0,77 e IPA = 0,82), enquanto no final do ciclo produtivo verificou-se os menores (MIU = 0,09, OEM = 0,10 e IPA = 0,09).

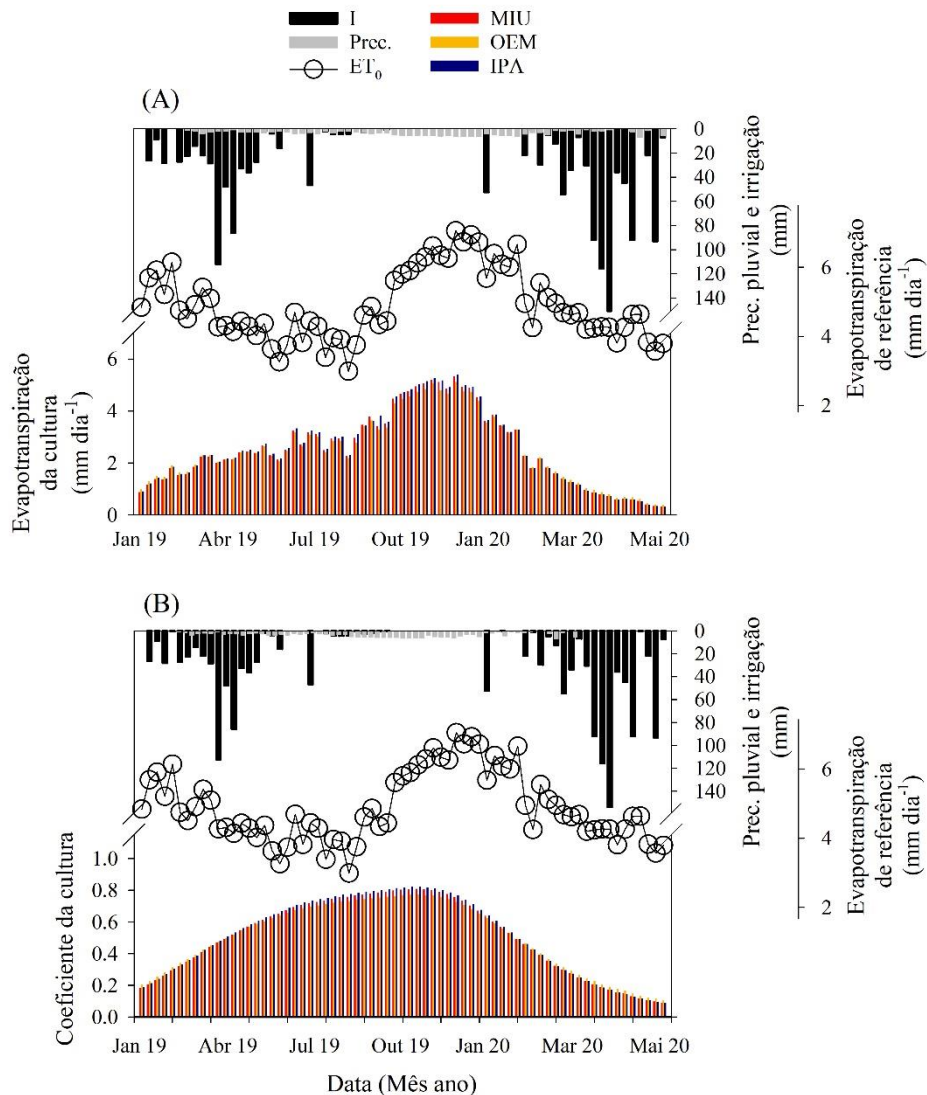


Figura 16. Evapotranspiração da cultura (A) e coeficiente de cultivo de clones de palma forrageira (B) durante a safra 2019-2020.

Os clones OEM, MIU e IPA apresentaram ET_c diária variando de 2,59 a 3,29 mm dia^{-1} , 2,50 a 3,30 mm dia^{-1} e 2,72 a 3,57 mm dia^{-1} , respectivamente, entre as fenofases (Tabela 8). Em termos cumulativos, observou-se maiores valores nas fenofases 1 e 4, devido as suas maiores durações. Nessas, a ET_c acumulada foi igual a 340 (P1) e 261 mm (P4) para a OEM, 333,76 e 270 mm para a MIU e 378 e 236,5 mm para a IPA. Os valores de K_c foram semelhantes entre os clones de palma ao longo do período estudado, com pouca variação nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura (Tabela 8 e Fig. 17). Na fase de médio desenvolvimento (Fig. 17), os clones MIU e IPA apresentaram K_c superiores ao clone OEM, com valores iguais a 0,82 e 0,84, respectivamente. Em média, o K_c para OEM, MIU e IPA sob regime de 40% da ET_c foi de 0,70, 0,71 e 0,74,

respectivamente, sendo superiores aos obtidos no ciclo anterior. O comportamento do K_{cb} e do K_c foi semelhante ao constatado no primeiro ciclo da cultura.

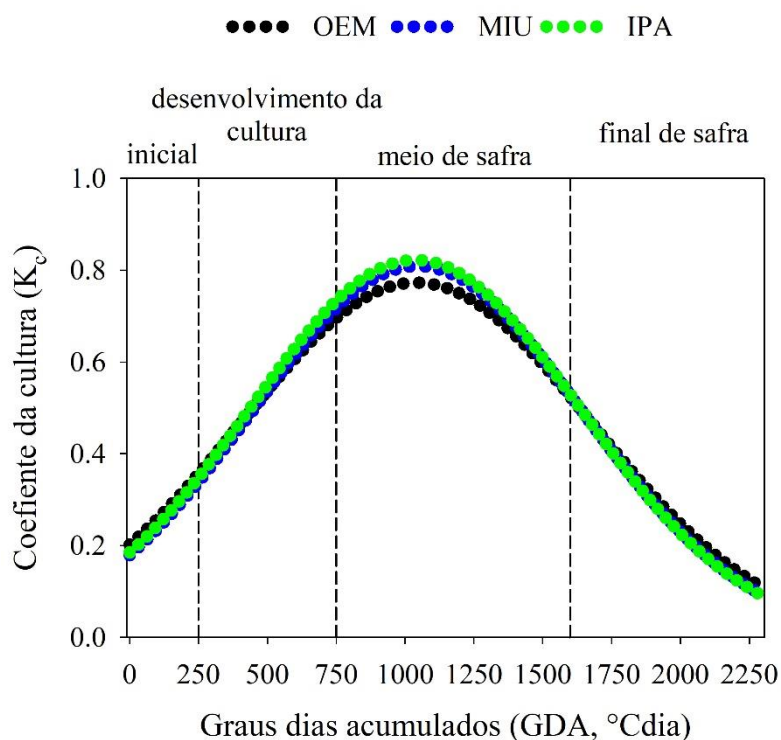


Figura 17. Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado para clones de palma forrageira em função dos graus dias acumulados (GDA), cultivados sob regime hídrico de 40% da ET_c durante a safra 2019-2020.

A variação da ET_c e do K_c dos clones de palma forrageira do experimento II no Sítio II durante o primeiro ciclo produtivo é mostrado na Figura 18. Os maiores valores de ET_c foram observados durante o período de setembro de 2017 até o início de janeiro de 2018, período caracterizado pela elevada demanda atmosférica e acelerada emissão de cladódios pelos clones (Fig. 18A). Em média, os maiores valores de ET_c foram $3,72 \text{ mm dia}^{-1}$, $3,49 \text{ mm dia}^{-1}$, $3,62 \text{ mm dia}^{-1}$, $4,02 \text{ mm dia}^{-1}$ e $3,50 \text{ mm dia}^{-1}$ para OEA, F8, MIU, IPA, V19 e OEM, nessa ordem. Já os menores valores foram verificados no início do período experimental, com média igual a $1,00 \text{ mm dia}^{-1}$, $1,04 \text{ mm dia}^{-1}$, $1,36 \text{ mm dia}^{-1}$, $1,20 \text{ mm dia}^{-1}$, $0,99 \text{ mm dia}^{-1}$ e $0,91 \text{ mm dia}^{-1}$ para os clones OEA, F8, MIU, IPA, V19 e OEM, respectivamente.

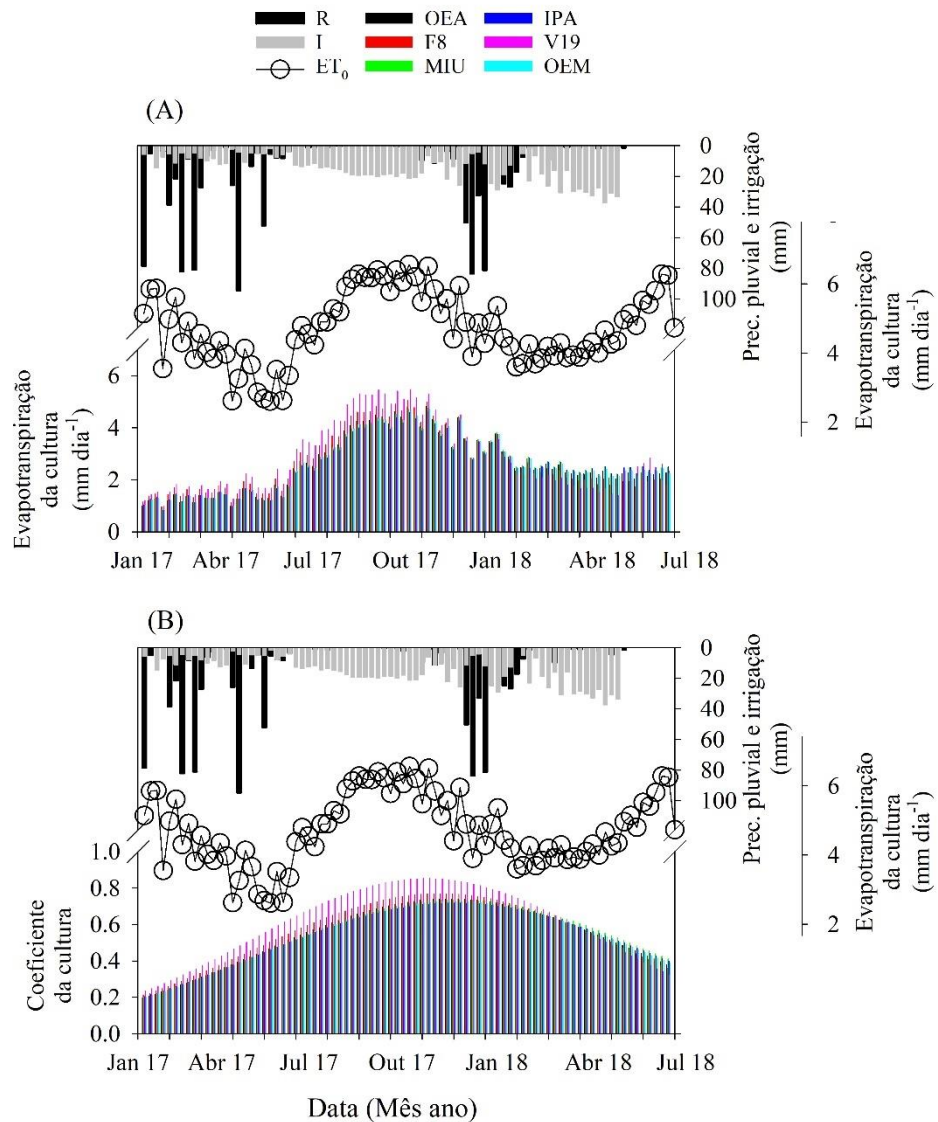


Figura 18. Evapotranspiração da cultura (A) e coeficiente de cultivo dos clones de palma forrageira (B) durante a safra 2017-2018.

Em termos de K_c , observou-se a mesma tendência da ET_c , com menores valores na fase inicial do desenvolvimento da cultura, e maiores durante o período de maior demanda atmosférica e maior taxa de emissão de cladódios (Fig. 18B). O menor valor de K_c foi semelhante entre os clones, igual a 0,2. Por outro lado, os maiores K_c variaram entre as espécies, com valores iguais a 0,64, 0,54, 0,68, 0,66, 0,73 e 0,52 para OEA, F8, MIU, IPA, V19 e OEM, nessa ordem (Fig. 18B).

Com base nas fenofases, observou-se menores valores de ET_c diária e acumulada nas fases iniciais de desenvolvimento (i.e., P1 e P2) (Tabela 9). Uma tendência de aumento foi verificada até o momento de colheita (P4-HT), com redução na fase subsequente (P4-RF) nas espécies do gênero *Opuntia*. Nas espécies MIU e IPA verificou-se aumento da ET_c até a fenofase 3, com posterior redução nas fases P4-HT e P4-RF. Em

média, os valores de ET_c diária variaram de 0,76 a 3,66 mm dia^{-1} para a OEA; 0,89 a 4,44 mm dia^{-1} para a F8; 0,87 a 4,19 mm dia^{-1} para a MIU; 0,86 a 3,97 mm dia^{-1} para a IPA; 0,76 a 4,18 mm dia^{-1} para a V19 e 0,76 a 3,93 mm dia^{-1} para o clone OEM.

A Figura 19 mostra mesma tendência entre os K_c dos clones ao longo do tempo. Observou-se que os valores de K_c inicial, médio e final variaram conforme as fenofases, que por sua vez, apresentaram duração variável conforme os clones analisados (Tabela 9). Tendência semelhante foi verificada para o K_{cb} e K_e . Os valores médios de K_c para os clones OEA, F8, MIU, IPA, V19 e OEM foram iguais a 0,50, 0,48, 0,52, 0,51, 0,54 e 0,47, respectivamente.

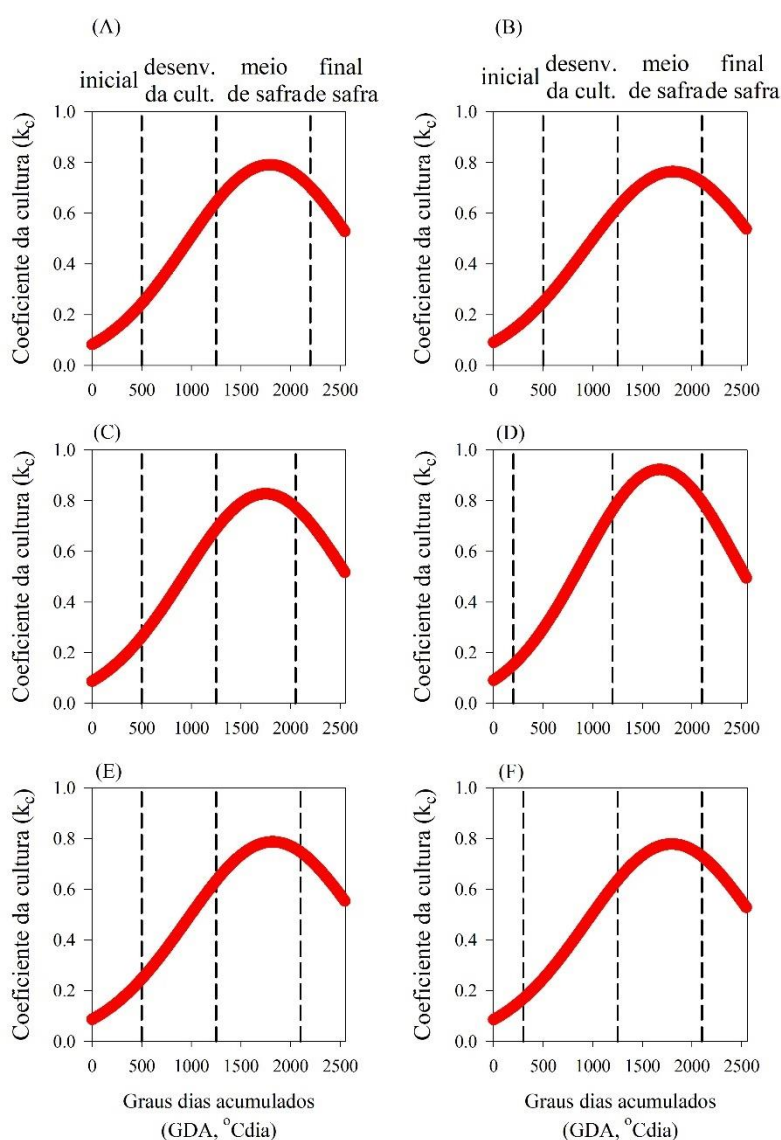


Figura 19. Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado para os clones (A) Orelha de Elefante Africana; (B) IPA Sertânia; (C) F8; (D) V19; (E) Miúda e (F) Orelha de Elefante Mexicana, em função dos graus dias acumulados.

Durante o segundo ciclo produtivo da cultura (2019-2020), as maiores intensidades da ET_c diária foram observadas entre os meses de setembro de 2019 a janeiro de 2020, período no qual a ET_0 superou os 6 mm dia^{-1} frequentemente (Fig. 20A). Após esse período, houve uma redução significativa da ET_c em decorrência da menor demanda atmosférica, aumento dos níveis pluviométricos e da redução da taxa de emissão de cladódio da cultura. Os maiores valores de ET_c observados foram $4,84 \text{ mm dia}^{-1}$, $5,89 \text{ mm dia}^{-1}$, $5,66 \text{ mm dia}^{-1}$, $5,32 \text{ mm dia}^{-1}$, $6,10 \text{ mm dia}^{-1}$ e $6,12 \text{ mm dia}^{-1}$ para OEA, F8, MIU, IPA, V19 e OEM, nessa ordem. Os valores de K_c apresentaram tendência semelhante ao comportamento da ET_c (Fig. 20B). No período de setembro de 2019 a janeiro de 2020 os maiores valores de K_c foram 0,75, 0,90, 0,85, 0,83, 0,91 e 0,91 para os clones OEA, F8, MIU, IPA, V19 e OEM, respectivamente, enquanto no período subsequente verificou-se K_c iguais a 0,28, 0,21, 0,26, 0,26, 0,19 e 0,24 para OEA, F8, MIU, IPA, V19 e OEM, nessa ordem, sendo os menores observados ao longo do ciclo.

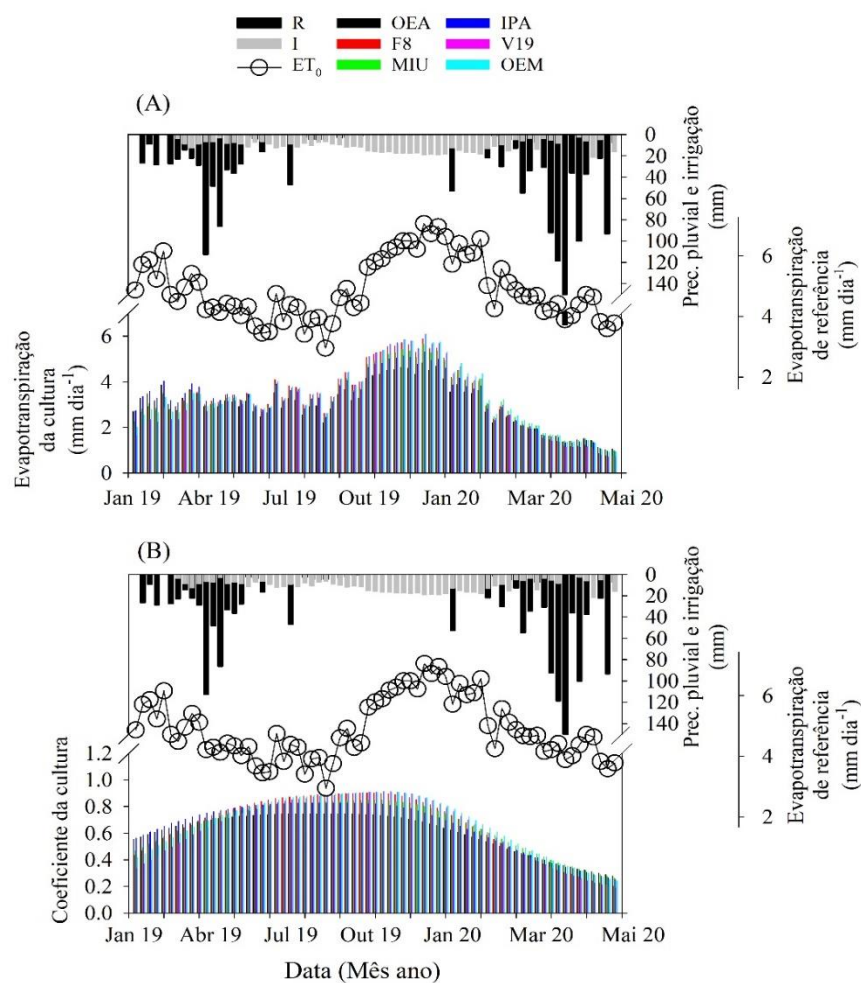


Figura 20. Evapotranspiração da cultura (A) e coeficiente de cultivo de clones de palma forrageira (B) durante a safra 2019-2020.

Na Tabela 10 é possível observar pouca variação da ET_c diária entre as fenofases. Contudo, ao considerar a ET_c acumulada observou-se maiores valores durante as fenofases de maior duração. Os valores de K_c inicial, médio e final foram superiores aos obtidos no ciclo anterior, com média de 0,63, 0,72, 0,69, 0,77, 0,64 e 0,72 para os clones OEA, F8, MIU, IPA, V19 e OEM, respectivamente. O K_c foi mais acentuado do que o K_{cb} durante maior parte do ciclo (Tabela 10). Apenas os clones MIU e OEA apresentaram K_{cb} superiores, ocorrendo na fenofase 4, o que pode ser atribuído a quantidade e tamanho dos cladódios, respectivamente, ao fim do ciclo produtivo. A partir do ajuste da curva do K_c (Fig. 21) observou-se variação entre os clones, principalmente na fase em que a cultura estava em meio de safra, o que pode estar relacionado a quantidade e duração das fenofases, que foi diferente entre as espécies estudadas.

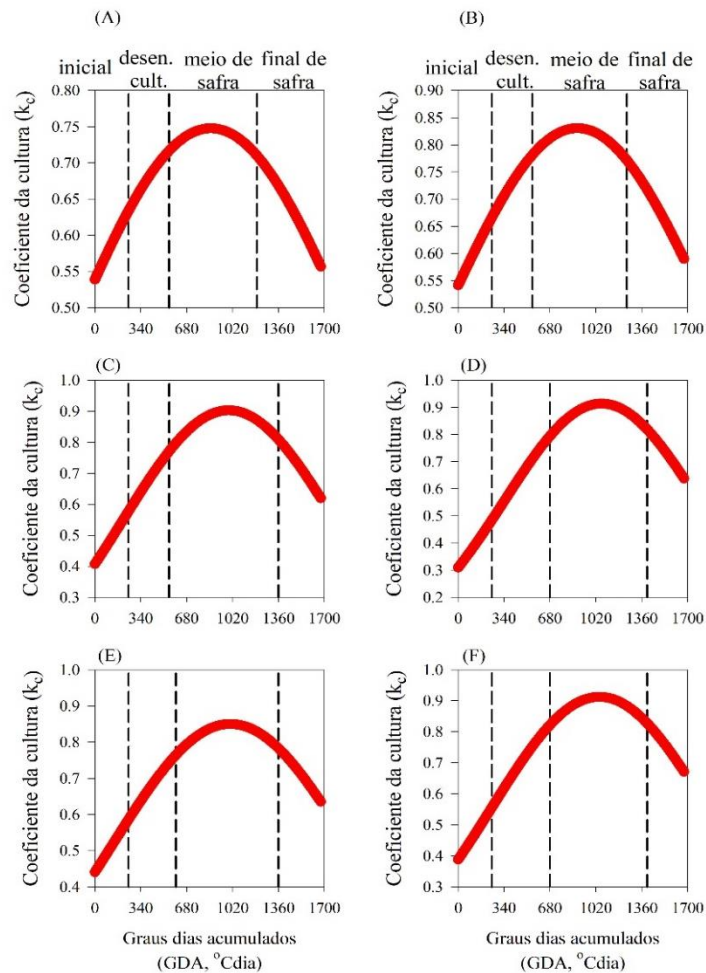


Figura 21. Coeficiente de cultivo (K_c) ajustado para os clones (A) Orelha de Elefante Africana; (B) IPA Sertânia; (C) F8; (D) V19; (E) Miúda e (F) Orelha de Elefante Mexicana, em função dos graus dias acumulados.

3.4. Eficiência no uso da água

Na Tabela 11 são apresentados os indicadores de eficiência do uso da água dos clones de palma forrageira conduzidos no Sítio I, durante o período de 2012 a 2014. Não houve diferença significativa entre os clones estudados ($p > 0,05$). Em média, a produtividade da água da cultura (PA_c) e da irrigação (PA_i), e as produtividades econômica da água da cultura (PEA_c) e da irrigação (PEA_i) foram iguais a $5,43 \text{ kg m}^{-3}$, $6,75 \text{ kg m}^{-3}$, $1,48 \text{ US\$ m}^{-3}$ e $1,83 \text{ US\$ m}^{-3}$, respectivamente.

Tabela 11. Indicadores de eficiência do uso da água de clones de palma forrageira submetidos a irrigação em ambiente semiárido

Fonte de variação	Valor - p			
	PA_c	PA_i	PEA_c	PEA_i
Clones (CL)	0,1361	0,1357	0,1456	0,1482
Clones	Média			
	PA_c	PA_i	PEA_c	PEA_i
IPA	5,16	6,41	1,29	1,60
MIU	3,65	4,55	0,91	1,13
OEM	7,46	9,29	2,23	2,77

Nota: valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,01$).

Os asteriscos (**) denotam significância de 0,01.

PA_c – produtividade de água da cultura (kg m^{-3}); PA_i – produtividade de água para irrigação (kg m^{-3}); PEA_c - produtividade econômica da água de cultivo (USD m^{-3}), e PEA_i - produtividade econômica da água de irrigação (USD m^{-3}), considerando o rendimento em matéria fresca.

Para os clones estudados no primeiro experimento do Sítio II, durante os ciclos produtivos 2017-2018 e 2019-2020, observou-se efeito significativo ($p < 0,05$) das espécies sobre os indicadores de eficiência do uso da água (Tabela 12). No ciclo I, quando foi considerado o regime hídrico de $120\%ET_c$, os clones OEM e MIU apresentaram as maiores eficiências em relação ao clone IPA ($p < 0,05$). Em média, os valores apresentados por esses clones foram $119,89 \text{ kg m}^{-3}$, $28,37 \text{ kg m}^{-3}$, $3,33 \text{ US\$ m}^{-3}$ e $0,79 \text{ US\$ m}^{-3}$ para PA_c , PA_i , PEA_c e PEA_i , nessa ordem. Já a espécie IPA apresentou PA_c igual a $35,59 \text{ kg m}^{-3}$, PA_i igual a $8,40 \text{ kg m}^{-3}$, PEA_c de $0,99 \text{ US\$ m}^{-3}$ e PEA_i de $0,24 \text{ US\$ m}^{-3}$. Durante o segundo ciclo, sob regime de $40\%ET_c$, o clone OEM apresentou eficiência superior a 332% para a PA_c , 323% para PA_i , 117% para PEA_c e 323% para a PEA_i em relação aos demais clones, que por sua vez, não diferiram entre si ($p > 0,05$) (Tabela 12).

Tabela 12. Indicadores de eficiência do uso da água de clones de palma forrageira submetidos a diferentes regimes hídricos em ambiente semiárido

	Ciclo 2017-2018				Ciclo 2019-2020			
Fonte de variação	Valor - p				Valor - p			
	PA _c	PA _i	PEA _c	PEA _i	PA _c	PA _i	PEA _c	PEA _i
Clones (C)	0,0247*	0,0237*	0,0248*	0,0238*	0,001**	0,001**	0,001**	0,001**
Clones	Média				Média			
	PA _c	PA _i	PEA _c	PEA _i	PA _c	PA _i	PEA _c	PEA _i
OEM	133,38a	31,71a	3,70a	0,88a	210,99a	160,02a	5,86a	4,45a
MIU	106,40a	25,03a	2,95a	0,70a	38,50b	29,58b	1,07b	0,82b
IPA	35,59b	8,40b	0,99b	0,24b	59,04b	46,07b	1,63b	1,28b

Nota: valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,01$).

Os asteriscos (**) denotam significância de 0,01.

PA_c – produtividade de água da cultura (kg m^{-3}); PA_i – produtividade de água para irrigação (kg m^{-3}); PEA_c - produtividade econômica da água de cultivo (USD m^{-3}), e PEA_i - produtividade econômica da água de irrigação (USD m^{-3}), considerando o rendimento em matéria fresca.

No experimento II do Sítio I, durante os dois ciclos produtivos, observou-se efeito dos clones sobre os indicadores (Tabela 13). No primeiro ciclo, os clones OEA, V19 e OEM apresentaram as maiores eficiências em termos de PA_c, PA_i, PEA_c e PEA_i, com valores médios de $164,95 \text{ kg m}^{-3}$, $30,14 \text{ kg m}^{-3}$, $4,58 \text{ US\$ m}^{-3}$ e $0,84 \text{ US\$ m}^{-3}$, nessa ordem. No segundo ciclo produtivo, as maiores eficiências foram verificadas para os clones OEA e OEM, com valores médios iguais a $246,71 \text{ kg m}^{-3}$, $74,06 \text{ kg m}^{-3}$, $6,78 \text{ US\$ m}^{-3}$ e $2,03 \text{ US\$ m}^{-3}$ para PA_c, PA_i, PEA_c e PEA_i, respectivamente. Os demais clones não diferiram entre si ($p > 0,05$), apresentando médias de PA_c, PA_i, PEA_c e PEA_i iguais a $58,02 \text{ kg m}^{-3}$, $17,74 \text{ kg m}^{-3}$, $1,59 \text{ US\$ m}^{-3}$ e $0,48 \text{ US\$ m}^{-3}$, nessa ordem.

Tabela 13. Indicadores de eficiência do uso da água de clones de palma forrageira submetidos irrigação em ambiente semiárido

	Ciclo 2017-2018				Ciclo 2019-2020			
Fonte de variação	Valor - p				Valor - p			
	PA _c	PA _i	PEA _c	PEA _i	PA _c	PA _i	PEA _c	PEA _i
Clones (C)	<0,001**	<0,001**	<0,001**	<0,001**	0,0490*	0,047*	0,049*	0,046*
Clones	Média				Média			
	PA _c	PA _i	PEA _c	PEA _i	PA _c	PA _i	PEA _c	PEA _i
OEA	149,27a	26,97a	4,15a	0,75a	216,91a	61,53a	5,96a	1,69a
F8	12,48b	2,26b	0,35b	0,06b	6,57b	2,04b	0,18b	0,05b
MIU	64,18b	11,65b	1,78b	0,32b	72,07b	22,32b	1,98b	0,61b
IPA	25,51b	4,66b	0,71b	0,13b	71,02b	21,63b	1,95b	0,59b
V19	180,72a	33,59a	5,02a	0,93a	82,45b	24,98b	2,26b	0,68b
OEM	164,86a	29,87a	4,58a	0,83a	276,51a	86,59a	7,60a	2,38a

Nota: valores médios seguidos da mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,01$). Os asteriscos (**) denotam significância de 0,01.

PA_c – produtividade de água da cultura (kg m^{-3}); PA_i – produtividade de água para irrigação (kg m^{-3}); PEA_c - produtividade econômica da água de cultivo (USD m^{-3}), e PEA_i - produtividade econômica da água de irrigação (USD m^{-3}), considerando o rendimento em matéria fresca.

4. DISCUSSÃO

4.1. Produtividade da cultura

As particularidades morfológicas apresentadas pelos clones de palma forrageira determinam suas respostas produtivas ao ambiente de cultivo (BARBOSA et al., 2018; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021b). De um modo geral, nossos resultados mostraram que os clones do gênero *Opuntia* apresentaram melhor desempenho produtivo em relação às espécies do gênero *Nopalea*. Características como elevada eficiência no uso da água (GARCÍA-NAVA et al., 2015), maior área do cladódio (SILVA et al., 2014a, 2015) e taxa de acúmulo de forragem mais acelerada (ROCHA et al., 2017; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021c) favorecem um maior rendimento dessas cactáceas. Além disso, cactos *Nopalea* têm maior dificuldade de adaptação ao ambiente de cultivo, apresentando elevada mortalidade quando comparados a *Opuntia*, o que pode determinar o baixo rendimento ao final da safra (SILVA et al., 2015; JARDIM et al., 2021). Araújo Júnior et al. (2021a) afirmaram que a taxa média de mortalidade dos clones IPA e MIU em condições irrigadas pode chegar a 59%, mais que o dobro apresentado pelo clone OEM (28%). Contudo, com o estande já estabilizado e sob irrigação complementar, plantas do gênero *Nopalea* podem apresentar rendimentos semelhantes às plantas do gênero *Opuntia*

(FREIRE et al., 2018), como verificado para DMY no experimento II durante o primeiro ciclo produtivo.

Os diferentes regimes hídricos não afetaram a produtividade da cultura durante os dois ciclos produtivos do experimento I no Sítio II. Apesar disso, os regimes de 120%ET_c e 40%ET_c no primeiro e segundo ciclo, respectivamente, favoreceram maiores rendimentos em FMY aos clones estudados. A ausência de efeito significativo dos regimes hídricos sobre o rendimento dos clones pode estar associada a quantidade e distribuição da precipitação pluvial ao longo dos períodos experimentais (1002,5 mm durante 18 meses do ciclo I e 1665,8 mm durante 15 meses do ciclo II, equivalente a 668 mm ano⁻¹ e 1332,64 mm ano⁻¹, respectivamente), sendo superior à normal climatológica da região (642 mm ano⁻¹). O regime pluviométrico do local de cultivo é um dos principais fatores que influenciam o crescimento e produtividade da palma forrageira (CONSOLI et al., 2013; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021b). Queiroz et al. (2015) mostraram que lâminas de irrigação variando de 976 a 1202 mm anuais não afetaram o desempenho produtivo da palma, e Silva et al. (2017) afirmaram que em cultivo de clones *Opuntia* e *Nopalea* em locais com índice pluviométrico anual superior a 490 mm, com pelo menos 55 mm mês⁻¹ durante sete meses, o uso da irrigação pode ser descartado.

4.2. Fenofases

O entendimento da dinâmica (i.e., quantidade e duração) das fenofases dos clones de palma forrageira pode contribuir para o manejo adequado da cultura (AMORIM et al., 2017). A partir da taxa de emissão dos cladódios, nossos resultados mostraram que o número total de cladódio (NTC) e a duração de cada fenofase variaram conforme as espécies de cacto. Independente do experimento e ciclo produtivo, um maior NTC foi observado para o clone MIU, o que já era esperado, pois é uma característica geralmente verificada para essa espécie (SILVA et al., 2017; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a). Por outro lado, a quantidade de fenofases entre os clones foi igual na maioria dos ciclos produtivos, com quatro fenofases observadas (P1 a P4). Apenas no segundo ciclo do experimento II observou-se variação no número de fenofases dos clones V19 e OEM, os quais apresentaram três fenofases cada.

A fenofase P4 foi dividida em momento ideal da colheita (P4-HF) e período de reserva forrageira (P4-FR). Na prática, diminuir o tempo de cultivo de clones de palma forrageira é importante para obtenção de forragem em menos tempo (ARAÚJO JÚNIOR

et al., 2021c). Por outro lado, considerar a P4-FR é uma estratégia válida, pois é uma forma de manter uma reserva de alimento durante períodos críticos de seca (ALVES et al., 2022). Além disso, fatores como demanda por alimentos pelos rebanhos, e a disponibilidade de outros recursos alimentares, devem ser considerados para a tomada de decisão em relação ao momento de corte ideal da palma forrageira (AMORIM et al., 2017).

4.2. Evapotranspiração e coeficientes da cultura

Os valores diários e acumulados de evapotranspiração da cultura (ET_c), e o coeficiente da cultura simples (K_c) variaram conforme o regime hídrico (precipitação e irrigação), a demanda atmosférica e o crescimento dos clones de palma forrageira. Resultados semelhantes foram observados por Alves et al. (2022) em cultivo de *O. stricta* sob diferentes condições de cultivo em ambiente semiárido. A dinâmica da evapotranspiração da palma depende das características morfológicas das espécies, bem como da sazonalidade das condições climáticas durante o ciclo produtivo (BARBOSA et al., 2017a). Nesse sentido, nossos resultados mostraram que os maiores valores de ET_c e K_c foram observados nos períodos de maior ET_0 , de frequentes entradas de água no sistema e maiores emissões de cladódios pelas espécies. Por outro lado, os valores mais baixos de ET_c e K_c foram observados no início e final do ciclo da cultura, quando o índice de área do cladódio (IAC) é baixo e a taxa de emissão de cladódios é reduzida, respectivamente. Barbosa et al. (2017a) afirmaram que o IAC e o surgimento de cladódios são fatores determinantes na variação da ET_c de clones de palma forrageira.

Ao considerar o desenvolvimento da cultura, observamos que as maiores ET_c acumuladas estiveram associadas a maior duração das fenofases, que variou conforme os clones. Os valores de K_c variaram mais entre os ciclos produtivos do que entre as espécies nos respectivos experimentos, o que pode ser reflexo da demanda atmosférica, bem como da variabilidade do regime de chuvas entre os anos de 2012 a 2020, resultando em uma maior ou menor quantidade de água disponível no sistema. Além disso, o desempenho produtivo da cultura nos diferentes ciclos é determinante para o consumo hídrico da planta.

No experimento do Sítio I verificou-se os menores valores de K_c médio (IPA = 0,45, MIU = 0,44 e OEM = 0,41). Embora a quantidade de água inserida no sistema, via precipitação e irrigação, tenha sido maior do que nos outros estudos (2514,2 mm),

observou-se também elevados valores de ET_0 durante o período de 2012 a 2014, com média de $5,24 \text{ mm dia}^{-1}$. Essa combinação de fatores pode elevar o déficit de pressão de vapor do ar (DPV), que por sua vez, pode resultar em baixos valores de K_c devido a redução da razão ET_c/ET_0 (SILVA et al., 2015b). Valores de DPV podem reduzir o crescimento e o rendimento das culturas (LOBELL et al., 2014; YUAN et al., 2019), principalmente, em ambientes de clima árido e semiárido (PEGUERO-PINA et al., 2020). Eventualmente, também por esse motivo, os clones tenham apresentando baixo desempenho produtivo quando comparados aos ciclos posteriores.

Nos experimentos I e II do Sítio II os valores de K_c foram maiores no segundo ciclo em comparação com o primeiro. Nesse período, o rendimento da cultura foi maior, sobretudo, dos clones do gênero *Opuntia*, favorecendo maior transpiração (K_{cb}) e valores de K_c , conseqüentemente. Portanto, para as condições avaliadas do presente estudo, o K_{cb} é mais relevante para o K_c em *Opuntia* do que o coeficiente de evaporação (K_e). Por outro lado, o K_e nas espécies *Nopalea* foi mais significativo, contribuindo com maior peso nos valores de K_c nesse ciclo.

As especificidades apresentadas pelos diferentes clones de palma forrageira são fatores determinantes na dinâmica da ET_c e do K_c (BARBOSA et al., 2017a). Pinheiro et al., (2014) e Silva et al. (2014a) relataram que clones do gênero *Opuntia* geralmente apresentam crescimento horizontal, com maior área de cladódios, que por sua vez, refletem em maiores IAC. Tais características favorecem a cobertura do solo, reduzindo a exposição à radiação solar a perda de água por evaporação, conseqüentemente (ZHANG et al., 2018). Por outro lado, um maior IAC reflete maiores taxas de transpiração da cultura e, portanto, ET_c mais elevadas (SILVA et al., 2014b; SILVA et al., 2015b CARVALHO et al., 2017; UNKOVICH et al., 2018; ALVES et al., 2022).

Embora tenham apresentado maior NTC, plantas do gênero *Nopalea* têm cladódios menores em relação à *Opuntia*, e por esse motivo, exibem baixo IAC (SILVA et al., 2014a; PINHEIRO et al., 2014). Como consequência, apresentam menor interação com o ambiente e favorece maior exposição do solo, que resulta em maiores taxas evaporativas (BARBOSA et al., 2017a). Dessa forma, a adoção de práticas como a cobertura morta sobre o solo e a consorciação de culturas pode ser uma alternativa para redução da perda de água por evaporação (SOUZA et al., 2021, 2022; FAN et al., 2020) em cultivos de *Nopalea*.

Além das características intrínsecas das espécies, que condicionam a dinâmica de crescimento da cultura, e das condições ambientais vigentes na região, fatores como a

data de plantio, duração e final do ciclo e a densidade populacional do cultivo devem ser considerados para a determinação do K_c (PEREIRA et al., 2015b; PEREIRA et al., 2021b), como forma de melhorar a gestão de água em áreas irrigadas com palma forrageira em ambiente semiárido.

4.3. Eficiência no uso da água

Os indicadores de eficiência do uso da água são úteis para avaliar a viabilidade do uso da irrigação dentro do sistema de produção, tanto no sentido produtivo das culturas como no retorno econômico que o produtor pode obter (SILVA et al., 2014b; LEVIDOW et al., 2014; FERNÁNDEZ et al., 2020). A produtividade de água da cultura (PA_c) refere-se à capacidade que a cultura tem em converter a quantidade de água evapotranspirada em biomassa vegetal (SILVA et al., 2014b), enquanto a produtividade de água da irrigação (PA_i) indica o potencial produtivo da planta em função da quantidade de água recebida (FERNÁNDEZ et al., 2020). Para avaliar a viabilidade econômica do sistema de produção e do uso da irrigação, utilizamos a produtividade econômica de água da cultura (PEA_c) e da irrigação (PEA_i), que se referem, respectivamente, ao lucro obtido pela comercialização do que foi produzido (i.e., forragem) em função da água usada pela cultura e da quantidade de água aplicada via irrigação (FERNÁNDEZ et al., 2020).

Embora no experimento I do Sítio I não tenha havido diferença entre os clones avaliados, de modo geral, nossos resultados mostraram que as espécies pertencentes ao gênero *Opuntia* se mostraram mais eficientes em relação às espécies *Nopalea*, conforme já relatado na literatura (SILVA et al., 2014b; GARCÍA-NAVA et al., 2015; MORAIS et al., 2017). A elevada eficiência no uso da água apresentada pela palma forrageira é reflexo do metabolismo fotossintético ácido das crassuláceas (MAC), que favorece uma menor perda de água por transpiração no ambiente de cultivo em relação às plantas C3 e C4 (CONSOLI et al., 2013; LIGUORI et al., 2013).

Os maiores valores de PA_c , PA_i , PEA_c e PEA_i apresentada pela OEM, a OEA e a V19 estão associados a elevada capacidade produtiva dessas espécies durante os ciclos estudados. Nesse sentido, a adoção desses clones em sistemas de produção se mostra como uma boa estratégia para a melhoria do uso da água em ambientes semiáridos, pois possibilitam incremento produtivo e bons retornos econômicos ao produtor. Contudo, deve-se considerar as práticas agronômicas empregadas dentro do sistema de produção, pois a aplicação de fertilizantes, o controle de pragas e doenças, a densidade de plantio, a

escolha da espécie vegetal e os arranjos de cultivo, podem influenciar o uso eficiente da água pela cultura (DUBEUX et al., 2006).

5. CONCLUSÃO

Nesse estudo, analisamos a dinâmica da evapotranspiração da cultura (ET_c) e os coeficientes de cultivo ($K_c = K_{cb}$ e K_e), bem como a eficiência do uso da água de diferentes clones de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) cultivados em ambiente semiárido durante o período de 2012 a 2020. Os valores diários e acumulados de ET_c , e o K_c variaram conforme o regime hídrico (precipitação e irrigação), a demanda atmosférica e a dinâmica de crescimento dos clones de palma forrageira.

A variação da ET_c foi mais associada com a duração das fenofases, e os valores de K_c diferem mais em função dos ciclos produtivos do que entre as espécies nos respectivos experimentos. O coeficiente da cultura basal (K_{cb}) é mais significativo para o K_c em espécies *Opuntia*, enquanto o coeficiente de evaporação (K_e) é mais relevante em espécies *Nopalea*. Para as condições estudadas, os indicadores de eficiência do uso da água mostraram que o cultivo de cactáceas do gênero *Opuntia* apresentou maior retorno produtivo e financeiro ao produtor em relação ao cultivo de espécies do gênero *Nopalea*.

Quantificar a real necessidade hídrica da palma forrageira pode melhorar o manejo de irrigação em áreas cultivadas com essa cactácea, com possíveis incrementos no rendimento e no uso eficiente da água da cultura. Portanto, novos estudos são incentivados, incluindo outras espécies de palma (forrageira e frutífera) em diferentes condições ambientais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLI, B.; TOUATI, M.; YABRIR, B.; BAKRIA, T.; BEZINI, E.; BOUTEKRABT, A. Morphological characterization of some naturalized accessions of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. in the Algerian steppe regions. **South African Journal of Botany**, v. 124, p. 211-217, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.04.017>

AL TAMIMI, M.; M.; GREEN, S.; HAMMAMI, Z.; AMMAR, K.; AL KETBI, M.; AL-SHROUF, A. M.; DAWOUD, M.; KENNEDY, L.; CLOTHIER, B. Evapotranspiration and crop coefficients using lysimeter measurements for food crops in the hyper-arid

United Arab Emirates. **Agricultural Water Management**, v. 272, p. 107826, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107826>

ALBERTO, M. C. R.; QUILTY, J. R.; BURESH, R. J.; WASSMANN, R.; HAIDAR, S.; CORREA JUNIOR, T. Q.; SANDRO, J. M. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation. **Agricultural Water and Management**, v. 136, p. 1-12, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.005>

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Dranaige Paper, 56).

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map of Brazil. **Meterology Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ALVES, H. K. M. N.; SILVA, T. G. F.; JARDIM, A. M. R. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, C. A. A.; MOURA, M. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; CAMPOS, F. S.; CRUZ NETO, J. F. The use mulch in cultivating the forage cactus optimizes yield in less time and increases the water use efficiency of the crop. **Irrigation and Drainage**, p. 1-15, 2022b. <https://doi.org/10.1002/ird.2758>

AMORIM, D. M.; SILVA, T. G. F.; PEREIRA, P. C.; SOUZA, L. S. B.; MINUZZI, R. B. Phenophases and cutting time of forage cactus under irrigation and cropping systems. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 1, p. 62-71, 2017.
<http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632016v4742746>

ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, M. J.; ALVES, C. P.; SOUZA, C. A. A.; COSTA, S. A. T.; CUNHA, M. V.; SIMÕES, A. N.; SILVA, J. R. I.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F. Growth dynamics and accumulation of forage mass of forage cactus clones as affected by meteorological variables and water regime. **European Journal of Agronomy**, v.131, p. 126375, 2021b.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126375>

ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SILVA T. G. F.; SOUZA L. S. B.; SOUZA M. S.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA M. S. B.; SANTOS, J. P. A. S.; JARDIM, A. M. R.F.; ALVES, C. P.; ALVES H. K. M. N. Productivity, bromatological composition and economic benefits of using irrigation in the forage cactus under regulated deficit irrigation in a semiarid environment. **Bragantia**, v.80, e1221. 2021a. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200390>

ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B.; ALVES, C. P.; SALVADOR, K. R. S.; SOUZA, C. A. A.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, M. J. Phenophases, morphophysiological indices and cutting time in clone of the forage cacti under controlled water regimes in a semiarid environment. **Journal of Arid Environments**, v. 190, 104510, 2021c. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104510>

ARAÚJO PRIMO, J. T.; SILVA, T. G. F.; SILVA, S. M. S.; MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B. Calibração de sondas capacitivas, funções físico-hídricas e variação do armazenamento de água em um argissolo cultivado com palma forrageira. **Revista Ceres**, v. 62, n.1, p. 20-29, 2015. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562010003>

BARBOSA, M. L.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA, S. M. S.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; JARDIM, A. M. R. F. Meteorological variables and morphological characteristics influencing the evapotranspiration of forage cactus. **Revista Ceres**, v. 64, n. 5, p. 465-475, 2017a. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764050003>

BARBOSA, M. L.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA, S. M. S.; MORAIS, J. E. F.; ASSIS, M. C. S. Association of morphological and water factors with irrigated forage cactus yield. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 600–605, 2017b. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n9p600-605>

BARBOSA, M. L.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA, S. M. S.; STEIDLE NETO, A. J. The influence of cladode morphology on the canopy formation of forage cactus plants. **Revista Caatinga**, v.31, n.1, p. 180–190, 2018. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n121rc>.

CAMPOS, A. R. F.; SILVA, A. J. P.; VAN LIER, Q. J.; NASCIMENTO, F. A. L.; FERNANDES, R. D. M.; ALMEIDA, J. N.; PAZ, V. P. S. Yield and morphology of forage cactus cultivars under drip irrigation management based on soil water matric potential thresholds. **Journal of Arid Environments**, v. 193, p. 104564, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104564>

CONSOLI, S.; INGLESE, G.; INGLESE, P. Determination of Evapotranspiration and annual biomass productivity of a cactus pear [*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.)] orchard in a Semiarid environment. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.139, p. 680-690, 2013. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000589](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000589)

DANTAS, F. D. G.; SANTOS, M. V. F.; LIMA, G. F. C.; COÊLHO, J. J.; MEDEIROS, J. F.; CUNHA, M. V. Drip irrigation with saline water combined with mulch cover as strategies for forage cactus production in semi-arid zones. **Irrigation Science**, p. 1-14, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00841-8>

DUBEUX JR, J. C. B.; SANTOS, M. V. F.; LIRA, M. A.; SANTOS, D. C.; FARIAS, I.; LIMA, 1530 L. E.; FERREIRA, R. L. C. Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller under different N and P fertilization and plant population in northeast Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 67, n. 3, p. 357-372, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.015>

DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; SANTOS, M. V. F.; CUNHA, M. V.; SANTOS, D. C.; SOUZA, R. T. A.; MELLO, A. C. L.; SOUZA, T. C. Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. **Animal Feed Science and Technology**, v. 275, 114890, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>

FENG, X.; LIU, H.; FENG, D.; TANG, X.; LI, L.; CHANG, J.; TANNY, J.; LIU, R. Quantifying winter wheat evapotranspiration and crop coefficients under sprinkler irrigation using eddy covariance technology in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 277, p. 108131, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108131>

FERNÁNDEZ, J. E.; ALCON, F.; DIAZ-ESPEJO, A.; HARNANDEZ-SANTANA, V. CUEVAS, M. V. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. **Agricultural Water Management**, v. 237, 106074, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074>

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portuguese). **R package version 1.2.0**, 2018. <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>

FREIRE, J. L.; SANTOS, M. V. F.; DUBEUX JÚNIOR, J. C.; BEZERRA NETO, E.; LIRA, M. A.; CUNHA, M. V.; SANTOS, D.; AMORIM, S.; MELLO, A. C. Growth of cactus pear cv. Miúda under diferente salinity levels and irrigation frequencies. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, n. 90, n. 4, p. 3893–3900, 2018. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820171033>

GARCÍA-NAVA, F.; PEÑA-VALDIVIA, C. B.; TREJO, C.; GARCÍA-NAVA, R.; REYES-AGÜERO, J. A.; RIVERA, J. R. A. Biophysical and physiological characteristics of nopalitos (*Opuntia* spp., Cactaceae) as influenced by domestication. **Genetic resources and crop evolution**, v. 62, n. 6, p. 927-938, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10722-014-0201-7>

JARDIM, A. M. R. F.; SANTOS, H. R. B.; ALVES, H. C. M. N.; FERREIRA-SILVA, S. L.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, M. S.; ARAÚJO, G. G. L.; SOUZA, C. A. A.; SILVA, T. G. F. Genotypic differences relative photochemical activity, inorganic and organic solutes and yield performance in clones of the forage cactus under semi-arid environment. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 162, p. 421-430, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.011>

LEITE, R. M. C.; SILVA, G. I. N.; CHAGAS, R. M. M.; ALVES, H. K. M. N.; SILVA, T. G. F. Coeficiente de extinção da palma forrageira depende do gênero e índice de área do cladódio. *In: XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia / V Simpósio de Mudanças Climáticas e Desertificação do Semiárido Brasileiro.*, 2017, Juazeiro, BA / Petrolina, PE. **Anais[...]** Juazeiro, BA / Petrolina, PE, 2017, p. 1-5.

LEVIDOW, L.; ZACCARIA, D.; MAIA, R.; VIVAS, E.; TODOROVIC, M.; SCARDIGNO, A. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 84–94, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.012>

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. P.; BIGGAR, J. W.; 1980. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society American Journal**, v.44, n.1, p. 3-7, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400010001x>

LIGUORI, G.; INGLESE, G.; PERNICE, F.; SORTINO, G.; INGLESE, P. CO₂ uptake of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Whole trees and single cladodes, in relation to plant water status and cladode age. **Italian Journal of Agronomy**, v.8, n.1, p. 14–20, 2013. <https://doi.org/10.4081/ija.2013.e3>

LOBELL, D. B.; ROBERTS, M. J.; SCHLENKER, W.; BRAUN, N.; LITTLE, B. B.; REJESUS, R. M.; HAMMER, G. L. Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the U.S Midwest. **Science**, v. 344, n. 6183, p. 516-519, 2014. <https://doi.org/10.1126/science.1251423>

MORAIS, J. E. F.; SILVA, T. G. F.; QUEIROZ, M. G.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N. Hydrodynamic changes of the soil-cactus interface, effective actual evapotranspiration and its water efficiency under irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, n.2, p. 273-278, 2017. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n4p273-278>

PEGUERO-PINA, J. J.; VILAGROSA, A.; ALONSO-FORN, D.; FERRIO, J. P.; SANCHO-KNAPIK, D.; GIL-PELEGRÍN, E. Living in drylands: functional adaptations of trees and shrubs to cope with high temperatures and water scarcity. **Forest**, v. 11, n. 10, p. 1028, 2020. <https://doi.org/10.3390/f11101028>

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; JOVANOVIĆ, N. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual K_c approach. **Agricultural Water Management**, v. 241, 106357, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357>

PEREIRA, P. C.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; MORAIS, J. E. F.; SANTOS, D. C. Morfogênese da palma forrageira irrigada por gotejamento. **Revista Caatinga**, v.28, n.3, p. 184-195, 2015a. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252015v28n321rc>

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4-20, 2015b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; LÓPEZ-URREA, R.; HUNSAKER, D. J.; MOTA, M.; MOHAMMADI SHAD, Z. Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. **Agricultural Water Management**, v. 243, 106196, 2021b.

PINHEIRO, K. M.; SILVA, T. G. F.; CARVALHO, H. F. S.; SANTOS, J. E.; MORAIS, J. E. F.; ZOLNIER, S.; SANTOS, D.C. Correlações do índice de área do cladódio com características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.12, p. 939-947, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200004>

QUEIROZ, M. G.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA S. M. S.; LIMA, L. R.; ALVES, J. O. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 10, p. 931-938, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p931-938>

QUEIROZ, M. G.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SIQUEIRA E SILVA, S. M.; SOUZA, C.A.A.; CARVALHO, H. F. S. Hydro-economic relations of forage cactus cultivated in semiarid environment. **Irriga**, p. 141-154, 2016. <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p141-154>

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019. URL <https://www.R-project.org/>.

RICHARDS, L. A. **Diagnose and improvement of saline and alkali soils**. Washington: USDA, 1954. 60p. Handbook, 60.

ROCHA, R. S.; VOLTOLINI, T. V.; GAVA, C. A. T. Características produtivas e estruturais de genótipos de palma forrageira irrigada em diferentes intervalos de corte. **Archivos de Zootecnia**, v. 66, n. 255, p. 365-373, 2017.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COLEHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO, A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solo**. 5 ed. Embrapa Solos, Brasília, p. 564, 2018.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. **Food analysis: chemical and biological methods**. Minas Gerais: UFV, 2005.

SILVA, T. G. F.; ARAÚJO PRIMO, J. T.; MORAIS, J. E. F.; DINIZ, W. J. S.; SOUZA, C. A. A.; SILVA, M. C. Crescimento e produtividade de clones de palma forrageira no Semiárido e relações com variáveis meteorológicas. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 2, p. 10-18, 2015a.

SILVA, T. G. F.; ARAÚJO PRIMO, J. T.; MOURA, M. S. B.; SILVA, S. M. S.; MORAIS, J. E. F., PEREIRA, P. C., SOUZA, C. A. A. Soil water dynamics and evapotranspiration of forage cactus clones under rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 7, p. 515-525, 2015b. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000700001>

SILVA, T. G. F.; ARAÚJO PRIMO, J. T.; SILVA, S. M. S.; MOURA, M. S. B.; SANTOS, D. C.; SILVA, M. C.; ARAÚJO, J. E. M. Indicadores de eficiência do uso da

água e de nutrientes de clones de palma forrageira em condições de sequeiro no Semiárido brasileiro. **Bragantia**, v. 73, n. 2, 2014b. <https://doi.org/10.1590/brag.2014.017>

SILVA, T. G. F.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B. Agrometeorological research on forage cactus and its advances in Brazil. **Amazonian Journal of Plant Research**, v. 2, p. 45-68, 2017. <https://doi.org/10.26545/b00006x>

SILVA, T. G. F.; MIRANDA, K. R.; SANTOS, D. C.; QUEIROZ, M. G.; SILVA, M. C.; CRUZ NETO, J. F.; ARAÚJO, J. E. M. Área do cladódio de clones de palma forrageira: modelagem, análise e aplicabilidade. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 4, p. 633-641, 2014a.

SOUZA, M. S.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, L. S. B.; JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, G. I. N.; ARAÚJO, G. G. L.; CAMPOS, F. S.; LEITE, M. L. M.; TABOSA, J. N.; SILVA, T. G. F. Forage yield, competition and economic benefit of intercropping cactus and millet with mulch in a semi-arid environment. **African Journal Range & Forage**, p. 1-13, 2022. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.2016967>

TAN, Q.; LIU, Y.; PAN, T.; SONG, X.; LI, X. Changes and determining factors of crop evapotranspiration derived from satellite-based dual crop coefficients in North China Plain. **The Crop Journal**, v. 10, n. 5, p. 1496-1506, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.07.013>

YUAN, W.; ZHENG, Y. I.; PIAO, S.; CIAIS, P.; LOMBARDOZZI, D.; WANG, Y.; RYU, Y.; CHEN, G.; DONG, W.; HU, Z.; JAIN, A. K.; JIANG, C.; KATO, E.; LI, S.; LIENERT, S.; LIU, S.; NABEL, J. E. M. S.; QIN, Z.; QUINE, T.; YANG, S. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. **Science advances**, v. 5, n. 8, p. eaax1396, 2019. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1396>