

ALBERTO MARIO ARROYO AVILEZ

**ESTIMATIVA DA NECESSIDADE HÍDRICA E DOS COEFICIENTES DE CULTIVO
(K_c) DA CULTURA DA MAMONA DE PEQUENO PORTE NA REGIÃO CENTRO
SUL DO ESTADO DE SÃO PAULO**

Botucatu

2021

ALBERTO MARIO ARROYO AVILEZ

**ESTIMATIVA DA NECESSIDADE HÍDRICA E DOS COEFICIENTES DE CULTIVO
(K_c) DA CULTURA DA MAMONA DE PEQUENO PORTE NA REGIÃO CENTRO
SUL DO ESTADO DE SÃO PAULO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Irrigação e drenagem).

Orientador: João Luís Zocoler

Botucatu

2021

A958e

Avilez, Alberto Mario Arroyo

Estimativa da necessidade hídrica e dos coeficientes de cultivo (Kc) da cultura da mamona de pequeno porte na região centro sul do estado de São Paulo / Alberto Mario Arroyo Avilez. -- Botucatu, 2021

81 p. : tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu

Orientador: João Luís Zocoler

1. Necessidade Hídrica. 2. Evapotranspiração. 3. Coeficientes de cultivo. 4. *Ricinus communis* L.. 5. Produtividade da água. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ESTIMATIVA DA NECESSIDADE HÍDRICA E DOS COEFICIENTES DE CULTIVO (KC) DA CULTURA DA MAMONA DE PEQUENO PORTE NA REGIÃO CENTRO SUL DO ESTADO DE SÃO PAULO

AUTOR: ALBERTO MARIO ARROYO AVILEZ

ORIENTADOR: JOAO LUIS ZOCOLER

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOAO LUIS ZOCOLER (Participação Virtual)
Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

por 
Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD (Participação Virtual)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

por 
Prof. Dr. ENZO DAL PAI (Participação Virtual)
Pós-Doutorando - Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

por 
Prof. Dr. IVO ZUTION GONÇALVES (Participação Virtual)
Engenharia de Biosistemas / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

por 
Prof. Dr. LUAN BRIOSCHI GIOVANELLI (Participação Virtual)
Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia / Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Botucatu, 21 de maio de 2021

Aos meus amados pais,

Julio e Yaneth,

e irmãos

Carmelo e Valeria

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me guiar nos meus caminhos, me dar forças para nunca desistir e estar sempre presente em minha vida.

Aos meus queridos pais Júlio e Yaneth e meus irmãos Carmelo e Valeria pelo apoio incondicional e sempre me aportar forças para não desistir.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Botucatu e ao Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem por ter me acolhido e pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

Ao Prof. Dr. João Luis Zocoler, por aceitar me orientar, pelos ensinamentos, paciência e exemplo de Professor.

Ao amigo Daniel Parra, pela grande amizade que surgiu a partir deste experimento, sendo um grande companheiro de trabalho nas colheitas de campo e mostrando-se sempre disponível em me ajudar, motivar e aconselhar nas dificuldades de uma pandemia.

Aos meus amigos, Andres Gaona, Luan Brioschi, Ícaro Monteiro, Fabio Gregory e Laércio Pereira por sempre estarem dispostos a me ajudar e motivar na realização desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Mauricio Dutra Zanotto por aportar o material genético e oferecer o laboratório de sementes para a realização desta pesquisa, e aos Profs. Drs. João Carlos Cury Saad e Enzo Dal Pai por sempre estarem dispostos em me ajudar a aperfeiçoar esta pesquisa.

As estudantes de pós-graduação Larissa Chama e Odila pela ajuda nas análises realizadas no laboratório de sementes.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – CAPES – Código de financiamento 88882.433013/2019-01.

RESUMO

A mamoneira é uma cultura pouco explorada no Brasil, porém com um considerável potencial agroindustrial. Esta é uma cultura que vem despertando interesse na produção agrícola mundial pelo crescimento no setor bioenergético. Portanto, estudos relacionados às diferentes estratégias de irrigação visando o aumento da produtividade, a evapotranspiração e coeficientes de cultivos ainda são escassos na literatura. Além disso, informações precisas sobre o coeficiente de cultivo (K_c) das novas variedades de mamoneira são necessárias para realizar uma boa programação das irrigações ao longo do ciclo da cultura. Neste contexto, o presente trabalho foi conduzido objetivando-se determinar a necessidade hídrica, a evapotranspiração da cultura (ET_c) e determinar os coeficientes de cultivo (K_c) para a cultivar AG IMA 110204 (*Ricinus communis* L.) irrigado em estufa, em dois ciclos de cultivo. As plantas foram submetidas a cinco níveis de tensão de água no solo (I_1 , I_2 , I_3 , I_4 e I_5), correspondendo às tensões de 20, 30, 40, 50 e 60 kPa, respectivamente, e quatro níveis de suspensão da irrigação (A, B, C e D), relacionados a 120, 130, 140 e 150 dias após a semeadura, respectivamente. Verificou-se que o aumento da tensão de água no solo reduziu significativamente o diâmetro do caule, a altura das plantas da mamoneira e o número de capsulas por racemo, o peso de 100 sementes e as produtividades de sementes e de óleo, evidenciando a sensibilidade da cultura ao estresse hídrico. As produtividades médias de sementes e de óleo em condições de menor tensão de água no solo e de suspensão de irrigação foram significativamente maiores (média de 4826 kg ha^{-1}) do que as produtividades nos tratamentos com a maior tensão e de suspensão da irrigação (média de 3411 kg ha^{-1}). As práticas de irrigação que mantêm a tensão de água no solo correspondente à capacidade de campo (10 KPa) podem ser uma estratégia de irrigação potencial para obter maiores produtividades de sementes e de óleo no Brasil em regiões sem limitação de utilização dos recursos hídricos. No entanto, as práticas de irrigação nas tensões de 40 KPa com época de suspensão da irrigação de 120 dias proporcionaram maior produtividade da água (média de $1,19 \text{ kg m}^{-3}$), evidenciando-se uma prática de manejo da irrigação mais eficiente em regiões produtoras com pouca disponibilidade hídrica. Os valores de ET_c diária variaram, em média, entre 1,7 e 4,4 mm para o primeiro ciclo e 1,7 até 3,8 no segundo ciclo, sendo que os valores totais foram 465 e 450,1 mm para o primeiro e segundo ciclo respectivamente. Os valores médios de K_c para os dois ciclos foram de 0,42 para a fase inicial, 0,69 para a fase de crescimento, 1,2 para a fase intermediária e 0,97 para a fase de maturação. Além disso neste estudo foram desenvolvidas e validadas equações com relação à data de semeadura e ao somatório dos graus dias (GDA) para ajustar os valores de K_c da mamoneira em estufa. Os valores de K_c diários determinados podem ser usados e relacionados com a evapotranspiração de referência (ET_o) sendo possível estimar a ET_c específica para esta variedade, e desta forma melhorar o manejo da água nos cultivos da mamoneira.

Palavras-chave: Tensão de água no solo; Evapotranspiração; Produtividade da água; *Ricinus communis* L.

ABSTRACT

Castor bean is a little explored crop in Brazil, but with considerable agro-industrial potential. This is a crop that has been arousing interest in world agricultural production due to the growth in the bioenergy sector. Therefore, studies related to different irrigation strategies aimed at increasing productivity, evapotranspiration and crop coefficients are still scarce in the literature. In addition, precise information about the crop coefficient (Kc) of new castor bean varieties is necessary to be able to carry out a good irrigation programming throughout the crop cycle. In this context, the present work was carried out aiming to determine the water requirement, the crop evapotranspiration (ETc) and to determine the crop coefficients (Kc) for the cultivar AG IMA 110204 (*Ricinus communis* L.) irrigated in a greenhouse, in two cultivation cycles. The plants were subjected to five levels of soil water tension (I1, I2, I3, I4 and I5), corresponding to tensions of 20, 30, 40, 50 and 60 kPa, respectively, and four times of irrigation suspension (A, B, C and D), related to 120, 130, 140 and 150 days after sowing, respectively. It was found that the increase in soil water tension significantly reduced the stem diameter, the height of the castor bean plants and the number of capsules per raceme, the weight of 100 seeds and the seed and oil yields, showing sensitivity from crop to water stress. The average seed and oil yields under conditions of lower soil water tension and irrigation suspension were significantly higher (average of 4826 kg ha⁻¹) than the yields in treatments with the highest tension and irrigation suspension (average of 3411 kg ha⁻¹). Irrigation practices that maintain soil water tension corresponding to field capacity (10 KPa) can be a potential irrigation strategy to obtain higher seed and oil yields in Brazil in regions without limiting the use of water resources. However, irrigation practices at tensions of 40 KPa with irrigation suspension time of 120 days provided higher water productivity (average of 1.19 kg m⁻³), evidencing a more efficient irrigation management practice in producing regions with little water availability. The daily ETc values varied, on average, between 1.7 and 4.4 mm for the first cycle and 1.7 to 3.8 in the second cycle, with the total values being 465 and 450.1 mm for the first and second cycle respectively. The mean values of Kc for the two cycles were 0.42 for the initial phase, 0.69 for the growing phase, 1.2 for the intermediate phase and 0.97 for the maturation phase. Furthermore, in this study, equations were developed and validated in relation to the sowing date and the sum of the degree days (GDA) to adjust the Kc values of castor bean in greenhouse. The determined daily Kc values can be used and related to the reference evapotranspiration (ETo) and it is possible to estimate the specific ETc for this variety, and thus improve water management in castor bean crops.

Keywords: Water tension in the soil; Evapotranspiration; Water productivity; *Ricinus communis* L.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
CAPÍTULO 1 - RESPOSTA DA MAMONA DE PORTE BAIXO SUBMETIDA A DIFERENTES TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO E DIFERENTES ÉPOCAS DE SUSPENSÃO DA IRRIGAÇÃO	17
1.1 INTRODUÇÃO	19
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	20
1.2.1 ÁREA DE ESTUDO	20
1.2.2 MATERIAL EXPERIMENTAL, CARACTERIZAÇÃO DO SOLO, SEMEADURA E ADUBAÇÃO	21
1.2.3 MANEJO DA IRRIGAÇÃO E OBTENÇÃO DE DADOS METEOROLÓGICOS.....	22
1.2.4 DELINEAMENTO ESTATÍSTICO, ÉPOCAS DE CULTIVO E VARIÁVEIS ANALISADAS.	25
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
1.3.1 NECESSIDADE HÍDRICA DA CULTURA.....	26
1.3.2 EFEITO DAS TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO E DAS ÉPOCAS DE SUSPENSÃO DAS IRRIGAÇÕES NAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E COMPONENTES DE PRODUÇÃO.....	30
1.3.3 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO RELACIONADA À PRODUTIVIDADE DOS GRÃOS E DE ÓLEO.....	38
1.4 CONCLUSÕES.....	40
REFERÊNCIAS	41
CAPÍTULO 2 – ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE CULTURA (KC) EM MAMONA DE PEQUENO PORTE	45
2.1 INTRODUÇÃO	47
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	48
2.2.1 ÁREA DE ESTUDO.....	48
2.2.2 MATERIAL EXPERIMENTAL, CARACTERIZAÇÃO DO SOLO, SEMEADURA E ADUBAÇÃO	49
2.2.3 DADOS METEOROLÓGICOS	50

2.2.4	CARACTERÍSTICAS E MANEJO DOS TENSÍÔMETROS.....	51
2.2.5	ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTIVO (KC).....	53
2.2.6	SISTEMA DE IRRIGAÇÃO	55
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
2.3.1	CONDIÇÕES CLIMÁTICAS.....	57
2.3.2	TENSÃO DIÁRIA DA ÁGUA NO PERFIL DO SOLO	61
2.3.3	EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA (ETC), EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET ₀) E LÂMINA DE IRRIGAÇÃO APLICADA.....	63
2.3.4	COEFICIENTES DE CULTIVO DA MAMONEIRA	64
2.4	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS	69
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
	REFERÊNCIAS.....	75
	ANEXO A - FIGURA 1 – CULTIVO DA MAMONEIRA DE PORTE BAIXO (AG IMA 110204 - RNC-32752).....	76
	ANEXO B - FIGURA 2 – CULTIVO DA MAMONEIRA ANTES E DEPOIS DO FLORESCIMENTO.	76
	ANEXO C - FIGURA 3 – CULTIVO DA MAMONEIRA NA FASE DO INÍCIO DO FLORESCIMENTO.....	77
	ANEXO D - FIGURA 4 – CULTIVO DA MAMONEIRA NA FASE DO INÍCIO DO ENCHIMENTO DOS FRUTOS.....	78
	ANEXO E - FIGURA 5 – CULTIVO DA MAMONEIRA NA FASE FINAL (FRUTOS TOTALMENTE SECOS).	79
	ANEXO F - FIGURA 6 – PROCESSO DE DESCASQUE PARA RETIRADA DOS GRÃOS DOS FRUTOS.	80
	ANEXO G - FIGURA 7 – COLHEITA DA MAMONEIRA DE PORTE BAIXO (AG IMA 110204 - RNC-32752).	81

INTRODUÇÃO GERAL

A mamona é uma planta oleaginosa da família Euphorbiaceae de clima quente, porém adapta-se a diferentes condições ambientais, sendo suas sementes uma importante fonte de óleo de rícino como o principal produto, utilizado na indústria química na composição de inúmeros subprodutos como tintas, vernizes, cosméticos, fluidos hidráulicos e plásticos (COSTA et al., 2010). Além disso, o óleo de mamona vem sendo usado como fonte alternativa de combustível em motores de ciclo diesel, a partir da obtenção do biodiesel que é um combustível renovável, por esta razão a produção de óleo de mamona vem aguçando o interesse do mercado mundial.

Existem dois tipos de variedades de mamona, de porte alto (arbustiva) e de porte baixo. Na área agroindustrial a variedade usada é a de porte baixo, por esta razão o Brasil tem investido em estudos por meio da Embrapa Algodão na geração de vários híbridos na busca pelos que melhor se adaptem as condições ambientais de cada região. Os mais comuns são o BRS Paraguaçu, BRS Nordestina, BRS Energia e BRS Gabriela, com variação na altura da planta entre 1,4 e 2,5 m, ciclo entre 250 e 120 dias e produtividade entre 1.900 e 1.500 Kg/ha (EMBRAPA, 2011).

As variedades de porte baixo apresentam grandes vantagens como a maior produção por hectare e a possibilidade de realizar uma colheita mecanizada. Caracteriza-se também por terem fruto com sêmenes indeiscentes, mantendo-se estas na planta até o momento da colheita, evitando perdas pela queda prematura das sementes ou frutos. Outra vantagem referente ao ciclo curto é que este cultivo oferece uma opção de rotação de cultura com o algodão ou soja na entressafra, e além disso auxilia na redução da população de nematoides de galha (De SÁ et al., 2015). Por todas essas razões a mamona vem se convertendo numa cultura de muito interesse para os produtores no Brasil.

Historicamente, os maiores produtores desta cultura são a Índia, China, Brasil e Moçambique, de acordo com os dados de produção para a safra do ano de 2018 a Índia foi responsável pela produção de 1,198 milhões de toneladas sendo aproximadamente 86% da produção mundial, Moçambique com 85,4 mil toneladas e China com 27 mil toneladas, seguidas pelo Brasil com uma produção de 14,2 mil toneladas, totalizando uma produção mundial com o resto dos países de aproximadamente 1,396 milhões de toneladas em uma área de 1.296.855 hectares, tanto para a cultura irrigada quanto a não irrigada (FAO, 2020).

No Brasil, a produção está concentrada principalmente na região do Nordeste e Centro-Oeste com o Estado da Bahia respondendo por aproximadamente 87% da produção nacional, seguido por Mato Grosso e Ceará (IBGE, 2020). A área total colhida no Brasil foi de 47,9 mil hectares somando uma produtividade média de 621 kg ha⁻¹ entre cultivos irrigados e não-irrigados (CONAB, 2020). Ainda que sejam observados estes valores de potencial produtivo baixos, a mamona no Brasil pode alcançar potenciais de até 8.500 kg ha⁻¹ com o uso da irrigação como foi registrado em cultivares anãs por (BELTRÃO e CARDOSO, 2006).

A mamoneira se desenvolve bem em ambientes com faixa de temperatura entre de 20°C a 35°C, sendo recomendada uma temperatura média ideal de 28°C. É considerada uma espécie tolerante à seca, no entanto, a cultura não é capaz de alcançar máximas produtividades se não houver uma disponibilidade adequada de água para suprir suas necessidades (FARIA-MACHADO et al., 2013).

Está oleaginosa apresenta maior exigência hídrica durante o início da sua fase vegetativa. Segundo Távora (1982), o período compreendido entre a brotação e a floração da planta foi aquele que a cultura apresentou um maior consumo hídrico. Conforme a Embrapa (2011), uma produção economicamente viável é alcançada quando a planta recebe em torno de 500 mm durante seu ciclo e há produtividades maiores quando receber entre 500 e 1000 mm/ciclo. Esta necessidade hídrica também depende das variedades, pois atualmente existem variedades com ciclos mais curtos. Dias et al. (2015) verificaram um consumo hídrico total de 578 mm em condições de produção satisfatórias para um ciclo de 120 dias da variedade BRS Energia.

Para otimizar a produção da mamoneira, a prática da irrigação deve ser adotada em regiões que não se tem adequada pluviosidade, sendo possível aplicar a água necessária durante cada fase do ciclo produtivo das plantas. Sendo a irrigação uma ferramenta importante para aumentar a produtividade nacional da mamoneira, são também necessários estudos para estabelecer as necessidades hídricas de cada uma destas variedades disponíveis no Brasil. Sendo assim, objetivou-se nesse trabalho estimar a necessidade hídrica da cultura, o melhor nível de tensão de água no solo para realizar o manejo da irrigação, avaliar após quantos dias do ciclo do cultivo se deve interromper a irrigação, qual tensão proporciona uma maior produtividade da água e determinar os coeficientes de cultivo (Kc) da mamona (*Ricinus communis* L.), variedade AG IMA 110204 (RNC-32752), combinando métodos de evapotranspiração e de tensiometria.

CAPÍTULO 1

RESPOSTA DA MAMONA DE PORTE BAIXO SUBMETIDA A DIFERENTES TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO E DIFERENTES ÉPOCAS DE SUSPENSÃO DA IRRIGAÇÃO¹

RESUMO

A mamona é considerada uma cultura potencial para bioenergia, dada a necessidade crescente por novos recursos energéticos. Sendo assim, estudos sobre o comportamento desta cultura sob diferentes estratégias de irrigação visando o aumento da produtividade devem ser incrementados. Neste contexto, o presente trabalho foi conduzido objetivando-se determinar a necessidade hídrica, os efeitos de diferentes tensões de água no solo e diferentes épocas de suspensão da irrigação sobre características morfológicas, componentes de produção e produtividade da água do cultivar AG IMA 110204 (*Ricinus communis* L.), cultivada em estufa por dois ciclos. As plantas foram submetidas a cinco tratamentos (parcelas) de tensão de água no solo (I₁, I₂, I₃, I₄ e I₅), correspondendo às tensões de 20, 30, 40, 50 e 60 kPa, respectivamente, e quatro tratamentos (sub-parcelas) de suspensão da irrigação (A, B, C e D), relacionados a 120, 130, 140 e 150 dias após a semeadura, respectivamente. Verificou-se que o aumento da tensão de água no solo reduziu significativamente o diâmetro do caule, a altura das plantas e o número de frutos por racemo, o peso de 100 grãos e as produtividades dos grãos e de óleo, evidenciando a sensibilidade da cultura ao estresse hídrico. As produtividades médias dos grãos e de óleo em condições de menor tensão de água no solo e maior época de suspensão de irrigação foram significativamente maiores (médias 4826 kg ha⁻¹ para grãos e 1638 kg ha⁻¹ para óleo) do que as produtividades nos tratamentos com a maior tensão e menor época de suspensão da irrigação (média de 3411 kg ha⁻¹ para grãos e 1178 kg ha⁻¹ para óleo). As práticas de irrigação que mantêm a tensão de água no solo correspondente à capacidade de campo podem ser uma estratégia de irrigação potencial para obter maiores produtividades de grãos e de óleo no Brasil, em regiões sem limitação de utilização dos recursos hídricos. No entanto, as práticas de irrigação nas tensões de 40 KPa com época de suspensão da irrigação de 120 dias proporcionaram maior produtividade da água (média de 1,19 kg m⁻³ para grãos e 0,41 kg m⁻³ para óleo), evidenciando-se uma prática de manejo da irrigação mais eficiente em regiões produtoras com pouca disponibilidade hídrica.

Palavras-chaves: Necessidade hídrica; características morfológicas; Produtividade da água; *Ricinus communis* L.

¹Capítulo submetido na revista Agricultural Water Management

ABSTRACT

Castor bean is considered a potential crop for bioenergy, given the growing need for new energy resources. Therefore, studies about the behavior of this crop under different irrigation strategies aimed at increasing productivity should be. In this context, the present work was carried out aiming to determine the water requirement, the effects of different soil water tensions and different irrigation suspension times on morphological characteristics, production components and water productivity of the cultivar AG IMA 110204 (*Ricinus communis* L.), cultivated in a greenhouse for two cycles. The plants were subjected to five treatments (plots) of soil water tension (I1, I2, I3, I4 and I5), corresponding to tensions of 20, 30, 40, 50 and 60 kPa, respectively, and four treatments (sub-plots) of suspension of irrigation (A, B, C and D), related to 120, 130, 140 and 150 days after sowing, respectively. It was found that increasing soil water tension significantly reduced stem diameter, plant height and number of fruits per raceme, weight of 100 grains and grain and oil yields, showing the sensitivity of the crop. to water stress. The average grain and oil yields under conditions of lower soil water tension and longer irrigation suspension time were significantly higher (average 4826 kg ha⁻¹ for grains and 1638 kg ha⁻¹ for oil) than the yields in treatments with the highest tension and lowest irrigation suspension period (average of 3411 kg ha⁻¹ for grains and 1178 kg ha⁻¹ for oil). Irrigation practices that maintain soil water tension corresponding to field capacity can be a potential irrigation strategy to obtain higher grain and oil yields in Brazil, in regions with no limitation in the use of water resources. However, irrigation practices at tensions of 40 KPa with irrigation suspension time of 120 days provided higher water productivity (average of 1.19 kg m⁻³ for grains and 0.41 kg m⁻³ for oil), showing a more efficient irrigation management practice in producing regions with little water availability.

Key words: Water need; Morphological characteristics; Yield; Water productivity; *Ricinus communis* L.

1.1 INTRODUÇÃO

A mamona (*Ricinus communis* L.), nativa da África Oriental, é uma planta fibrosa e de rápido crescimento. No Brasil, apresenta crescente importância econômica devido à sua utilização nas indústrias farmacêutica e química. Do grão produzido pela planta é extraído como produto principal um óleo de rícino rico em ácido ricinoleico e como subproduto, a torta, que possui a capacidade de reincorporar matéria orgânica em terras esgotadas (Faria-machado et al., 2013).

O óleo da mamona apresenta uma característica importante e específica em suportar altas temperaturas sem perder a viscosidade devido à sua alta solvabilidade na transesterificação do álcool, que ocorre sem aquecimento (Souza et al., 2007). Além da sua utilização como fonte energética para motores, o óleo da mamona também é importante na produção de diversos produtos como lubrificantes, cosméticos, tintas, medicamentos e colchões de espuma (Veríssimo et al., 2009)

Com o desenvolvimento de novas cultivares possuindo alto potencial produtivo e características desejáveis para a colheita mecanizada (Severino et al., 2012), a mamona expandiu-se para o Cerrado brasileiro, mais especificamente para a região Centro-Oeste, tornando-se uma opção de cultivo na segunda safra, inclusive para ser incluída na rotação com outras culturas anuais (Souza-schlick et al., 2012). Entretanto, tecnologias de produção mais eficientes – entre elas a irrigação – são necessárias para maximizar a produção agrícola (Souza-Schlick et al., 2011).

Quando cultivada em regiões com baixos índices pluviométricos, ou em períodos de estiagem, o desenvolvimento da cultura pode ser afetado (Barros Junior et al., 2008). Em áreas nas quais se tem uma precipitação total inferior aos 500 mm durante o ciclo da cultura e não há a utilização da irrigação para suprir a demanda exigida, pode haver perda total da produção ou menores rendimentos de grãos por plantas. Rios et al. (2013) indicaram que a massa de frutos e a produção de grãos em todos os racemos decresceram linearmente com o aumento da restrição hídrica.

Conhecer a resposta das culturas em função de fatores como a disponibilidade hídrica é importante para a realização de um eficiente manejo da irrigação. Informações sobre a necessidade hídrica da mamona, associada aos estudos de melhoramento de plantas são escassos na literatura, principalmente em comparação com outras culturas oleaginosas mais comuns, como a soja e o girassol (Auld et al., 2001). Face ao exposto, realizou-se este trabalho no intuito de estimar a necessidade

hídrica, a tensão de manejo da água no solo que proporciona maior produtividade da água e a resposta da mamoneira ao estresse hídrico e aos efeitos de diferentes tensões de água no solo e diferentes épocas de suspensão da irrigação sobre as características morfológicas e componentes de produção da cultivar AG IMA 110204, em dois ciclos de cultivo.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Área de estudo

Este trabalho foi conduzido em ambiente protegido no município de Botucatu, localizado na região Centro Sul do Estado de São Paulo, na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), em uma estufa localizada nas coordenadas geográficas $22^{\circ}51'6.12''$ S e $48^{\circ}25'45.44''$ O (Figura 1), com área de 161 m^2 .

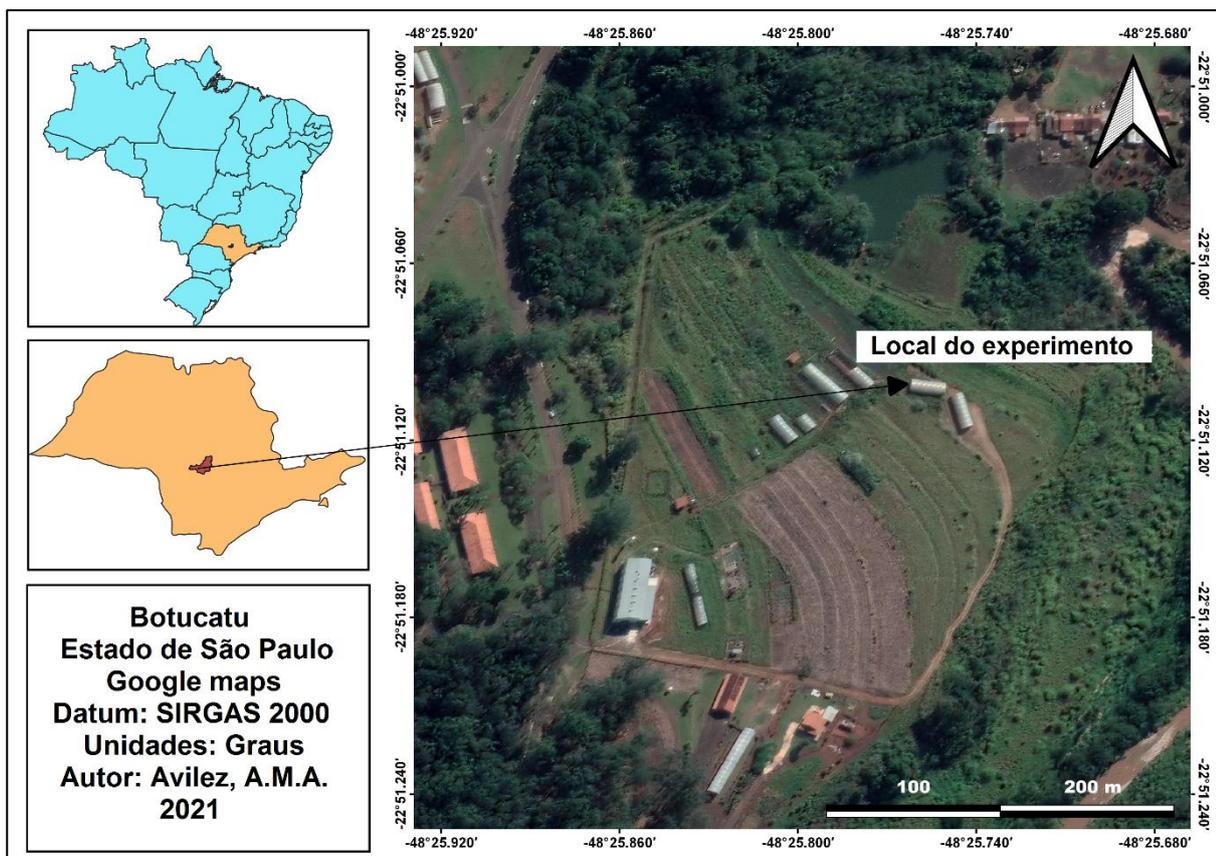


Figura 1. Localização do local do experimento.

Esta região é caracterizada por apresentar um clima quente, úmido e temperado (mesotérmico), classificado como Cfa segundo Köppen (Peel et al., 2007). A pluviosidade média anual é de 1.501,4 mm e temperatura média de 20,3°C (Alvares et al., 2013).

A estufa onde foi realizado o experimento é composta por oito arcos de 7 m de largura e um comprimento de 23 metros, totalizando 161 m². Utilizou-se como cobertura o filme de efeito antivírus difusor Ginegar Polysack no teto, com 150 µm de espessura e tratamento de raios ultravioleta com filtro de radiação solar de 15%, enquanto a cobertura frontal e lateral foi constituída de malha Clarinet anti-insetos, mas possibilitando também uma boa abertura de orifícios que permite uma excelente ventilação dentro da estufa.

1.2.2 Material experimental, caracterização do solo, semeadura e adubação

Foi utilizado o híbrido de mamona AG IMA 110204 (RNC-32752), cultivar desenvolvida pelo Instituto Mato-Grossense do Algodão (IMAmt) como uma opção para rotação de culturas e reduzir nematóides em áreas de algodão. Este é um híbrido de pequeno porte (1,70 cm) que apresenta as condições ideais para mecanização, apresenta um rápido florescimento (aproximadamente aos 30 dias após a semeadura - DAS), um ciclo produtivo de 160 dias, potencial produtivo entre 1500 e 3000 kg.ha⁻¹ e concentração de óleo em média aos 47% (De Sá et al., 2015).

A análise química e textural do solo apresentou os seguintes resultados: Matéria orgânica = 7 g dm⁻³; pH (CaCl₂) = 4,2; P (resina) = 13,0 mg dm⁻³; K⁺ = 2,0 mmolc dm⁻³; Ca²⁺ = 18 mmolc dm⁻³; Mg⁺² = 12,0 mmolc dm⁻³; H+Al = 21,0 mmolc dm⁻³ e CTC (capacidade de troca catiônica) = 85,0 mmolc dm⁻³; S = 18,0 mg dm⁻³; B = 0,25 mg dm⁻³; Cu = 3,5 mg dm⁻³; Fe = 12,0 mg dm⁻³; Mn = 4,5 mg dm⁻³; Zn = 1,6 mg dm⁻³; 82% de saturação por bases, classificação textural = franco argiloso arenoso (Embrapa, 2018), com 63,4% de areia, 32,3% argila e 4,3% de silte.

Na semeadura, adotou-se o espaçamento de 1,0 m entre linhas e 0,33 m entre plantas (30 mil plantas por hectare). Colocaram-se três sementes por cova e, aos 20 dias após a semeadura, realizou-se o desbaste, mantendo-se apenas uma planta por cova.

A adubação de plantio foi realizada aplicando-se as seguintes quantidades de N, P e K: 70, 30 e 80 kg ha⁻¹ respectivamente, como recomendado por De Sá et al.,

(2015). A adubação de cobertura, com aplicação de 50 kg N ha⁻¹, iniciou-se aos 40 dias após a semeadura, conforme recomendado por Da Eira et al., (2014). Realizaram-se cinco fertirrigações, em intervalos de sete dias, aplicando-se 10 kg N ha⁻¹ em cada uma.

1.2.3 Manejo da irrigação e obtenção de dados meteorológicos

Em cada parcela do experimento, o manejo da irrigação foi realizado utilizando-se tensiômetros instalados nas camadas de solo compreendidas entre 0-20 e 20-40 cm de profundidade, a fim de monitorar o conteúdo de água no solo. A camada de 0-20 cm foi utilizada para auxiliar a tomada de decisão acerca da lâmina correta e do momento ideal para realizar a irrigação, enquanto a camada de 20-40 cm foi utilizada para o controle da profundidade da lâmina aplicada. Instalaram-se dois tensiômetros por camada em cada parcela totalizando, assim, quatro tensiômetros por parcelas.

O manejo da irrigação foi realizado com base em cinco níveis de tensão da água no solo: 20, 30, 40, 50 e 60 kPa, correspondentes as parcelas I₁, I₂, I₃, I₄ e I₅, respectivamente. Cada vez que a tensão de água no solo atingia os valores correspondentes à condução de cada parcela realizava-se a irrigação no intuito de diminuir a tensão para 10 kPa – considerada o valor de tensão de água no solo quando este está na capacidade de campo (Embrapa, 2013). Isto foi possível devido à determinação prévia da curva de retenção de água no solo pelo método do extrator de Richards (Richards, 1965), sendo posteriormente ajustada pela equação de Genuchten (Genuchten, 1980) para as camadas de 0-20 cm e 20-40 cm (Equação 1). O ajuste da curva e a obtenção dos coeficientes θ_s , θ_r , α , m e n foram realizados com o auxílio do software Soil Water Curve Relation – SWRC, versão 3.0 (Dourado-Neto et al., 2000).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \Psi)^n]^m} \quad (1)$$

Em que:

θ = Conteúdo de água do solo (cm³ cm⁻³);

θ_r = Conteúdo de água residual (cm³ cm⁻³);

θ_s = Conteúdo de água na saturação (cm³ cm⁻³);

Ψ = Módulo do potencial mátrico (kPa); e
 α , n e m são os parâmetros empíricos do modelo.

Feito isto, elaborou-se a curva de retenção de água no solo, relacionando o potencial mátrico, em kPa, com a umidade no solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, para cada camada, como apresentada na Figura 2.

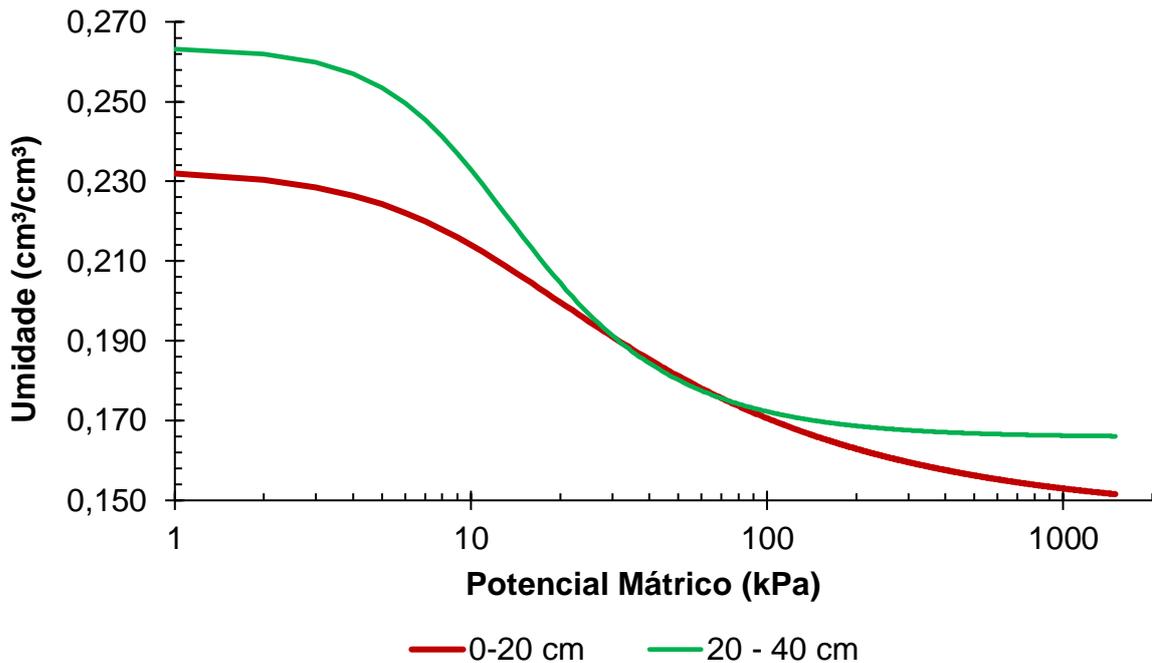


Figura 2. Curva de retenção de água no solo.

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento, com um tubo gotejador não autocompensante (Netafim - Typhoon Plus) para cada linha de plantio e as seguintes características: espaçamento de 20 cm entre emissores; vazão média de 1 L h^{-1} ; coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) de 95%; e pressão de operação de 10 mca.

A área molhada de cada emissor – determinada pelo teste do bulbo úmido diretamente em campo – foi de $0,08 \text{ m}^2$ (largura da faixa molhada de 0,4 m e comprimento de 0,2 m) e considerando 0-20 cm de camada do solo nos 45 primeiros dias após a sementeira, e 20-40 cm para o restante do ciclo. A intensidade média do sistema de irrigação – $12,5 \text{ mm h}^{-1}$ – foi determinada dividindo-se a vazão média de aplicação do sistema pela área molhada de cada emissor.

De posse das umidades correspondentes às tensões de 20, 30, 40, 50, 60 kPa, obtidas com auxílio da equação 1 para cada perfil do solo e a umidade correspondente à tensão de 10 kPa, definiram-se os seguintes tempos de irrigação: 27,9, 42,9, 51,9, 58,0 e 62,4 minutos, correspondentes as parcelas I₁, I₂, I₃, I₄, I₅, respectivamente, de acordo com as Equações 2, 3 e 4.

$$L_l = \frac{CC - U_a}{10} * d_a * Z \quad (2)$$

$$L_b = \frac{L_l}{E} \quad (3)$$

$$t = \frac{L_b}{I_s} \quad (4)$$

Em que:

L_l = Lâmina líquida (mm);

CC = Umidade a base de volume na capacidade de campo (10kPa);

U_a = Umidade a base de volume atual do solo (20, 30, 40, 50 e 60 kPa);

d_a = Densidade aparente do solo (1,0 g cm³);

Z = Profundidade (cm);

L_b = Lâmina bruta (mm);

E = Eficiência do sistema de irrigação (%);

t = Tempo de irrigação (h); e

I_s = Intensidade média do sistema de irrigação (mm h⁻¹).

A diferenciação das lâminas de irrigação nas parcelas iniciou-se aos 45 dias após a semeadura (DAS) e a suspensão da irrigação (dry-off) foi realizada em quatro épocas – 120, 130, 140 e 150 DAS – correspondentes as sub-parcelas A, B, C e D, respectivamente.

As variáveis meteorológicas de temperatura e radiação solar para analisar as condições climáticas de crescimento para cada um dos ciclos foram obtidas utilizando-se uma estação agrometeorológica modelo Campbell Scientific cr10x, instalada no interior da estufa, com um sensor HMP45C e um piranômetro para mensurar a temperatura do ar e radiação solar, respetivamente.

1.2.4 Delineamento Estatístico, épocas de cultivo e variáveis analisadas.

O delineamento estatístico adotado no presente estudo foi o de blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições (Figura 3).

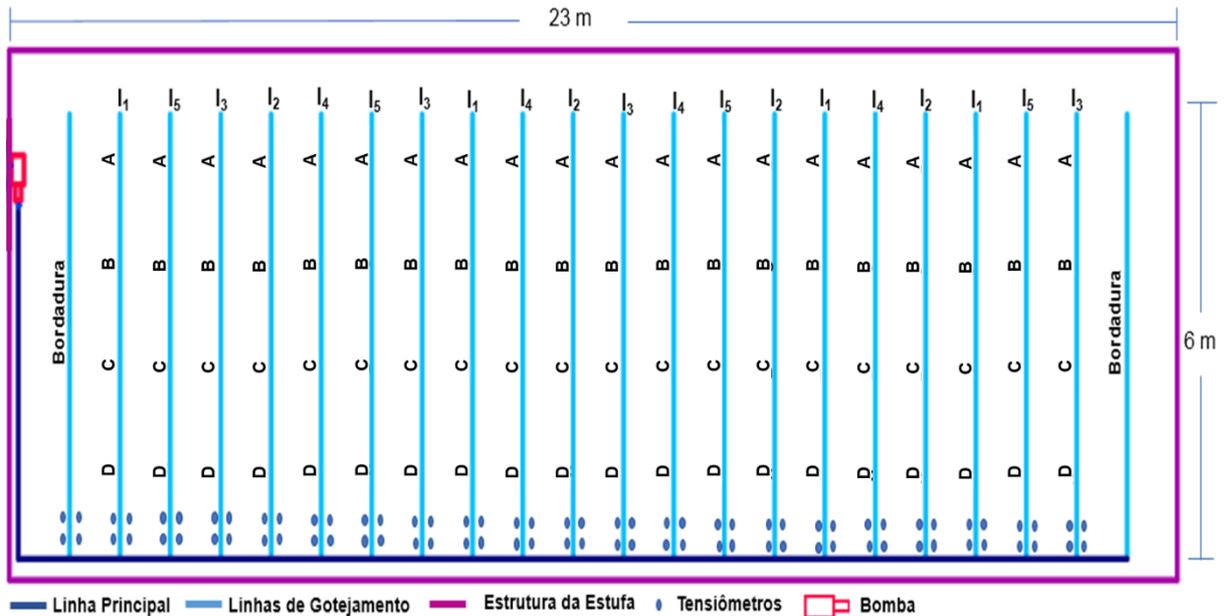


Figura 3. Delineamento experimental.

Nas parcelas foram alocadas as cinco tensões de água no solo – 20 (I_1), 30 (I_2), 40 (I_3) 50 (I_4) e 60 kPa (I_5) – e nas subparcelas as quatro épocas de suspensão da irrigação – 120 (A), 130 (B), 140 (C) e 150 (D) DAS totalizando, assim, 20 tratamentos (5 x 4).

O primeiro ciclo foi conduzido entre 01/01/2020 e 08/06/2020 (dias) e o segundo entre 23/03/2020 e 29/08/2020 (dias), totalizando 160 dias de ciclo da cultura. Como o segundo ciclo iniciou-se antes de finalizar o primeiro ciclo, estes foram realizados em estufas diferentes, mas com as mesmas dimensões, mesmo delineamento estatístico e no mesmo local.

As variáveis analisadas no presente estudo foram diâmetro da caule (obtido com auxílio de um paquímetro e mensurado a 0,1 m de altura do solo); altura da planta (determinada desde o nível do solo até a topo da planta, com auxílio de uma trena); número de racemos por planta (relação entre número total de racemos e o número

total de plantas); número de frutos por racemos (relação entre número total de cápsulas e o número total de racemos em cada planta); massa de 100 grãos (obtido por meio de uma balança digital com precisão de 4 casas decimais); produtividade de grãos (relação entre a massa dos grãos e a área cultivada, em kg ha^{-1}); produtividade de óleo em kg (óleo) ha^{-1} , determinada a partir da estimativa do teor de óleo, em %, por meio de ressonância magnética nuclear que mede a absorção de radiação eletromagnética de até 750 MHz pelos núcleos dos átomos, permitindo determinar, com precisão, o teor de óleo em sementes de mamona; e produtividade da água de irrigação (relação entre a massa de grãos, bem como de óleo, por unidade de volume de água utilizado, em kg m^{-3}).

Efetuaram-se análises da variância (ANOVA) das variáveis analisadas e, quando significativas, realizaram-se testes de Tukey para comparações entre médias, considerando o nível de significância de 5% ($P \leq 0,05$).

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Necessidade hídrica da cultura

As lâminas totais de água aplicadas em cada tratamento durante o primeiro e o segundo ciclo da mamona estão apresentadas na Figura 4.

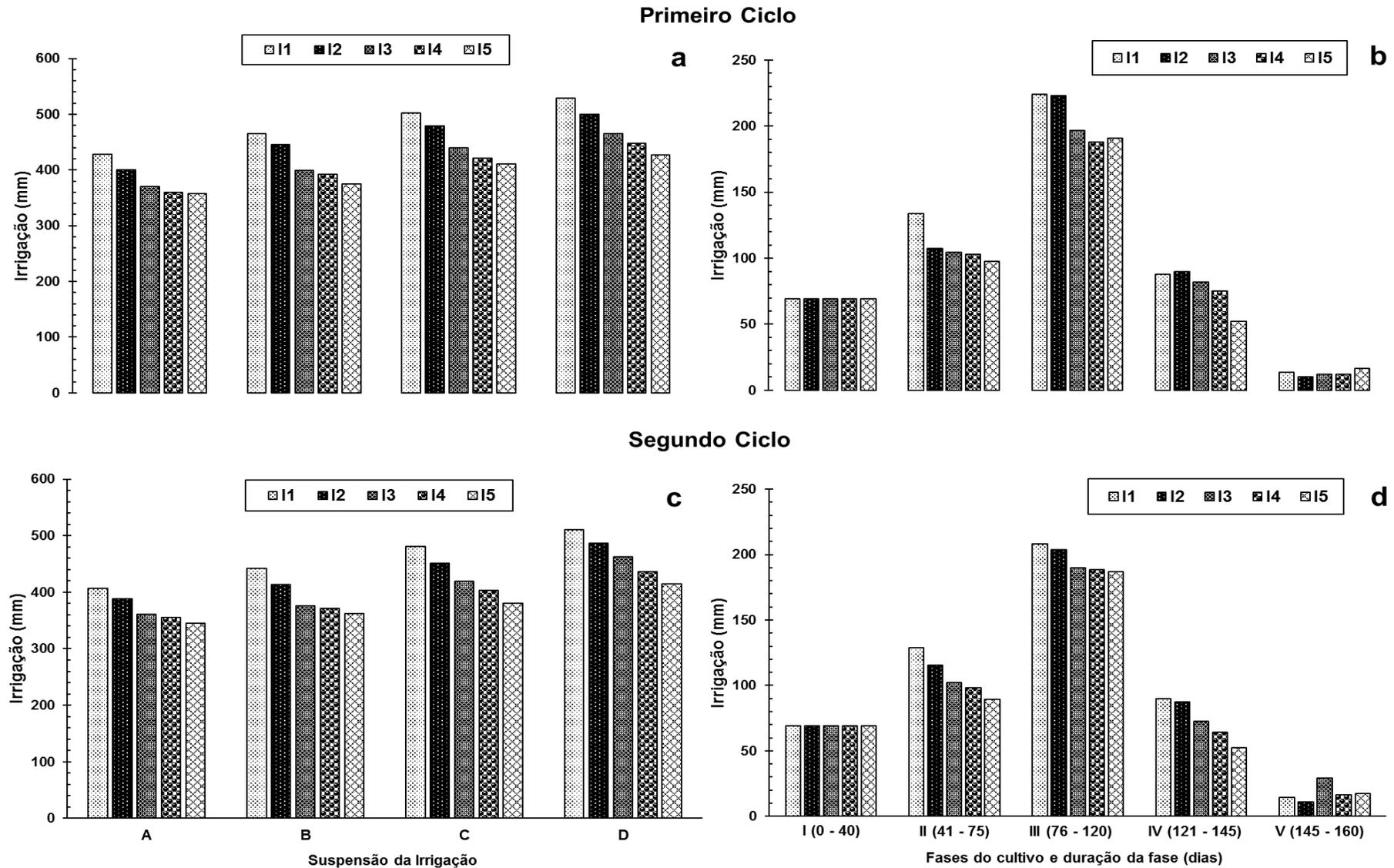


Figura 4. Necessidade hídrica da mamoneira cultivada em Botucatu/SP: (a) em diferentes épocas de suspensão da irrigação e tensão de água no solo, no primeiro ciclo; (b) em diferentes fases de cultivo e tensões de água no solo, no primeiro ciclo; (c) em diferentes épocas de suspensão da irrigação e tensão de água no solo, no segundo ciclo; e (d) em diferentes fases de cultivo e tensões de água no solo, no segundo ciclo.

Inicialmente, todas as parcelas receberam a mesma lâmina de irrigação durante a primeira fase de cultivo, compreendida entre 0 e 40 DAS, em ambos os ciclos (Figura 4b e 4d). As irrigações subsequentes foram realizadas de acordo com os diferentes níveis de tensão de água no solo.

As lâminas de irrigação foram maiores na tensão I_1 (20 kPa), em todas as sub-parcelas, e estes valores decresceram com o aumento da tensão de água no solo, como apresentado na Figura 4a e 4c. Para a sub-parcela com suspensão de irrigação aos 150 dias (D) no primeiro ciclo de cultivo (Figura 4a), observa-se que foram aplicados 528,9 mm na parcela I_1 e as parcelas I_2 , I_3 , I_4 e I_5 receberam lâminas 5,5, 12,1, 15,4 e 19,4% menores, respectivamente. Da mesma forma, para o segundo ciclo (Figura 4c), a parcela I_1 recebeu uma lâmina de 510,3 mm e, para as demais parcelas subsequentes, as lâminas foram 4,7, 9,3, 14,5 e 18,7% menores, respectivamente.

Na sub-parcela com suspensão de 120 dias (A) no primeiro ciclo (Figura 4a), a maior lâmina de irrigação foi de 427,7 mm para a parcela I_1 e as demais foram 6,5, 13,4, 15,8, 16,3% menores para I_2 , I_3 , I_4 e I_5 , respectivamente. Tal comportamento também ocorreu no segundo ciclo de cultivo (Figura 4c), no qual uma lâmina total de 406,2 mm foi aplicada em I_1 e as demais parcelas – I_2 , I_3 , I_4 e I_5 – apresentaram valores 4,5, 11,1, 12,4, 15% menores, respectivamente.

Rios et al. (2013), em estudo com a cultivar Al Guarany 2002, obtiveram uma necessidade hídrica da mamoneira irrigada por gotejamento de 486 mm, adotando-se o manejo de irrigação com base em uma tensão máxima de água no solo de 15 KPa, resultado próximo ao obtido no presente estudo, assim como o obtido por Dias et al. (2015), que estimaram valores de necessidade hídrica de 577,9 e 552,3 mm, em dois anos, para a variedade BRS Energia.

Beltrão e Severino (2006) recomendaram a necessidade de uma lâmina entre 450 a 600 mm durante o ciclo da cultura para obtenção de máximas produtividades. Já Patel et al. (1998) definiram que a necessidade hídrica da mamona varia de 466 a 1178 mm, a depender do tipo de solo, variedade e localização.

Observou-se, no segundo ciclo, uma leve diminuição nas lâminas de irrigação com relação às obtidas no primeiro ciclo, em todos os tratamentos. Tal fato pode estar associado às diferentes condições climáticas que ocorreram no local do experimento, durante os ciclos de cultivo. Na Figura 5 pode-se notar que, no segundo ciclo, tanto a radiação solar quanto a temperatura no interior da estufa apresentaram valores inferiores aos do primeiro ciclo.

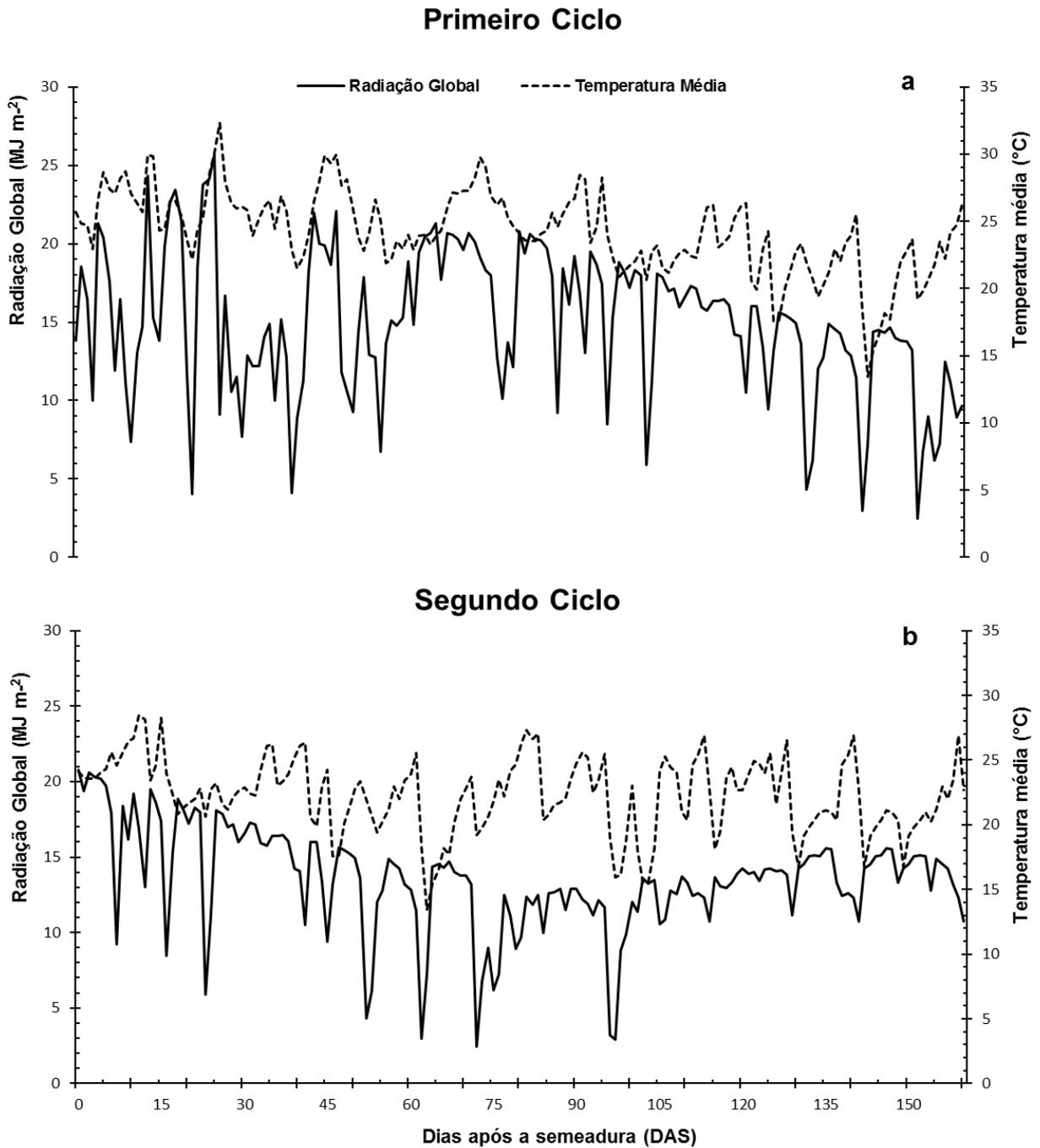


Figura 5. Radiação solar global e temperatura média do ar nos dois ciclos no cultivo da mamoneira em Botucatu/SP.

Durante o primeiro ciclo de cultivo, os valores médios de temperatura e radiação solar global foram iguais a 24,52 °C e 16,52 MJ m², respectivamente. Já no segundo ciclo, os valores médios foram de 21,34 °C e 11,30 MJ.m², para a temperatura e a radiação solar global, respectivamente. Ainda que os valores de temperatura foram menores no segundo ciclo, estes estão inseridos na faixa de temperatura – entre 20 e

30°C – recomendada por Moshkin (1986) como a ideal para o desenvolvimento da mamoneira.

Os fatores climáticos interferem em diversas reações químicas e biológicas das plantas, ocasionando um amplo impacto sobre as características de dois importantes processos para a planta: fotossíntese e fotorrespiração do vegetal (Taiz e Zeiger, 2015). Segundo Azevedo e Beltrão (2007), a maior taxa de fotossíntese líquida da cultura da mamoneira dar-se-á aos 23 °C.

Os maiores valores de temperatura e radiação solar global no primeiro ciclo demandaram maiores quantidades de irrigação, se comparadas ao segundo ciclo, haja vista que estes fatores climáticos influenciam diretamente a evapotranspiração da cultura.

1.3.2 Efeito das tensões de água no solo e das épocas de suspensão das irrigações nas características morfológicas e componentes de produção

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da ANOVA e dos testes de Tukey – ao nível 5% de probabilidade – para as variáveis analisadas neste estudo.

Para as variáveis diâmetro do caule e altura da planta, tanto a época de suspensão da irrigação, de forma isolada, quanto a interação entre as diferentes épocas de suspensão da irrigação e as tensões de água no solo não apresentaram resultados significativos em nenhum ciclo. Verifica-se diferença significativa apenas para as tensões de água no solo ($P \leq 0,05$), em ambos os ciclos, o que ocorreu a partir do aumento da tensão para 50 (I_4) e 60 KPa (I_5), reduzindo significativamente o diâmetro do caule e a altura das plantas da mamoneira. Rios et al. (2013) evidenciaram o mesmo comportamento metabólico em plantas da mamoneira quando a tensão do solo tendia a 75 KPa. Quanto maior a tensão, mais difícil para as plantas absorverem a solução aquosa presente no solo, por esta apresentar maior retenção nos poros capilares (LIBARDI, 2010). Afshar et al. (2015) e Litvin et al. (2016) evidenciaram que o estresse hídrico durante o estágio de crescimento vegetativo afeta a divisão celular e o alongamento celular, reduzindo assim o aumento do diâmetro e da altura da planta.

Tabela 1. Efeitos das tensões de água no solo (T) e dos períodos suspensão da irrigação (ESI) nas características morfológicas e componentes de produção da mamoneira, em dois ciclos de cultivo.

Primeiro Ciclo																						
Fatores	df	Diâmetro do caule (cm)					Altura da planta (cm)					Número de racemos por planta (un)					Número de frutos por racemos (un)					
		A	B	C	D	média	A	B	C	D	média	A	B	C	D	média	A	B	C	D	média	
I ₁		3,25	3,59	3,40	3,54	3,44 a	164,50	164,00	160,88	163,88	163,31 a	5,63	6,13	5,75	6,13	5,91	38,73	37,65	40,78	37,73	38,71 a	
I ₂		3,64	3,66	3,40	3,45	3,53 a	161,25	159,50	152,25	161,00	158,5 a	5,25	6,00	6,25	6,25	5,94	41,53	36,85	36,85	36,03	37,81 a	
I ₃		3,09	3,38	3,38	3,33	3,29 a	153,13	155,25	151,25	156,50	154,03 a	6,00	6,50	5,75	5,63	5,97	39,05	34,93	38,05	38,98	37,75 a	
I ₄		2,76	2,84	2,84	3,04	2,86 b	145,50	144,88	139,00	146,50	143,96 b	6,38	5,63	5,63	5,13	5,69	30,80	32,35	32,78	34,90	32,70 b	
I ₅		2,48	2,61	2,34	2,54	2,49 c	135,13	139,38	136,25	136,38	136,78 b	5,50	5,63	6,13	5,00	5,56	27,05	30,20	28,40	32,60	29,56 b	
média		3,04	3,22	3,07	3,18	3,13	151,90	152,60	147,93	152,85	151,32	5,75	5,98	5,90	5,63	5,81	35,43	34,40	35,37	36,05	35,31	
ANOVA																						
ESI	3					ns					ns					ns					ns	
T	4					*					*					ns						*
ESI x T	12					ns					ns					ns						ns
Segundo Ciclo																						
Fatores	df	Diâmetro do caule (cm)					Altura da planta (cm)					Número de racemos por planta (un)					Número de frutos por racemos (un)					
		A	B	C	D	média	A	B	C	D	média	A	B	C	D	média	A	B	C	D	média	
I ₁		3,48	3,40	3,38	3,42	3,42 a	120,43	118,48	119,83	122,95	120,42 a	4,60	5,33	5,13	5,03	5,02	37,73	39,15	38,78	34,63	37,56 a	
I ₂		3,39	3,35	3,43	3,37	3,38 a	117,15	121,38	119,93	121,20	119,91 a	4,88	5,38	4,75	4,90	4,98	38,75	35,35	37,65	34,83	36,64 a	
I ₃		3,25	3,25	3,32	3,30	3,28 a	117,23	118,28	115,25	116,95	116,92 a	4,83	4,85	5,00	4,85	4,88	35,55	36,13	37,75	36,48	36,47 a	
I ₄		2,58	2,64	2,60	2,56	2,59 b	107,10	109,28	106,70	106,90	107,49 b	4,20	5,20	5,15	4,70	4,81	28,43	32,55	32,08	32,40	31,36 b	
I ₅		2,28	2,32	2,32	2,31	2,31 c	97,38	96,78	95,55	98,58	97,06 b	4,75	5,10	4,73	4,85	4,86	25,58	28,73	27,70	29,90	27,97 c	
média		2,99	2,99	3,01	2,99	3,00	111,86	112,84	111,45	113,32	112,36	4,65	5,17	4,95	4,87	4,91	33,21	34,38	34,79	33,65	34,0	
ANOVA																						
ESI	3					ns					ns					ns						ns
T	4					*					*					ns						*
ESI x T	12					ns					ns					ns						ns

* $p < 0,05$; ns, não significativo.

As médias dentro de uma coluna que não compartilham a mesma letra diferem significativamente nos níveis ($P < 0,05$) de acordo com o teste de Turkey.

A altura da planta de mamona é altamente influenciada pelas condições do ambiente. Em solo com baixa fertilidade ou baixa umidade, as plantas atingem alturas entre 30–90 cm mas, em solo fértil e com boa umidade, pode atingir uma altura maior, dependendo da variedade cultivada (Kulkarni e Ramanamurthy, 1977). A mamoneira é considerada uma cultura tolerante às secas (Babita et al., 2010) e uma característica adotada para sobreviver em ambientes secos ou semiáridos é o maior desenvolvimento radicular, com crescimento da raiz pivotante, em detrimento ao crescimento da parte aérea, no intuito de alcançar camadas mais profundas de solo e poder extrair com maior eficiência a água disponível, tolerando por mais tempo o longo período de déficit hídrico (Freire et al., 2007).

Pode-se verificar na Tabela 1 que as épocas de suspensão da irrigação e os níveis de tensão de água no solo, bem como a interação entre eles, não ocasionaram efeito significativo no número de racemos por planta, em nenhum ciclo de cultivo.

Na cultura da mamoneira, não basta analisar somente o número de racemos produzidos por planta, mas também o número de frutos produzidas em cada racemo, considerado um importante componente de produção. Na mamoneira, o fruto é uma cápsula que possui três grãos, as quais contém o óleo comercial da cultura. Foi observada diferença significativa para o efeito das tensões de água no solo ($P \leq 0,05$) no número de frutos por racemos, entretanto, os efeitos da época de suspensão da irrigação e da interação épocas x tensões não foram significativos. As maiores quantidades de cápsulas por racemos foram 38,71 e 37,56 (primeiro e segundo ciclo, respectivamente), obtidos no tratamento I₁, enquanto as menores quantidades foram 29,56 e 27,97 (primeiro e segundo ciclo, respectivamente) obtidos no tratamento I₅, evidenciando que o aumento das tensões de água no solo ocasionou a diminuição do número de cápsulas por racemos.

O estudo conduzido por Freitas et al. (2010) corrobora com os resultados apresentados, haja vista que os autores relataram que ocorreu diminuição no número de cápsulas à medida em que se aumentou o estresse hídrico na mamoneira – fato também evidenciado por outros autores, em estudos com outros tipos de culturas oleaginosas (Bannayan et al., 2008).

O número de cápsulas é o principal componente do rendimento das espécies de mamona, e este depende fortemente do estado fisiológico e das condições ambientais da cultura durante o período de formação e enchimento dos grãos. Neste estudo, as maiores tensões de água no solo dificultam a absorção da água pelas plantas durante

o desenvolvimento floral, polinização e enchimento de grãos. Tal condição pode ter limitado o número de cápsulas por racemos, especialmente por ter ocasionado estresse hídrico durante o enchimento dos grãos (Rotundo e Westgate, 2010). Souza et al. (2007) também obtiveram resultados similares e, ainda, verificaram que na mamoneira irrigada e sem deficiência hídrica, o número de frutos por racemos aumentou 23 unidades quando comparado com um cultivo em sequeiro, sob deficiência hídrica.

Sarwar e Chaudhry (2008) relatam que, para uma determinada densidade de plantas, além do número de racemos por planta e o número de cápsulas por racemos, o rendimento da mamona depende também da análise do peso de cem grãos.

Os efeitos produzidos pelos diferentes tratamentos no peso de 100 grãos da mamoneira são apresentados na Tabela 2, nos dois ciclos de cultivo.

Tabela 2. Efeito de diferentes tensões de água no solo (T) e épocas de suspensão da irrigação (ESI) no peso de 100 grãos da mamoneira, em dois ciclos de cultivo.

Peso de 100 grãos (g)											
Fatores	df	Primeiro Ciclo					Segundo Ciclo				
		A	B	C	D	média	A	B	C	D	média
I ₁		34,96	35,65	35,01	35,66	35,32 a	34,58	35,86	35,46	35,85	35,43 a
I ₂		35,01	33,92	34,69	35,11	34,68 a	35,65	34,35	35,07	35,54	35,15 a
I ₃		35,20	34,05	34,15	34,39	34,44 a	35,74	34,53	34,50	35,19	34,99 a
I ₄		32,37	31,67	31,42	32,80	32,06 b	32,85	32,02	31,63	33,01	32,37 b
I ₅		28,78	29,49	29,82	31,19	28,76 c	28,76	29,54	30,99	31,66	30,24 c
média		33,26	32,96	33,83	33,27	33,51	33,91	33,26	33,53	34,25	33,64
ANOVA											
ESI	3					ns					ns
T	4					*					*
ESI x T	12					ns					ns

* $p < 0,05$; ns, não significativo.

As médias dentro de uma coluna que não compartilham a mesma letra diferem significativamente nos níveis $P \leq 0,05$ de acordo com o teste de Turkey.

Conforme a Tabela 2, apenas a variação da tensão de água no solo apresentou efeito significativo ($P \leq 0,05$) sobre o peso de 100 grãos. Em média, os maiores pesos dos grãos foram obtidos no tratamento I₁, que representa a menor tensão de água no solo (20 kPa). O maior decréscimo de peso – 18,57% – ocorreu no primeiro ciclo, com aumento da tensão de água no solo de 20 para 60 kPa. Rios et al. (2013) também observaram redução no peso de 100 grãos da mamoneira com o aumento da tensão de água no solo, e Ozer et al. (2020) e Mirzaei et al. (2013) encontraram diferença

estatisticamente significativa no peso de mil grãos de culturas oleaginosas submetidas a diferentes tratamentos de irrigação.

Na Tabela 3 são apresentados os efeitos produzidos pelos diferentes tratamentos nas produtividades de grãos e de óleo, nos dois ciclos de cultivo.

Tabela 3. Efeito de diferentes tensões de água no solo e épocas de suspensão da irrigação sobre as produtividades dos grãos e de óleo da mamoneira, em dois ciclos de cultivo.

Fatores	Produtividade dos grãos (Kg ha ⁻¹)				Produtividade de óleo (Kg ha ⁻¹)			
	Primeiro Ciclo							
	A	B	C	D	A	B	C	D
I ₁	4948,75 a A	5016,25 a A	5047,50 a A	5163,0 a A	1733,0 a A	1732,71 a A	1749,52 a A	1781,26 a A
I ₂	4657,25 ab A	4832,5 a A	4777,25 a A	4737,25 ab A	1595,14 ab A	1713,73 a A	1647,06 ab A	1635,52 ab A
I ₃	4701,25 ab A	4549,5 ab A	4612,50 ab A	4669,75 ab A	1594,9 ab A	1685,10 a A	1663,38 a A	1690,65 ab A
I ₄	4212,0 b A	4057,25 bc A	4058,0 b A	4336,0 b A	1469,03 b A	1407,64 b A	1432,84 bc A	1500,49 b A
I ₅	3436,0 c B	3677,5 c B	4132,25 b A	4264,0 b A	1184,76 c B	1262,8 b B	1406,67 c A	1480,55 b A
Segundo Ciclo								
I ₁	4328,88 a A	4361,77 a A	4343,13 a A	4488,43 a A	1515,38 a A	1495,07 a A	1536,25 a A	1535,54 a A
I ₂	4323,65 a A	4203,1 ab A	4326,55 a A	4240,23 ab A	1497,67 a A	1492,47 a A	1496,21 ab A	1530,19 a A
I ₃	4149,03 a A	4134,25 ab A	4224,35 ab A	4206,7 ab A	1466,79 a A	1488,49 a A	1487,24 ab A	1498,1 a A
I ₄	3467,13 b B	3954,8 bc A	3938,8 b A	4080,45 b A	1211,87 b B	1374,55 a A	1367,63 bc A	1415,83 ab A
I ₅	3385,9 b C	3585,33 c BC	3764,6 b AB	3833,3 b A	1163,43 b C	1227,43 b BC	1344,61 c AB	1370,32 b A

As médias dentro de uma coluna que não compartilham a mesma letra minúscula e dentro da mesma linha numa letra maiúscula diferem significativamente nos níveis $p < 0,05$ de acordo com o teste de Turkey.

Conforme a Tabela 3 observa-se que a cultura da mamoneira apresentou produtividades dos grãos mais elevadas no primeiro ciclo, alcançando 5163,0 kg ha⁻¹ (quando submetida à tensão I₁ e época D), do que no segundo ciclo, com produtividade máxima de 4488,43 kg ha⁻¹ (também submetida à tensão I₁ e época D). Provavelmente, isto ocorreu devido à maior radiação e temperatura média ocorrida durante o primeiro ciclo, o que propiciou uma maior atividade fotossintética.

Em média, considerando-se ambos os ciclos de cultivo, houve redução nas produtividades dos grãos e de óleo em cerca de 20% com o aumento das tensões de água no solo entre os tratamentos I₁ e I₅, ocasionando diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos I₄ e I₅, em algumas épocas de suspensão da irrigação.

As produtividades dos grãos e de óleo nos tratamentos I₁, I₂ e I₃ não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre si em nenhuma das épocas de suspensão de irrigação em ambos os ciclos. Reddy et al. (2004) salientam que qualquer fator que afete os processos de crescimento e desenvolvimento das

plantas irá afetar o desenvolvimento geral do dossel e, conseqüentemente, a produção.

Analisando estes resultados pode-se verificar que a aplicação adequada da lâmina de irrigação diminui as chances das plantas passarem por períodos de deficiência hídrica, evitando perdas de produção, e até mesmo aumentando a produtividade (Bernardo, 2006).

Assim como neste trabalho, Dias et al. (2015), José et al. (2014), Ramanjaneyulu et al. (2013) e Rios et al. (2013) evidenciaram que a produtividade dos grãos da mamoneira foi aumentado por aplicações de irrigação. Para a cultura da mamona, a água é o fator ambiental de maior impacto no crescimento, e o que mais influencia na produção de grãos, principalmente em regiões secas (Severino et al., 2012).

Os efeitos adversos do estresse hídrico são refletidos na redução do número de grãos quando este ocorre antes da antese (momento de maturação de uma flor), e na redução do peso da semente quando o estresse ocorre após a antese, particularmente durante o enchimento dos grãos (Rajala et al., 2011). Verificou-se, neste estudo, que o estresse hídrico ocorrido durante o enchimento dos grãos influenciou na redução do número de frutos e no peso dos grãos, o que, conseqüentemente, diminuiu a produtividade final.

O estresse hídrico contribui para o declínio da fotossíntese devido à maior resistência estomática e a menor eficiência bioquímica dos cloroplastos, o fechamento dos estomas e a diminuição da quantidade de carboidratos (Flexas et al., 2013; Reddy et al., 1996). Além disso, a deficiência hídrica diminui a área foliar ocasionando menor acúmulo de biomassa e partição prejudicada de matéria seca para órgãos generativos e vegetativos das plantas (Zhou et al., 2013).

A produtividade de óleo nas plantas de mamona variou de 1184,76 (tratamento I₅-A) a 1781,26 kg ha⁻¹ (tratamento I₁-D) no primeiro ciclo e de 1163,43 (tratamento I₅-A) a 1535,54 kg ha⁻¹ (tratamento I₁-D) no segundo ciclo. Observa-se que a maior produtividade de óleo foi obtida no tratamento I₁-D (menor tensão de água no solo e a suspensão mais tardia da irrigação), em ambos os ciclos.

No tratamento I₅, houve diminuição significativa na produtividade de óleo à medida que diminui-se a época de suspensão da irrigação, com o menor valor sendo obtido no tratamento I₅-A. Em média, a produtividade de óleo no tratamento I₁ foi 23,75 e 16,05% superior a produtividade no tratamento I₅, no primeiro e segundo ciclo, respectivamente.

De maneira geral, os componentes de produção foram afetados pelas diferentes lâminas de irrigação aplicadas, resultantes do manejo de irrigação com base na tensão de água no solo. A matriz de correlação entre as variáveis analisadas neste estudo é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Matriz de correlação entre as variáveis analisadas.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(1) Diâmetro	1	-	-	-	-	-	-
(2) Altura	0,759 *	1	-	-	-	-	-
(3) N° racemos	0,088	0,131	1	-	-	-	-
(4) N° frutos	0,585 *	0,547 *	-0,281	1	-	-	-
(5) Peso 100 grãos	0,651*	0,738*	0,238	0,412*	1	-	-
(6) Produtividade de grãos	0,649*	0,635*	0,208	0,668*	0,619*	1	-
(7) Produtividade de Óleo	0,647*	0,624*	0,217	0,661*	0,604*	0,984*	1

*A correlação é significativa no nível 0,05.

Conforme a Tabela 4, verifica-se que o aumento na produtividade de grãos e de óleo na mamoneira está correlacionado positivamente com o diâmetro, altura, número de cápsulas por racemos e o peso de 100 grãos. Esta relação possivelmente explica as maiores produtividades encontradas para os tratamentos submetidas às menores tensões de água no solo. Quanto menor a tensão, maior a frequência de irrigações e, conseqüentemente, maior a lâmina de água aplicada nos tratamentos, o que favoreceu o desenvolvimento da planta, alcançando maiores produtividades de grãos e de óleo.

Na Figura 6 são apresentadas as relações entre lâmina de irrigação e produtividade dos grãos (a) e lâminas de irrigação e produtividade de óleo (b) nos dois ciclos de cultivo.

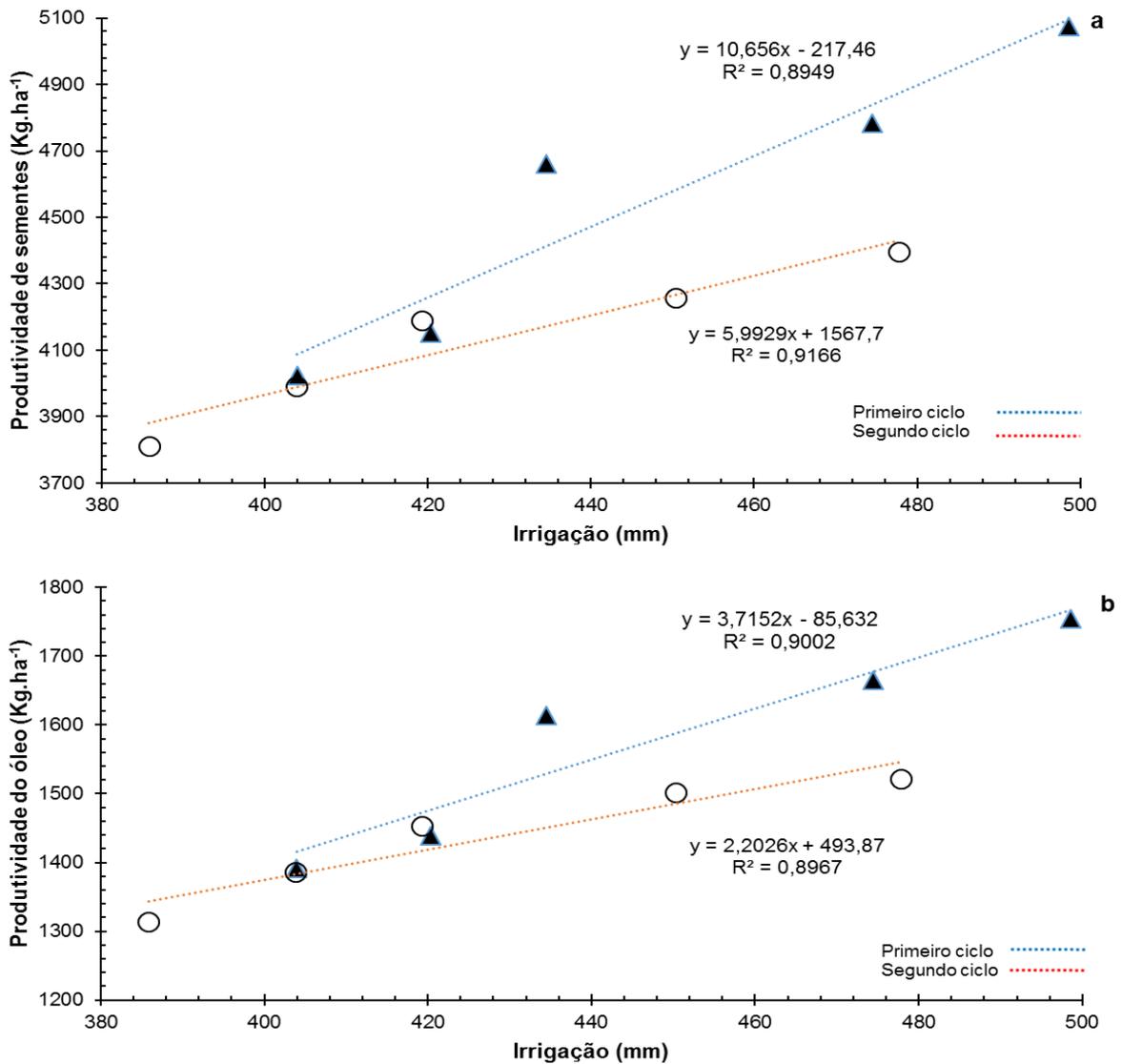


Figura 6. Relação entre lâmina de irrigação e produtividade dos grãos (a) e lâminas de irrigação e produtividade de óleo (b) nos dois ciclos de cultivo.

Observa-se, na Figura 6, que a produtividade de óleo em função das lâminas de irrigação aumentou seguindo-se a mesma tendência linear da produtividade dos grãos. A redução na produtividade de óleo com o aumento da tensão pode ser explicada por uma diminuição significativa na produção de grãos por unidade de área sob condições de estresse (Ozer et al., 2020). Tal fato pode ser confirmado observando-se a Tabela 4, na qual é apresentada correlação positiva entre o rendimento de grãos e o rendimento de óleo. De acordo com Neto et al. (2009) e Severino e Auld (2013), o aumento do estresse hídrico também gerou uma diminuição na produção de óleo da mamoneira.

1.3.3 Produtividade da água de irrigação relacionada à produtividade dos grãos e de óleo

As produtividades da água de irrigação, obtidas a partir dos valores de produtividade dos grãos e de óleo, em função de diferentes tensões de água no solo e épocas de suspensão da irrigação são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Produtividade da água de irrigação relacionada às produtividades dos grãos e de óleo de mamona, em dois ciclos de cultivo.

Tratamento	Produtividade da água nos grãos (Kg m ⁻³)				Produtividade da água no óleo (Kg m ⁻³)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Primeiro Ciclo								
I ₁	1,15 a A	1,07 ab AB	1,01 a B	0,97 a B	0,4052 a A	0,373 ab AB	0,3487 a B	0,335 a B
I ₂	1,18 a A	1,085 ab AB	0,998 a BC	0,947 a C	0,399 a A	0,385 ab AB	0,344 a BC	0,3272 a B
I ₃	1,23 a A	1,118 a A	1,047 a B	1,01 a B	0,431 a A	0,4227 a A	0,3782 a B	0,3635 a B
I ₄	1,14 a A	1,03 b B	0,962 a B	0,969 a B	0,407 a A	0,3593 b B	0,3337 a B	0,335 a B
I ₅	0,96 b A	0,9825 b A	1,075 a A	0,945 a A	0,33 b A	0,3365 b A	0,349 a A	0,3272 a A
Segundo Ciclo								
I ₁	1,067 a A	0,985 b AB	0,9 b BC	0,88 a C	0,361 a A	0,336 a A	0,315 a B	0,303 a B
I ₂	1,113 a A	1,02 ab B	0,95 ab B	0,87 a C	0,368 a A	0,356 a A	0,33 a AB	0,309 a B
I ₃	1,15 a A	1,102 a A	1,0 a B	0,91 a C	0,384 a A	0,367 a A	0,345 a AB	0,317 a B
I ₄	0,975 b A	1,06 ab B	0,97 ab B	0,925 a B	0,298 b B	0,338 a A	0,318 ab AB	0,306 a B
I ₅	0,98 b A	0,99 b A	0,98 ab A	0,93 a A	0,287 b B	0,30 b B	0,316 ab A	0,310 a A

* $p < 0,05$; ns, não significativo.

As médias dentro de uma coluna que não compartilham a mesma letra minúscula e dentro da mesma linha numa letra maiúscula diferem significativamente nos níveis $p < 0,05$ de acordo com o teste de Turkey.

Os valores de produtividade da água em relação aos grãos aumentaram significativamente ($P \leq 0,05$) à medida em que se reduziu a época de suspensão da irrigação em ambos os ciclos, à exceção do tratamento I₅.

Por sua vez, os valores de produtividade da água em relação ao óleo também aumentaram significativamente ($P \leq 0,05$) à medida em que se reduziu a época de suspensão da irrigação em ambos os ciclos, à exceção do tratamento I₅ no primeiro ciclo e dos tratamentos I₄ e I₅ no segundo ciclo. Ao contrário do observado anteriormente, a produtividade de água no óleo, para o tratamento I₅, no segundo ciclo, diminuiu significativamente com a redução da época de suspensão da irrigação.

Os valores mais altos de produtividade da água relacionada à produção de grãos foram observados no tratamento I₃-A, em ambos os ciclos, com um valor médio entre os ciclos de 1,19 kg m⁻¹; e os valores mais baixos foram registrados no tratamento I₁-

D e I₂-D com valores de 0,88 e 0,87 kg m⁻¹, respectivamente, ambos no segundo ciclo. O tratamento que apresentou os melhores resultados de produtividade da água para cada época de suspensão da irrigação foi o tratamento I₃.

Na Figura 7 são apresentadas as relações entre as produtividades da água de irrigação referentes às produtividades de grãos e de óleo, e os valores de tensão de água no solo, nos dois ciclos de cultivo.

Pode-se observar, na Figura 7, que não houve aumento linear da produtividade da água em relação aos grãos e ao óleo, nos tratamentos com variação na tensão de água no solo.

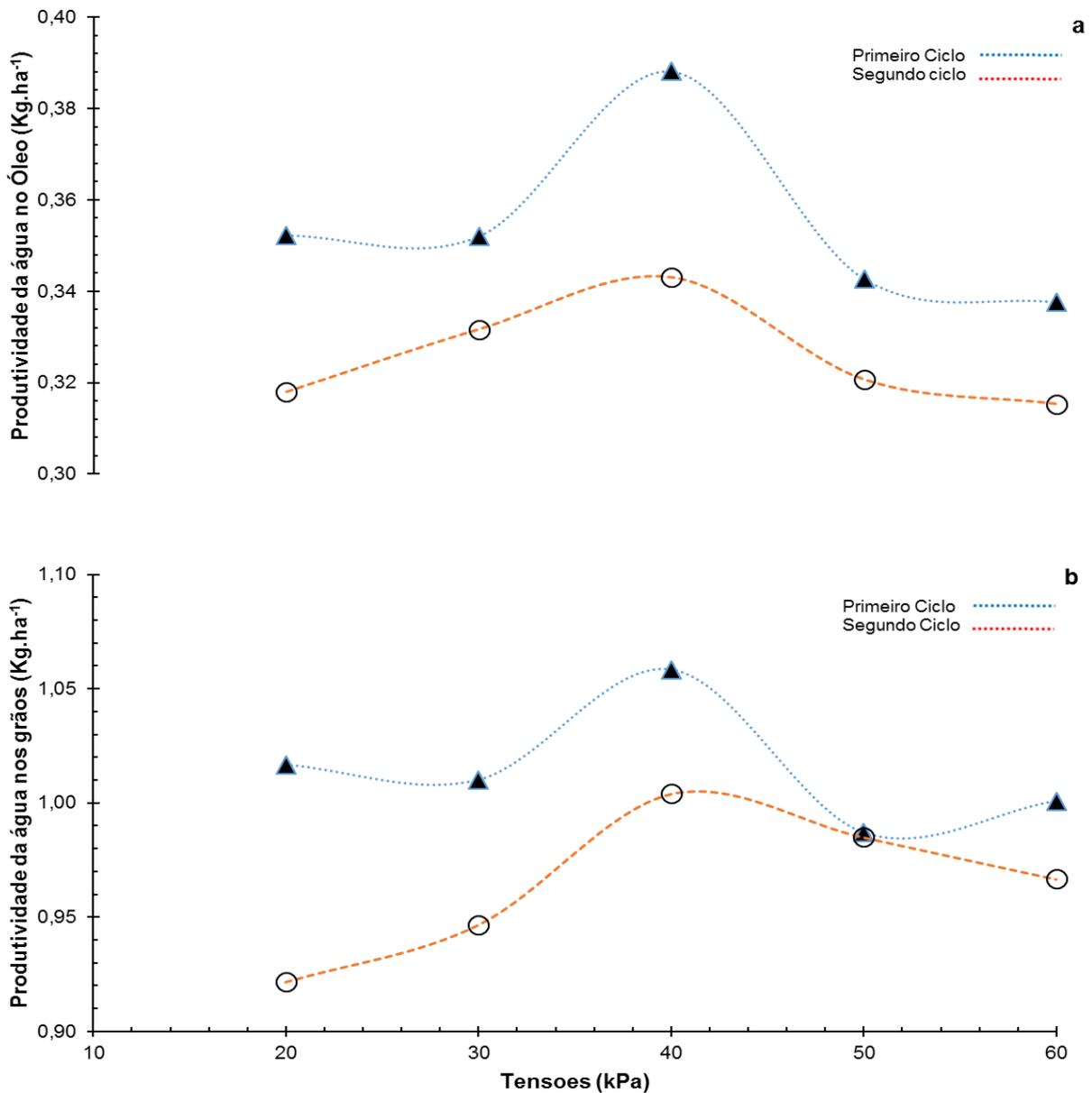


Figura 7. Produtividade da água de irrigação em relação às produtividades dos grãos e de óleo, e os valores de tensão de água no solo.

Estes resultados evidenciam que o ponto ideal para obtenção da melhor produtividade da água na cultura da mamoneira resulta do manejo da irrigação sob uma tensão de água no solo de 40kPa. Os menores valores de produtividade da água foram obtidos nos tratamentos com as menores tensões (devido ao aumento excessivo nas lâminas totais de irrigação), e com as maiores tensões (devido à redução na produtividade ocasionada pela deficiência hídrica sofrida pelas plantas).

Entretanto, como demonstrado anteriormente, as maiores produtividades de grãos e de óleo foram alcançadas com aplicação das maiores lâminas de irrigação. Dessa forma, levando-se em consideração um cultivo mais sustentável e com economia de recursos, o ideal é diminuir a quantidade de irrigação até o ponto em que a produtividade não seja significativamente comprometida (como aconteceu no tratamento I₃) e assim aumentar a produtividade da água.

Altos valores de produtividade da água são desejáveis evidenciando, assim, a diminuição da quantidade de água utilizada para produzir cada grama do produto comercial e desta forma melhorar a eficiência do uso da água. Raj et al. (2010) e Sharma et al. (2010) observaram aumento significativo da produtividade da água e da eficiência do uso da água com o aumento do uso da irrigação suplementar na cultura da mamoneira devido às maiores perdas de produção em níveis aumentados de estresse hídrico.

Em contraste, Ramanjaneyulu et al. (2010) e Ramanjaneyulu et al. (2013) observaram valores significativamente mais elevados para a produtividade da água calculada a partir da produção de grãos e de óleo de mamona em regime seco do que regime úmido, devido à menor quantidade de água utilizada no regime seco do que no regime úmido, sem que a produtividade fosse comprometida.

1.4 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que a mamoneira é uma planta sensível ao estresse hídrico, haja vista as reduções significativas no diâmetro do caule, na altura das plantas, no número de frutos por racemo, no peso de 100 grãos, na produtividade dos grãos e na produtividade de óleo com o aumento das tensões de água no solo.

As produtividades médias dos grãos e de óleo em condições de menor tensão de água no solo e maior época de suspensão de irrigação foram significativamente

maiores do que as produtividades nos tratamentos com a maior tensão e menor época de suspensão da irrigação.

As práticas de irrigação que mantêm a tensão de água no solo correspondente à capacidade de campo podem ser uma estratégia de irrigação potencial para obter maiores produtividades dos grãos e de óleo no Brasil, em regiões sem limitação de utilização dos recursos hídricos. No entanto, as práticas de irrigação nas tensões de 40 KPa com época de suspensão da irrigação de 120 dias proporcionaram maior produtividade da água, evidenciando-se uma prática de manejo da irrigação mais eficiente em regiões produtoras com pouca disponibilidade hídrica.

REFERÊNCIAS

- Afshar, R.K., Chaichi, M.R., Alipour, A., Jovini, M.A., Dashtaki, M., Hashemi, M., 2015. Potential of milk thistle for biomass production in semiarid regions. *Crop Sci.* <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.10.0678>
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift.* <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Auld, D.L., Rolfe, R.D., McKeon, T.A., 2001. Development of Castor with Reduced Toxicity. *J. New Seeds.* https://doi.org/10.1300/J153v03n03_03
- Azevedo, D.M.P., Beltrão, N.E.M., 2007. O agronegócio da mamona no Brasil. (No. 2. ed. rev. amp. Campina Grande), Embrapa Informação Tecnológica. Brasília.
- Babita, M., Maheswari, M., Rao, L.M., Shanker, A.K., Rao, D.G., 2010. Osmotic adjustment, drought tolerance and yield in castor (*Ricinus communis* L.) hybrids. *Environ. Exp. Bot.* 69, 243–249. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.006>
- Bannayan, M., Nadjafi, F., Azizi, M., Tabrizi, L., Rastgoo, M., 2008. Yield and seed quality of *Plantago ovata* and *Nigella sativa* under different irrigation treatments. *Ind. Crops Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.05.002>
- Barros Junior, G., Guerra, H.O.C., Cavalcanti, M.L.F., Lacerda, R.D. de, 2008. Consumo de água e eficiência do uso para duas cultivares de mamona submetidas a estresse hídrico. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* <https://doi.org/10.1590/s1415-43662008000400003>
- Beltrão, N.E.M., Severino, L.S., 2006. Mamona: o produtor pergunta e a Embrapa responde., Coleção 500 perguntas e 500 respostas. Brasília.
- Bernardo, S., 2006. Manejo da irrigação na cana-de-açúcar. *Rev. Irrig. Tecnol. Mod. – ITEM.*
- Da Eira, A.T.A., Gonçalves, C., Guidetti, M.Z.P., T., S.M.L., Ferreira, C.E., 2014. Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas (No. 200), 7. Campinas.
- De Sá, R.O., Galbieri, R., Bélot, J., Zanotto, M.D., Dutra, S.G., Severino, L.S., Silva, C.J., 2015. Mamona: opção para rotação de cultura visando a redução de nematoides de galha no cultivo do algodoeiro., Circular técnica, 15. Cuiabá.
- Dias, J.M., Azevedo, P.V. de, Bezerra, J.R.C., Beltrão, N.E. de M., Oliveira, G.D.S., Cavalcanti, M.I.P., 2015. CONSUMO HÍDRICO E COEFICIENTE DE CULTIVO DA MAMONEIRA, CULTIVAR BRS ENERGIA. IRRIGA.

- <https://doi.org/10.15809/irriga.2015v20n3p429>
- Dourado-Neto, D., Nielsen, D.R., Hopmans, J.W., Reichardt, K., Bacchi, O.O.S., 2000. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). *Sci. Agric.* <https://doi.org/10.1590/s0103-90162000000100031>
- Embrapa, 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos, Embrapa Solos.
- Embrapa, 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos, Embrapa Solos.
- Flexas, J., Niinemets, Ü., Gallé, A., Barbour, M.M., Centritto, M., Diaz-Espejo, A., Douthe, C., Galmés, J., Ribas-Carbo, M., Rodriguez, P.L., Rosselló, F., Soolanayakanahally, R., Tomas, M., Wright, I.J., Farquhar, G.D., Medrano, H., 2013. Diffusional conductances to CO₂ as a target for increasing photosynthesis and photosynthetic water-use efficiency. *Photosynth. Res.* <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9844-z>
- Freire, E.C., Lima, E.F., Andrade, F.P., Milani, M., Nóbrega, M.B. de M., 2007. Melhoramento genético., in: Azevedo, D.M.P. de; Beltrão, N.E. de M. (Eds.), *O Agronegócio Da Mamona No Brasil*. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, pp. 169–194.
- Freitas, C.A.S. de, Bezerra, F.M.L., Silva, A.R.A. da, Pereira Filho, J. V., Feitosa, D.R.C., 2010. Comportamento de cultivares de mamona em níveis de irrigação por gotejamento em Pentecoste, CE. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* <https://doi.org/10.1590/s1415-43662010001000006>
- Kulkarni, L.G., Ramanamurthy, G. V, 1977. *Castor (Revised edition)*. Indian Counc. Agric. Res.
- Libardi, P., 2010. *Água No Solo. Física do solo*.
- Litvin, A.G., Van Iersel, M.W., Malladi, A., 2016. Drought stress reduces stem elongation and alters gibberellin-related gene expression during vegetative growth of tomato. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* <https://doi.org/10.21273/JASHS03913-16>
- Mirzaei, A., Naseri, R., Moghadam, A., Esmailpour-jahromi, M., 2013. The Effects of Drought Stress on Seed yield and Some Agronomic Traits of Canola cultivars at Different Growth stages 2, 115–121.
- Moshkin, V.A., 1986. *Castor*. Kolos Publisher, Moscow.
- Neto, M.A.D., Alves Fernandes Távora, F.J., Crisóstomo, L.A., Toscano Diniz, B.L.M., 2009. Adubação NPK e épocas de plantio para mamoneira. I - Componentes da produção e produtividade. *Rev. Cienc. Agron.*
- Ozer, H., Coban, F., Sahin, U., Ors, S., 2020. Response of black cumin (*Nigella sativa* L.) to deficit irrigation in a semi-arid region: Growth, yield, quality, and water productivity. *Ind. Crops Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112048>
- Patel, B.D., Maliwal, G.L., Dudhatra, N.P., Kaswala, R.R., Patel, P.U., Raman, S., Patel, M., 1998. Effect of drip irrigation on yield and water expense efficiency of castor. *Gujarat Agric. Univ. Res. J.* 24, 86–88.
- Raj, A.D., Patel, B.S., Mehta, R.S., 2010. Effect of irrigation methods on growth and economics of hybrid varieties of castor. *Indian J. Agric. Sci* 80, 795–800.
- Rajala, A., Hakala, K., Mäkelä, P., Peltonen-Sainio, P., 2011. Drought Effect on Grain Number and Grain Weight at Spike and Spikelet Level in Six-Row Spring Barley. *J. Agron. Crop Sci.* <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2010.00449.x>
- Ramanjaneyulu, A. V., Ramprakash, T., Vishnuvardhan Reddy, A., 2010. Effect of sowing date and irrigation scheduling on yield and economics of winter castor in Southern Telangana Zone of Andhra Pradesh. *J. Oilseeds Res.* 27, 180–181.
- Ramanjaneyulu, A. V., Reddy, A.V., Madhavi, A., 2013. The impact of sowing date

- and irrigation regime on castor (*Ricinus communis* L.) seed yield, oil quality characteristics and fatty acid composition during post rainy season in South India. *Ind. Crops Prod.* 44, 25–31.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.10.008>
- Reddy, A.R., Reddy, K.R., Padjung, R., Hodges, H.F., 1996. Nitrogen nutrition and photosynthesis in leaves of pima cotton. *J. Plant Nutr.*
<https://doi.org/10.1080/01904169609365158>
- Reddy, K.R., Koti, S., Davidonis, G.H., Reddy, V.R., 2004. Interactive effects of carbon dioxide and nitrogen nutrition on cotton growth, development, yield, and fiber quality. *Agron. J.* 96, 1148–1157. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1148>
- Richards, L.A., 1965. Physical conditions of water in soil, in: BLACK, C.A., EVANS, D.D., WHITE, J.L., CLARK, F.E. (Eds.), *Methods of Soil Analysis - Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurements and Sampling.* ASA/SSSA, Madison, pp. 128–152.
- Rios, G.F.A., de Carvalho, L.G., Silva, B.M., da Silva, W.G., Rezende, F.C., Pereira, G.M., 2013. Component production of castor bean crop irrigated by different soil water tensions. *Agric. Water Manag.* 127, 7–12.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.05.007>
- Rotundo, J.L., Westgate, M.E., 2010. Rate and duration of seed component accumulation in water-stressed soybean. *Crop Sci.*
<https://doi.org/10.2135/cropsci2009.05.0240>
- Sarwar, G., Chaudhry, M.B., 2008. Short communication. Evaluation of castor (*Ricinus communis* L.) induced mutants for possible selection in the improvement of seed yield. *Spanish J. Agric. Res.*
<https://doi.org/10.5424/sjar/2008064-366>
- Severino, L.S., Auld, D.L., 2013. Seed yield and yield components of castor influenced by irrigation. *Ind. Crops Prod.* 49, 52–60.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.04.012>
- Severino, L.S., Auld, D.L., Baldanzi, M., Cândido, M.J.D., Chen, G., Crosby, W., Tan, D., He, X., Lakshamma, P., Lavanya, C., Machado, O.L.T., Mielke, T., Milani, M., Miller, T.D., Morris, J.B., Morse, S.A., Navas, A.A., Soares, D.J., Sofiatti, V., Wang, M.L., Zanotto, M.D., Zieler, H., 2012. A review on the challenges for increased production of castor. *Agron. J.* 104, 853–880.
<https://doi.org/10.2134/agronj2011.0210>
- Sharma, B.R., Rao, K. V., Vittal, K.P.R., Ramakrishna, Y.S., Amarasinghe, U., 2010. Estimating the potential of rainfed agriculture in India: Prospects for water productivity improvements. *Agric. Water Manag.*
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.002>
- Souza-Schlick, G.D. de, Soratto, R.P., Pasquali, C.B., Fernandes, A.M., 2011. Desempenho da mamoneira IAC 2028 em função do espaçamento entre fileiras e população de plantas na safrinha. *Bragantia.* <https://doi.org/10.1590/s0006-87052011000300006>
- Souza-schlick, G.D., Soratto, R.P., Bottino, D., Fernandes, A.M., 2012. Growth and productivity of small castor bean in different plant spacing and population densities. *Interciencia* 37, 49–54.
- Souza, A dos S, Távora, F.J.A.F., Pitombeira, J.B., Bezerra, F.M.L., 2007. Planting time and irrigation management for castor plant . II – effect on growth and productivity. *Rev. Ciên. Agron.*, 38, 422–429.
- Souza, A. dos S, Távora, F.J.A.F., Pitombeira, J.B., Bezerra, F.M.L., 2007. Épocas de plantio e manejo da irrigação para a mamoneira. I - componentes de

- produção. *Rev. Ciência Agronômica* 38, 414–421.
- Taiz, L., Zeiger, E., 2015. *Plant Physiology (Sixth Edition)*, Sinauer Associates.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*
<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Veríssimo, M.A.A., Silva dos A, S.D., Stähelin, D., Morais, P.P.P., Coimbra, J.L.M., Guidolin, A.F., 2009. Rendimento de grãos de genótipos de mamona em épocas de semeadura, no planalto catarinense. *J. Agron. e Veterinária Ciências* 8, 129–138.
- Zhou, S., Duursma, R.A., Medlyn, B.E., Kelly, J.W.G., Prentice, I.C., 2013. How should we model plant responses to drought? An analysis of stomatal and non-stomatal responses to water stress. *Agric. For. Meteorol.*
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.05.009>

CAPÍTULO 2

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE CULTURA (Kc) EM MAMONA DE PEQUENO PORTE²

RESUMO

A mamoneira tem sido uma importante cultura agroindustrial para o Brasil. A estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) é de suma importância na agricultura, principalmente na agricultura irrigada, pois permite maximizar o manejo das irrigações e o planejamento dos recursos hídricos. Os coeficientes de cultura (K_c) são utilizados para estimar a ET_c específica de uma cultura. Informações precisas sobre o K_c das novas variedades de mamoneira são necessárias para uma boa programação das irrigações ao longo do ciclo da cultura. O objetivo deste estudo foi estimar a ET_c para a mamoneira irrigada em estufa, cultivar AG IMA 110204 (*Ricinus communis* L.), a fim de determinar os K_c que, posteriormente, podem ser utilizados em modelos matemáticos para monitorar o uso da água pela cultura, com o auxílio de dados climáticos. O estudo foi realizado durante dois ciclos de cultivo, a saber: 01/01/2020 até 10/06/2020 e 22/03/2020 até 29/08/2020. A ET_c diária variou, em média, entre 1,7 e 4,4 mm no primeiro ciclo e entre 1,7 e 3,8 mm no segundo ciclo, atingindo valores totais da ordem de 465 e 450,1 mm no primeiro e segundo ciclo, respectivamente. Os valores médios de K_c da mamoneira determinados neste estudo foram de 0,42 para a fase inicial (0-40 dias após a semeadura - DAS); 0,69, para a fase de crescimento (40-75 DAS); 1,2 para a fase intermediária (75-120 DAS); e de 0,97 para a fase de maturação (120-150 DAS). A partir dos valores de K_c determinados neste experimento para o híbrido AG IMA 110204, é possível estimar a necessidade hídrica, por meio do balanço hídrico climático, para esta região de estudo e outras regiões com características climáticas similares.

Palavras-Chaves: Tensiometria; Dados Agrometeorológicos; *Ricinus communis* L.

²Capítulo submetido na revista Agricultural Water Management

ABSTRACT

Castor bean has been an important agro-industrial crop in Brazil. Estimation of crop evapotranspiration (ET_c) is of paramount importance in agriculture, especially in irrigated agriculture, as it allows maximizing irrigation management and water resources planning. Crop coefficients (K_c) are used to estimate the specific ET_c of a crop. Precise information about the K_c of new castor bean varieties is necessary for a good irrigation schedule throughout the crop cycle. The aim of this study was to estimate the ET_c for greenhouse irrigated castor bean, cultivar AG IMA 110204 (*Ricinus communis* L.), in order to determine the K_c that, later, can be used in mathematical models to monitor water use by the crop, with the help of climate data. The study was carried out during two cultivation cycles, namely: 01/01/2020 to 06/10/2020 and 03/22/2020 to 08/29/2020. The daily ET_c varied, on average, between 1.7 and 4.4 mm in the first cycle and between 1.7 and 3.8 mm in the second cycle, reaching total values in the order of 465 and 450.1 mm in the first and second cycle, respectively. The mean K_c values of castor bean determined in this study were 0.42 for the initial phase (0-40 days after sowing - DAS); 0.69, for the growth phase (40-75 DAS); 1.2 for the intermediate phase (75-120 DAS); and 0.97 for the maturation phase (120-150 DAS). From the K_c values determined in this experiment for the hybrid AG IMA 110204, it is possible to estimate the water requirement, through the climatic water balance, for this study region and other regions with similar climatic characteristics.

Keywords: Tensiometry; Agrometeorological data; *Ricinus communis* L.

2.1 INTRODUÇÃO

A mamona (*Ricinus communis* L.) é uma planta da espécie das oleaginosas, pertencente à família Euphorbiaceae, encontrada em muitas regiões do mundo e cultivada desde os tempos das civilizações antigas, sendo uma espécie rústica e tolerante à seca. De suas sementes é extraído um óleo que possui inúmeras aplicações no setor industrial, com potencial para ser utilizado também como fonte energética, principalmente na produção de biocombustível (Severino et al., 2012).

A expansão de seu cultivo ocorreu, principalmente, devido à capacidade de adaptação a diferentes condições climáticas. Submetida ao déficit hídrico, por exemplo, a cultura apresenta uma elevada eficiência na transformação da água utilizada, com relação à produção de fitomassa, o que permite a produção, mesmo reduzida, em condições de baixas precipitações e altas temperaturas (Barros Junior et al., 2008).

Para atender à demanda mundial de alimentos e o crescimento contínuo do setor energético faz-se necessário aumentar a produtividade atual. Ainda que tolerante à escassez hídrica, a mamoneira, assim como as demais espécies, necessita de um adequado suprimento de água para potencializar sua produtividade. Segundo Freitas et al. (2010), a mamona necessita de 400 a 600 mm durante seu ciclo de produção, apresentando um consumo diário que varia de acordo com o estágio de desenvolvimento da planta. Tal fato evidencia a necessidade de determinar as lâminas ideais de aplicação de água no solo, durante suas fases fenológicas, a fim de que essas lâminas sejam compatíveis com a capacidade de consumo de água pela planta, evitando, dessa forma, condições de déficit hídrico e também de desperdício de recursos. Por esta razão, a agricultura irrigada tem investido em estudos de manejo da irrigação, no intuito de evitar perdas na lavoura e maximizar a produtividade das culturas.

Quando se tem o objetivo de aumentar a eficiência do uso da água na agricultura, o conhecimento da evapotranspiração das culturas (ET_c) é importante para determinar a quantidade correta de água que deve ser aplicada diariamente na cultura. Para estimar a ET_c existem várias metodologias disponíveis, sendo uma destas amplamente aceita e recomendada pela FAO (Allen et al., 1998), que inclui a quantificação da demanda atmosférica, por meio do cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o), e a incorporação das características da cultura para cada fase

fenológica por meio de um coeficiente denominado coeficiente de cultura (K_c) (Doorenbos e Kassam, 1979).

Doorenbos e Kassam (1979) sugerem valores de K_c para mamona de 0,35, 1,15 e 0,55 para as fases de estabelecimento, desenvolvimento vegetativo e maturação, respectivamente. Os valores de K_c recomendados na literatura devem ser utilizados quando não houverem valores na região onde a cultura vai ser instalada, uma vez que a condição climática na qual a cultura será submetida no campo difere da condição padrão de diversos estudos, por isto, existe uma forte necessidade de calibração local dos coeficientes de cultura (Pereira e Allen, 1997). Centeno et al. (2012) obtiveram um K_c de 0,29 na fase de estabelecimento da mamona, cultivar BRS Energia. Já Dias et al. (2015) encontraram valores de 0,72; 0,92; 1,00; 1,17 e 0,92, para o ano de 2005 e 0,76; 0,93; 1,00; 1,20 e 0,92, para o ano de 2006 para as fases de estabelecimento, desenvolvimento da cultura, meia estação, final da estação e colheita, respectivamente.

Os estudos mencionados anteriormente enfatizam a necessidade da determinação dos coeficientes de cultura da mamona, haja vista que estes estão diretamente relacionados às condições climáticas e às cultivares, evidenciando a importância deste estudo em estimar a ET_c e determinar os K_c da mamona, cultivar AG IMA 110204, para o Brasil.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Área de estudo

Este trabalho foi conduzido em ambiente protegido, localizada na região Centro Sul do Estado de São Paulo, na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA), da Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Botucatu, nas coordenadas geográficas 22°51'6.12" S e 48°25'45.44" O, conforme observa-se na Figura 1.

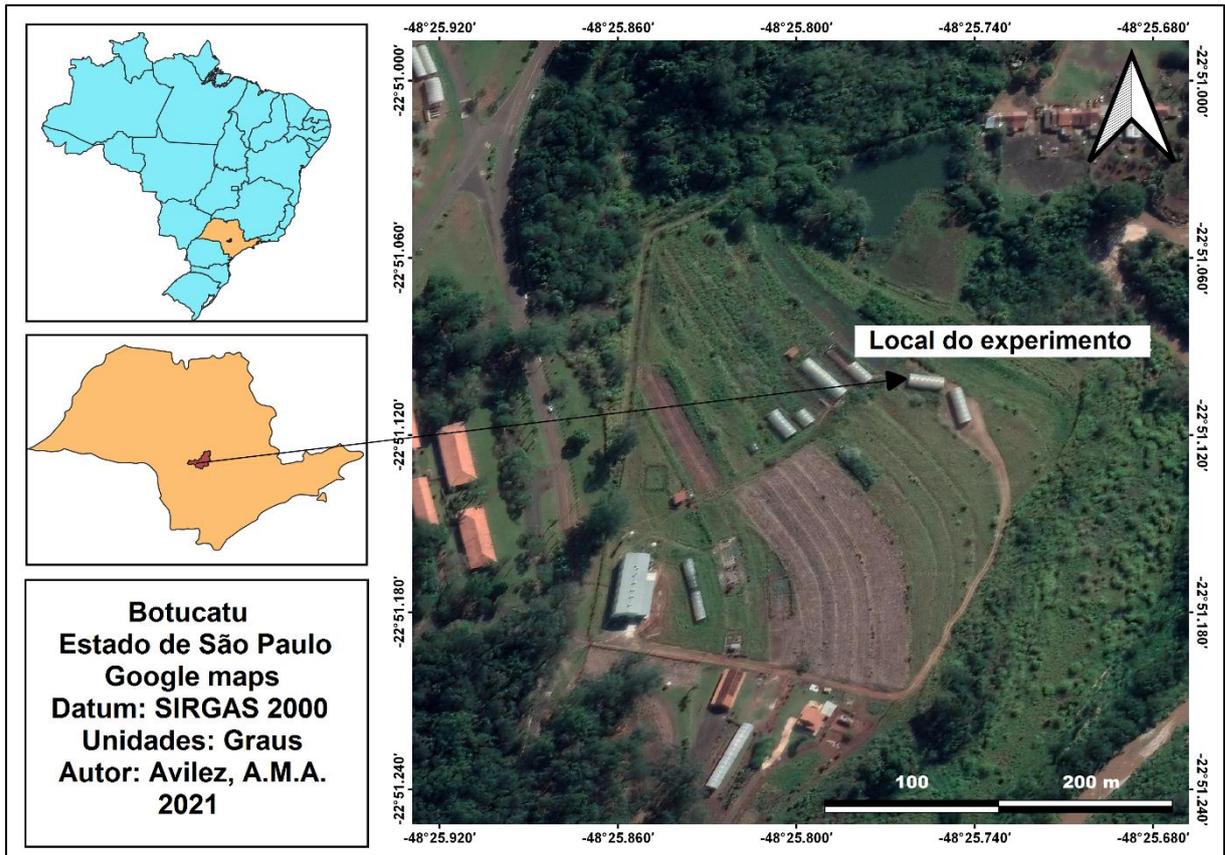


Figura 1- Localização da área de estudo na qual realizou-se o experimento.

Esta região é caracterizada por apresentar um clima quente, úmido e temperado (mesotérmico), classificado como Cfa segundo Köppen e Geiger (Peel et al., 2007). A precipitação média anual é 1.501,4 mm e a temperatura média 20.3°C (Alvares et al., 2013). A estufa utilizada é composta por oito arcos de 7 m de largura e comprimento de 23 metros, totalizando 161 m². Utilizou-se como cobertura o filme de efeito antivírus difusor Ginegar Polysack no teto, com 150 µm de espessura e tratamento de raios ultravioleta com filtro de radiação solar de 15%, enquanto a cobertura frontal e lateral foi constituída de malha Clarinet anti-insetos, possibilitando, devido à boa abertura dos orifícios, uma excelente ventilação no interior da estufa.

2.2.2 Material experimental, caracterização do solo, semeadura e adubação

Utilizou-se neste estudo um híbrido da mamona AG IMA 110204 (RNC-32752), cultivar desenvolvida pelo Instituto Mato-Grossense do Algodão (IMAmt), como uma opção para rotação de culturas objetivando-se reduzir os nematóides em áreas de algodão. Este é um híbrido de pequeno porte (1,70 cm) que apresenta condições

ideais para mecanização, rápido florescimento (aproximadamente aos 30 DAS), ciclo produtivo de 160 dias, potencial produtivo entre 1500 e 3000 kg. ha⁻¹ e concentração média de óleo de 47%.

A análise química e textural do solo apresentou os seguintes resultados: Matéria orgânica = 7 g dm⁻³; pH (CaCl₂) = 4,2; P (resina) = 13,0 mg dm⁻³; K⁺ = 2,0 mmolc dm⁻³; Ca²⁺ = 18 mmolc dm⁻³; Mg²⁺ = 12,0 mmolc dm⁻³; H+Al = 21,0 mmolc dm⁻³ e CTC (capacidade de troca catiônica) = 85,0 mmolc dm⁻³; S = 18,0 mg dm⁻³; B = 0,25 mg dm⁻³; Cu = 3,5 mg dm⁻³; Fe = 12,0 mg dm⁻³; Mn = 4,5 mg dm⁻³; Zn = 1,6 mg dm⁻³; 82% de saturação por bases, classificação textural = franco argiloso arenoso (Embrapa, 2018), com 63,4% de areia, 32,3% argila e 4,3% de silte.

Na semeadura, adotou-se o espaçamento de 1,0 m entre linhas e 0,33 m entre plantas. Colocaram-se três sementes por cova e, aos 20 dias após a semeadura, realizou-se o desbaste, mantendo-se apenas uma planta por cova.

A adubação de plantio foi realizada aplicando-se as seguintes quantidades de N, P e K: 70, 30 e 80 kg ha⁻¹, respectivamente, como recomendado por De Sá et al., (2015). A adubação de cobertura, com aplicação de 50 kg N ha⁻¹, iniciou-se aos 40 dias após a semeadura, conforme recomendado por Da Eira et al., (2014). Realizaram-se cinco fertirrigações, em intervalos de sete dias, aplicando-se 10 kg N ha⁻¹ em cada uma.

2.2.3 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos utilizando-se uma estação meteorológica modelo Campbell Scientific instalada no interior da estufa, equipada com um datalogger (cr10x Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA) que coletava dados a cada 5 minutos, e com uma bateria com tensão de 12 V e corrente de 7 A fornecida por painel solar (SX10 M; Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA). Os sensores que compõem a estação são: um sensor HMP45C de temperatura do ar e umidade relativa; um piranômetro para mensurar a radiação solar (NR-LITE2); e um sensor de velocidade do vento instalado a 2 m do solo (A100LK; Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA).

2.2.4 Características e manejo dos tensiômetros

Em cada parcela do experimento, o monitoramento do consumo hídrico diário foi realizado utilizando-se tensiômetros instalados nas camadas de solo compreendidas entre 0-0,20 m, utilizada para auxiliar no cálculo do consumo hídrico diário e tomada de decisão acerca da lâmina correta e do momento ideal para realizar a irrigação, e 0,20-0,40 m, utilizada para o controle da profundidade da lâmina aplicada. Instalaram-se dois tensiômetros por faixa de profundidade em cada tratamento, totalizando assim, quatro tensiômetros por tratamento.

Os tensiômetros foram construídos com tubos plásticos, contendo uma cápsula porosa de cerâmica em sua extremidade inferior, e uma tampa de borracha na extremidade superior. Este tubo plástico é preenchido com água e, à medida que a umidade do solo diminui, a água contida no tubo sai por meio da cápsula porosa, que é permeável, criando um vácuo no interior do tubo, equivalente a uma tensão de água no solo. Esta tensão foi medida com o auxílio de um tensímetro digital, introduzido pela tampa de borracha (Figura 2).

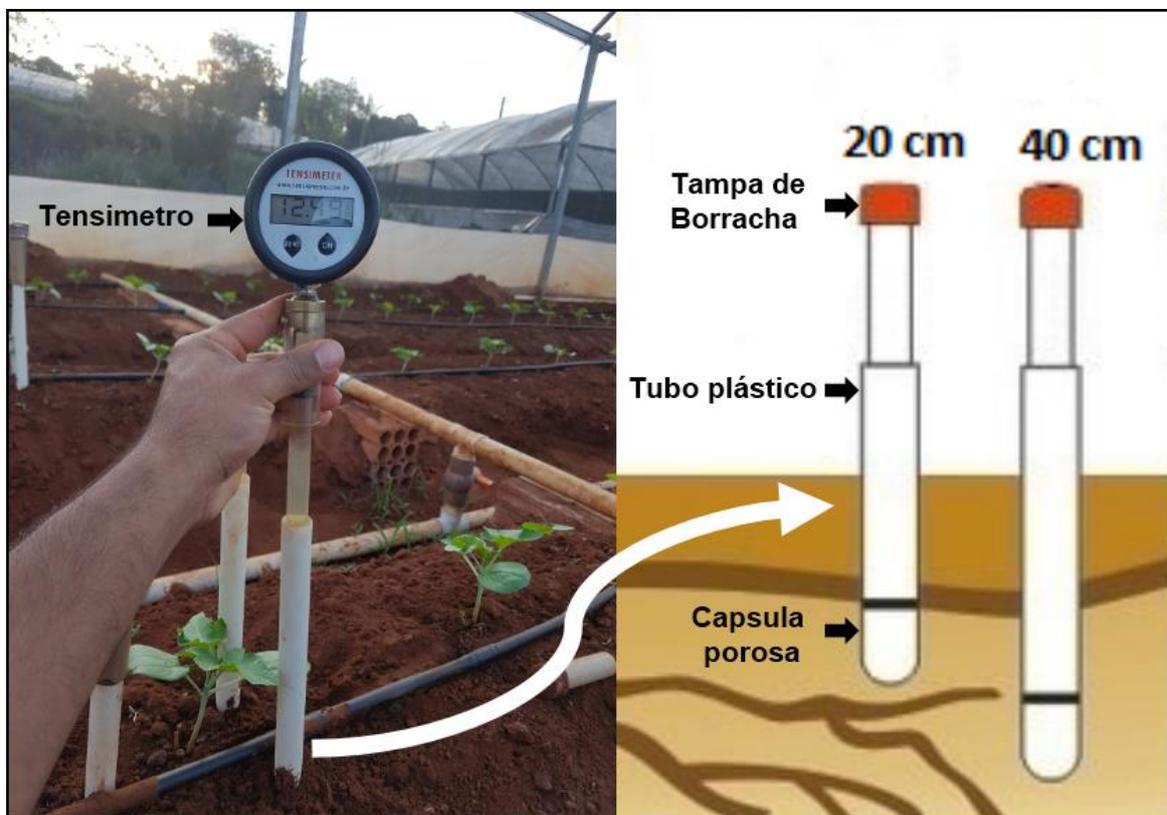


Figura 2. Medição, localização e composição dos tensiômetros.

As medições das tensões de água no solo foram realizadas diariamente às 07:00 AM, desta forma, foi possível calcular o consumo hídrico diário da planta. Este cálculo foi possível devido à determinação prévia da curva de retenção de água no solo pelo método do extrator de Richards (Richards, 1965), sendo posteriormente ajustada pela equação de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) para as camadas de 0-20 cm e 20-40 cm (Equação 1). O ajuste da curva e a obtenção dos coeficientes θ_s , θ_r , α , m e n foram realizados com o auxílio do software Soil Water Curve Relation – SWRC, versão 3.0 (DOURADO-NETO et al., 2000).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \Psi)^n]^m} \quad (1)$$

Em que:

θ = Conteúdo de água do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_r = Conteúdo de água residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_s = Conteúdo de água na saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

Ψ = Módulo do potencial mátrico (kPa); e

α , n e m são parâmetros empíricos do modelo.

Feito isto, elaborou-se a curva de retenção de água no solo, relacionando o potencial mátrico, em kPa, com a umidade no solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, para cada profundidade, conforme apresentada na Figura 3.

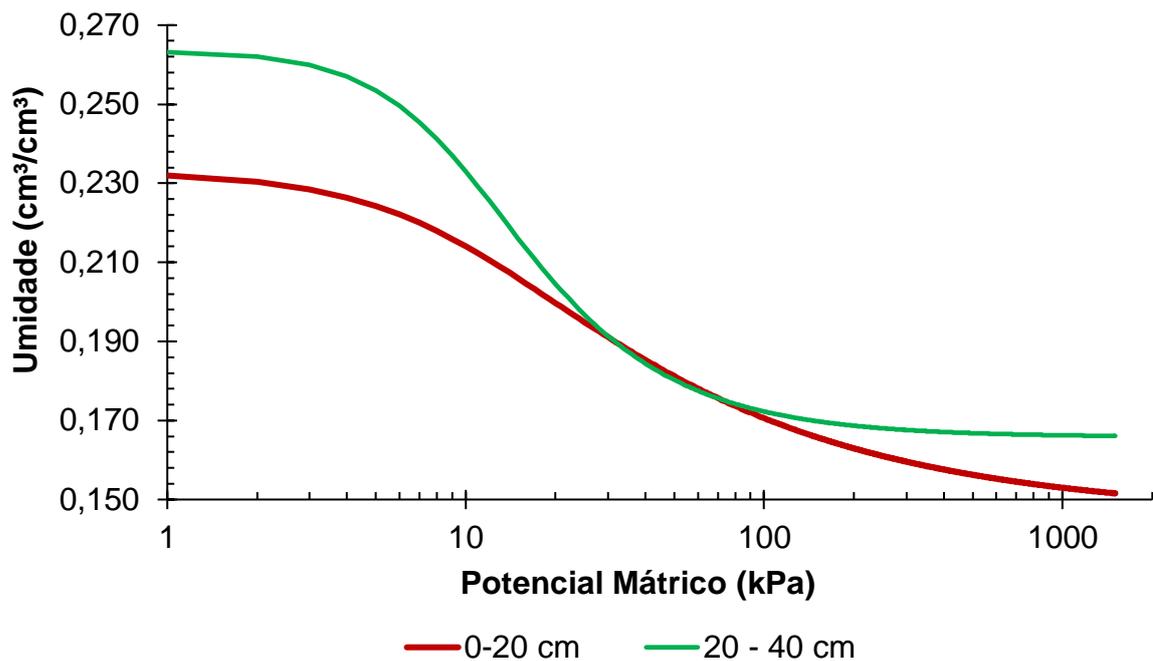


Figura 3. Curva de retenção de água no solo.

2.2.5 Estimativa da evapotranspiração e coeficiente de cultivo (Kc)

A evapotranspiração de referência foi estimada diariamente com o auxílio do software SMAI 2.0 (Mariano et al., 2011), utilizando-se a equação de Penman-Monteith FAO 56 (Equação 2), pela qual é possível determinar a evapotranspiração de uma superfície hipotética de referência e, a partir desta, determinar o valor da evapotranspiração de uma respectiva cultura (Allen et al., 1998). Os parâmetros de entrada da equação foram obtidos por meio da estação meteorológica instalada no interior da estufa.

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (2)$$

Em que:

ET_o = Evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹);

R_n = Radiação neta na superfície do cultivo (MJ m⁻² dia⁻¹);

G = Fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹);

T = Temperatura média do ar a 2 m de altura (°C);

U₂ = Velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹);

e_s = Pressão do vapor de saturação (kPa);

e_a = Pressão real do vapor (kPa);

$e_s - e_a$ = Déficit da pressão de vapor (kPa);

Δ = Pendente da curva de pressão de vapor (kPa °C⁻¹); e

γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

Para determinação dos coeficientes de cultivo (K_c), nas diferentes fases fenológicas da cultura, utilizou-se a Equação 3, conforme Doorenbos e Pruitt (1975).

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

Em que:

K_c = Coeficientes de cultura (adimensional);

ET_c = Evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹); e

ET_o = Evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹).

O ciclo total da cultura foi de 160 dias, sendo dividido em quatro fases fenológicas, conforme metodologia proposta por Doorenbos e Pruitt (1975), a saber: I) fase inicial (do plantio até 10% de cobertura do solo); II) fase de crescimento (do final da fase inicial até a cobertura total do solo); III) fase intermediária (do estabelecimento da cobertura total do solo até o início da maturação dos frutos); e IV) fase final (maturação e colheita). A irrigação foi aplicada somente durante 150 dias, haja vista que foi induzido um estresse hídrico no final do ciclo para diminuir a umidade do fruto e melhorar a colheita.

Para relacionar o K_c às unidades térmicas, foram estimados os valores dos graus-dia acumulados (°C), seguindo o método de Ometto (1981), conforme as equações a seguir:

$$\text{Se } T_m > T_b \text{ e } T_m < T_B, \text{ então: } GDA = \left(\frac{TM - T_m}{2} \right) + (T_m - T_b); \quad (4)$$

Ou

$$\text{Se } T_m \leq T_b < TM \text{ e } TM < T_B, \text{ então: } GDA = \frac{(TM - T_b)^2}{2(TM - T_m)}; \quad (5)$$

Ou

$$\text{Se } T_m < T_b \text{ e } T_M < T_B, \text{ então: } GDA = 0; \quad (6)$$

Ou

Se $T_m > T_b$ e $T_M > T_B$, então:

$$GDA = (T_m - T_b) + \frac{1}{2} \left[\frac{(T_M - T_m)^2 - (T_m - T_b)^2}{(T_M - T_m)} \right]; \quad (7)$$

Ou

$$\text{Se } T_m < T_b \text{ e } T_M > T_B, \text{ então: } GDA = \frac{1}{2} \left[\frac{(T_M - T_m)^2 - (T_m - T_b)^2}{(T_M - T_m)} \right] \quad (8)$$

Onde,

GDA: graus-dias acumulados ($^{\circ}\text{C d}^{-1}$);

TM: temperatura máxima diária ($^{\circ}\text{C}$);

Tm: temperatura mínima diária ($^{\circ}\text{C}$);

TB: temperatura basal superior da mamona ($^{\circ}\text{C}$); e

Tb: temperatura basal inferior da mamona ($^{\circ}\text{C}$).

De acordo com Brito Neto et al. (2014), o crescimento ideal da mamoneira ocorre em temperatura média em torno dos 28°C . Por outro lado, o crescimento é reduzido em temperaturas menores que 20°C e maiores que 35°C . Assim, as temperaturas basais superior e inferior, consideradas para a cultura obter um melhor crescimento, ocorrem entre os 35°C e 20°C , respectivamente.

2.2.6 Sistema de irrigação

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento, com um tubo gotejador (Netafim - Typhoon Plus) para cada linha de plantio, e as seguintes características: espaçamento de 20 cm entre emissores; vazão média de 1 L h^{-1} ; coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) de 95%; e pressão de 10 mca.

A área molhada de cada emissor – determinada pelo teste do bulbo úmido diretamente em campo – foi de $0,08 \text{ m}^2$ (largura da faixa molhada 0,4 m e comprimento 0,2 m) e a profundidade efetiva do sistema radicular (Z) foi de 0,20 m nos 45 primeiros dias após a sementeira, e 0,40 m para o restante do ciclo. A intensidade média do

sistema de irrigação – 12,5 mm h⁻¹ – foi calculada dividindo-se a vazão média do sistema pela área molhada de cada emissor.

A reposição de água pela irrigação ocorria com base no nível de tensão de água no solo de 40 kPa. Cada vez que a tensão de água no solo atingia este valor, realizava-se a irrigação, repondo a lâmina correspondente ao somatório do consumo hídrico diário, no intuito de diminuir a tensão para 10 kPa – considerada o valor de tensão de água no solo na capacidade de campo (Embrapa, 2013). Desta forma, foi possível determinar os valores dos coeficientes de cultivo (Kc) da mamoneira, trabalhando-se numa faixa de disponibilidade de água no solo na qual a produtividade da cultura não é prejudicada por estresse hídrico.

A necessidade de irrigação diária – relativa à quantidade de água evaporada pelo solo e transpirada pela planta em um dia (correspondente à evapotranspiração da cultura – ETC) foi calculada conforme a Equação 2.

$$NID = \frac{(Cc - Ua)}{10} * Z \quad (9)$$

Em que:

NID = Necessidade de irrigação diária (mm);

Cc = Umidade do solo na capacidade de campo (relativa a um potencial mátrico de 10 kPa) (cm³ cm⁻³);

Ua = Umidade atual do solo antes da irrigação (cm³ cm⁻³); e

Z = Profundidade do sistema radicular (0,40 m).

Tendo a umidade correspondente à tensão de 10 kPa e a umidade correspondente às tensões medidas em campo (próxima de 40 kPa), obtidas com auxílio da curva de retenção de água no solo para cada camada, definiu-se os tempos de irrigação, de acordo com as Equações 10, 11 e 12.

$$L_l = \frac{CC-Ua}{10} * Z \quad (10)$$

$$L_b = \frac{L_l}{E} \quad (11)$$

$$t = \frac{L_b}{I_s} \quad (12)$$

Em que:

L_l = Lâmina líquida (mm);

CC = Umidade na capacidade de campo (10 kPa);

U_a = Umidade atual do solo;

Z = Profundidade do sistema radicular (cm);

L_b = Lâmina bruta (mm);

E = Eficiência do sistema de irrigação (%);

t = Tempo de irrigação (h); e

I_s = Intensidade média do sistema de irrigação (mm h^{-1}).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.3.1 Condições climáticas

Durante o período experimental, no primeiro ciclo, a temperatura média do ar foi de 24,15 °C; a temperatura máxima média foi de 30,94 °C; e a temperatura mínima média foi de 19,69 °C. Já para o segundo ciclo, a temperatura média do ar foi de 22,67 °C; a temperatura máxima média foi de 29,11 °C; e a temperatura mínima média foi de 16,71 °C. A temperatura é um fator climático que apresenta elevada importância para o processo fisiológico, influenciando a taxa de crescimento e desenvolvimento das plantas. Severino e Auld (2013), em experimento realizado com mamona, verificaram que 74% dos frutos atingiram a maturidade após 42 dias com temperatura média do ar de 25 °C; enquanto apenas 8% dos frutos atingiram a maturidade após 44 dias com temperatura do ar menor. Para Zuchi et al. (2010) as temperaturas também desempenham um papel importante no peso da semente de mamona, haja vista que, em estudos realizados em condições tropicais, o peso das sementes foi maior e, em contrapartida, em condições com baixas temperaturas, a massa diminuiu.

Conforme a Figura 4, no primeiro ciclo, durante 21 dias, a temperatura máxima ultrapassou a temperatura basal superior (35 °C); e, em 86 dias, a temperatura mínima foi inferior à temperatura basal inferior (20 °C). Já para o segundo ciclo, a temperatura máxima ultrapassou a temperatura basal superior em apenas 2 dias e, em 137 dias, a temperatura mínima foi inferior à temperatura basal inferior. Essa diferença na

quantidade de dias nos quais a cultura foi submetida a temperaturas próximas à temperatura média basal certamente influenciou na produtividade da mamona, entre os ciclos, haja vista que Severino e Auld (2014) verificaram que há um efeito significativo no enchimento de sementes de mamona quando a temperatura do ar é maior ou mais próxima à temperatura basal da cultura. Já Moshkin (1986), verificou que a condição ideal para um maior crescimento e desenvolvimento da cultura encontra-se entre 20 e 30 °C.

O crescimento e desenvolvimento das plantas está mais associado ao tempo térmico do que ao tempo cronológico. Por esta razão, fez-se necessário realizar uma análise relacionada aos graus-dias (GD) - método vastamente utilizado e recomendado por Yang et al. (1995) para quantificar o tempo térmico em cada fase fenológica, e no ciclo total produtivo das plantas. Desta forma, verifica-se na Figura 4 que ao final do período experimental o valor de GDA atingiu 1179,43 e 997,61 °C, para o primeiro e segundo ciclo, respectivamente. Estes valores de GDA simbolizam uma espécie de ferramenta para representação da curva de Kc ao longo do ciclo de cultivo e, de acordo com Pereira et al. (2013), pode-se expressar também como graus-dias de desenvolvimento (GDD).

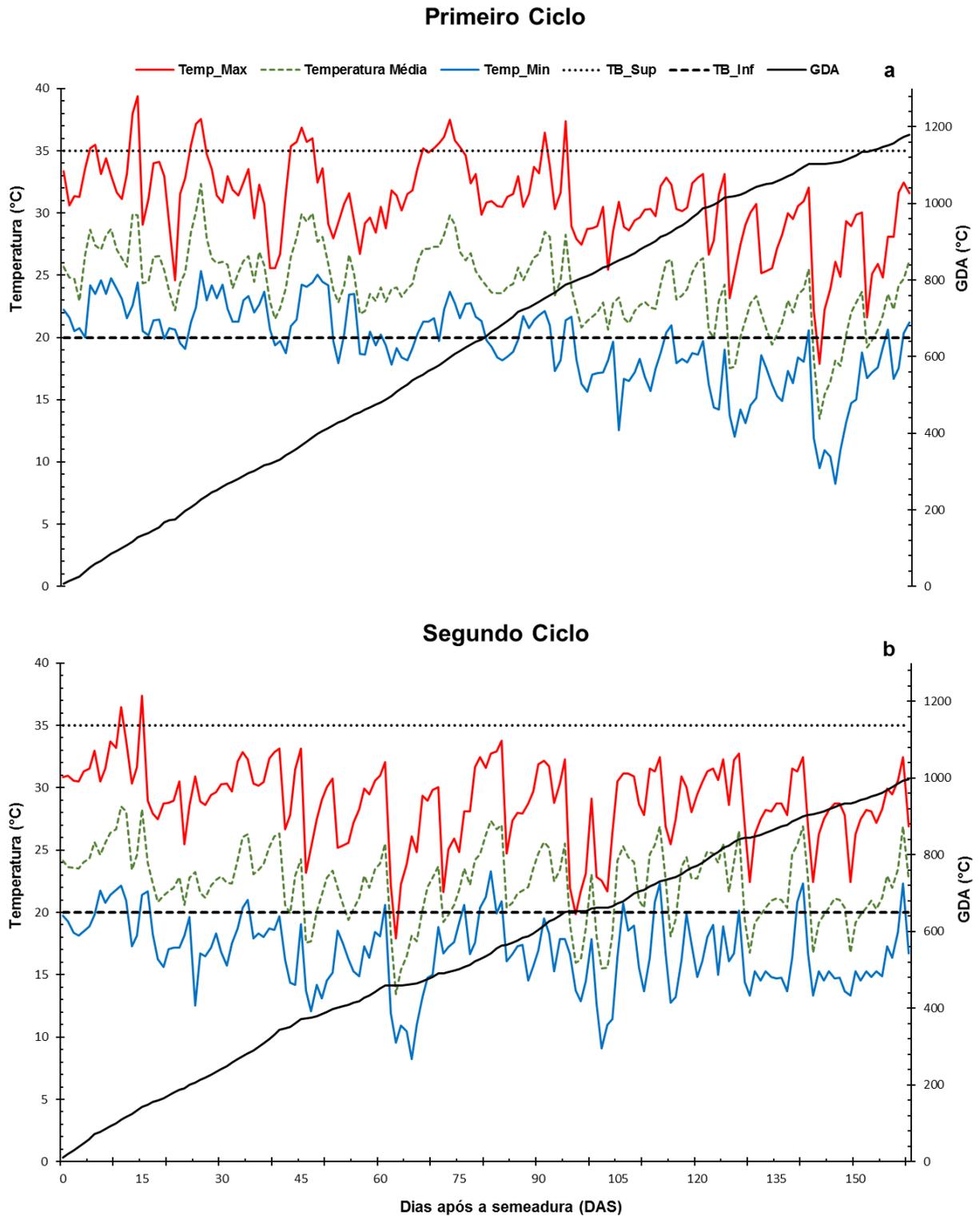


Figura 4. Temperatura máxima, média e mínima do ar; temperatura basal superior e inferior; e graus-dia acumulados (GDA) durante o primeiro (a) e segundo ciclo (b) da cultura.

Outros fatores climáticos que apresentam grande importância no crescimento da mamoneira são a umidade relativa e a radiação solar. Neste estudo, no primeiro ciclo,

a umidade relativa média do ar foi de 63,88%, com variação entre 32,76 e 85,87%; e a radiação solar líquida média foi de 14,96 MJ m⁻²d⁻¹, com variação entre 2,45 a 25,7 MJ m⁻²d⁻¹. No segundo ciclo, a umidade relativa média do ar foi de 56,81%, com variação entre 34,95 e 85,09%; e a radiação solar líquida média foi de 13,54 MJ m⁻²d⁻¹, com variação entre 2,45 e 20,77 MJ m⁻²d⁻¹ (Figura 5).

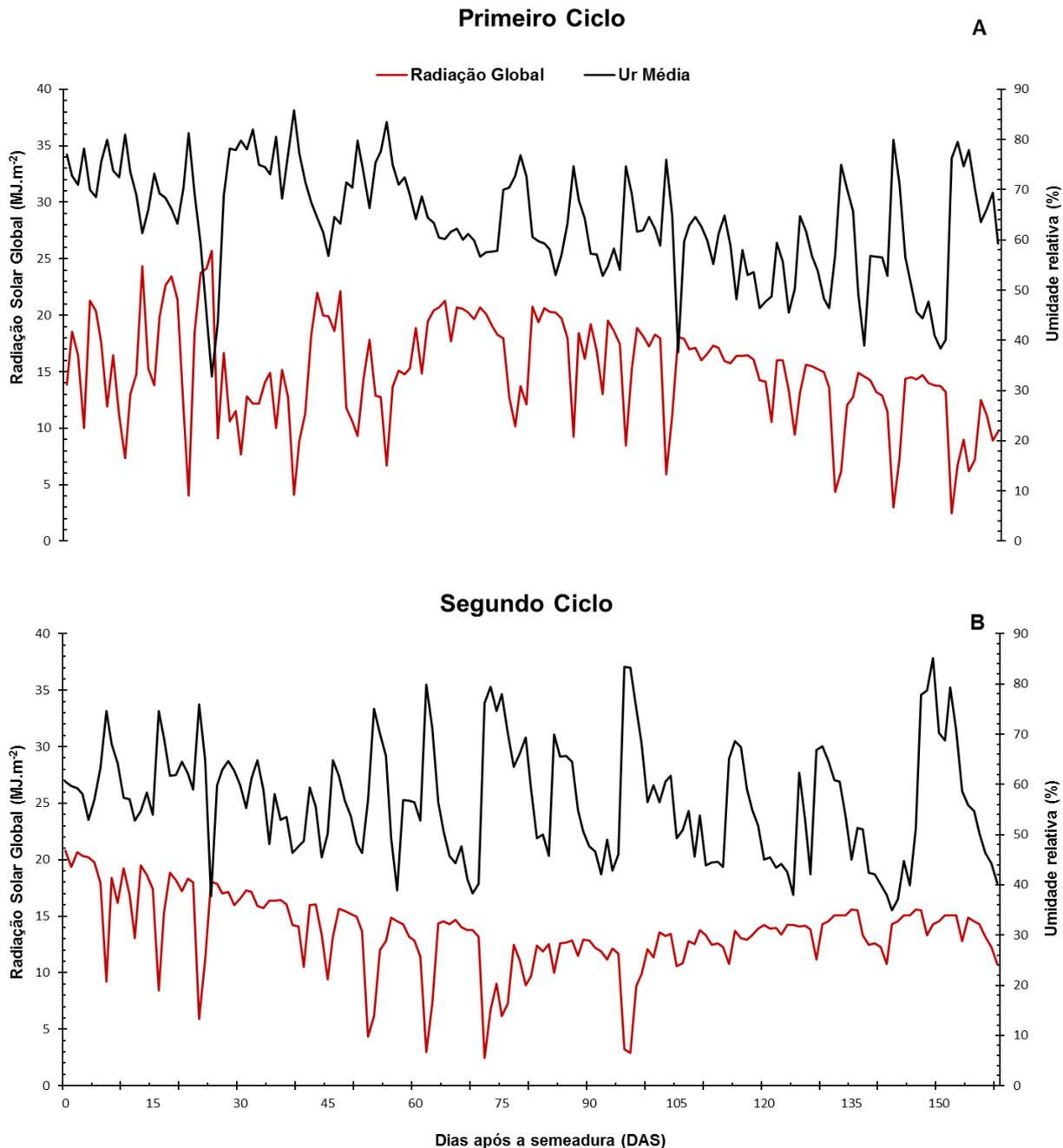


Figura 5. Umidade relativa e radiação solar global registradas durante o primeiro e segundo ciclo.

Aires et al. (2011), conduzindo estudos de campo com a mamona, observaram uma variação da umidade relativa média do ar de 64 a 73 %, e verificaram que houve uma maior produtividade final quando a umidade relativa do ar foi menor, principalmente quando isto ocorreu na fase reprodutiva da cultura. Em outro estudo, Azevedo e Beltrão (2007) constataram que a faixa ideal de umidade relativa do ar para o cultivo da mamona encontra-se entre 50 e 65 %.

2.3.2 Tensão diária da água no perfil do solo

Na Figura 6 são apresentados os valores da tensão de água no solo ao longo dos dois ciclos do cultivo. A variação destes valores ocorreu devido à aplicação da lâmina de irrigação; ao valor da evapotranspiração de referência; e à fase fenológica do cultivo, mantendo-se sempre a umidade próxima à capacidade do campo (10kPa). Nos primeiros 40 dias após a semeadura (Fase inicial), as plantas receberam a menor quantidade diária de irrigação, uma vez que a tensão da água se manteve entre 10 e 20 kPa, pois nesta fase a demanda hídrica é menor devido à baixa ETc. Já no período de crescimento (40 – 75 dias), as tensões de água no solo começaram a aumentar até 40 kPa e, conseqüentemente, as lâminas de irrigação também aumentaram. Na fase intermediária (75 – 120 dias), observou-se que as lâminas de irrigação, além de maiores, também foram mais frequentes devido as maiores ETc.

No geral, constatou-se que a depleção da umidade do solo foi uniforme em todas as fases, em ambos os ciclos do cultivo. Isto foi possível a partir da reposição criteriosa de água no solo, o que manteve os níveis de umidade do solo entre a capacidade de campo e a tensão de 40 kPa e, assim, não induziu um estresse hídrico na cultura. Dessa forma, a manutenção das boas condições de umidade do solo proporciona um crescimento e produtividade em níveis compatíveis com o potencial genético (Pereira et al., 2013).

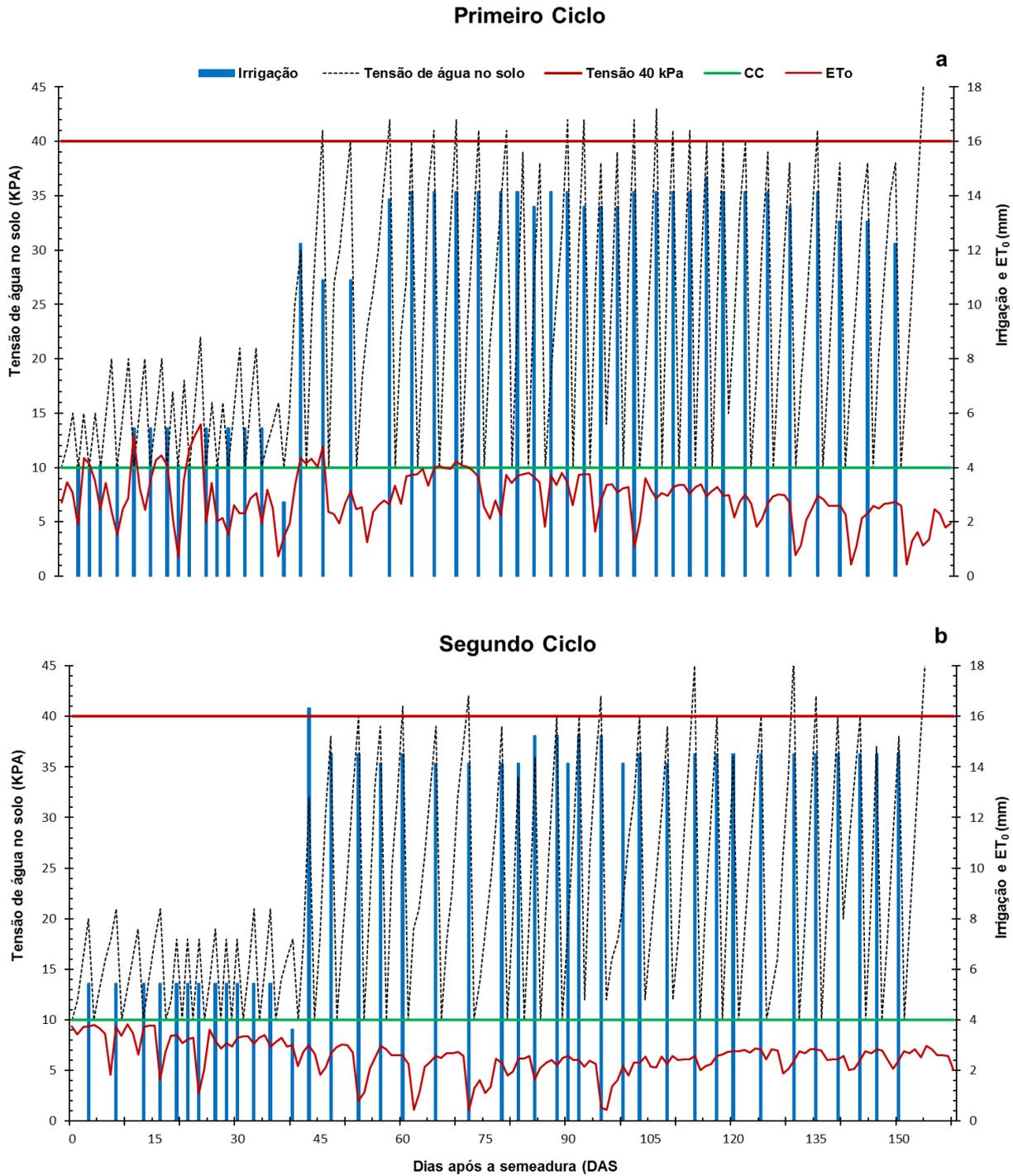


Figura. 6. Lâmina de irrigação, tensão de água no solo, tensão máxima de água no solo, tensão de água na capacidade de campo e evapotranspiração de referência, durante o primeiro e segundo ciclo.

2.3.3 Evapotranspiração da cultura (ET_c), evapotranspiração de referência (ET_0) e lâmina de irrigação aplicada

O somatório da lâmina de irrigação (Tabela 1) aplicada em cada fase fenológica do cultivo é correspondente à evapotranspiração da cultura (ET_c), haja vista que o experimento foi conduzido no interior de uma estufa e, assim, em ambiente protegido, livre da ocorrência de precipitação. Foi realizado o monitoramento da umidade do solo abaixo da zona radicular efetiva das plantas (após os 0,40 m), para verificar o deslocamento da frente de umidade, evitando a perda de água por percolação. Desta forma, a lâmina total de água aplicada por meio da irrigação foi utilizada exclusivamente no processo de evapotranspiração da cultura.

Na Tabela 1, verifica-se que a ET_c para cada fase do cultivo diferiu entre o primeiro e segundo ciclo. De acordo com Wiedenfeld (2004), a provável explicação para tal fato é a diferença nas condições climáticas em que a cultura ficou submetida, em cada ciclo. Ainda na Tabela 1, observa-se que o somatório da ET_0 foi menor durante o segundo ciclo, quando comparado com o primeiro; assim, a lâmina de irrigação aplicada em todas as fases do cultivo no segundo ciclo também foi menor.

Em ambos os ciclos foi verificado que a fase fenológica intermediária é a fase que apresenta a maior necessidade hídrica da cultura, devido à sua longa duração (45 dias), e por ser o período no qual a planta está em máximo crescimento e enchimento dos frutos. A próxima fase em termos de necessidade hídrica é a fase de crescimento, com duração de 35 dias, período em que a planta inicia o seu desenvolvimento vegetativo e, no caso do híbrido analisado neste estudo, também inicia a floração (De Sá et al., 2015).

Na fase de maturação, com duração de 40 dias, a cultura demandou, em média, 90 mm. Esta menor demanda, em relação à fase de crescimento, pode ser atribuída ao declínio do uso da água pela planta neste período, haja vista que ocorre a maturação da cultura e a senescência das folhas, ocasionando redução da área foliar, o que influencia nos processos evapotranspirativos da planta. Este comportamento já foi observado por outros autores, tais como Dias et al. (2015) para a mamoneira; Bezerra et al. (2010), para a cultura do algodoeiro; e Wrege e Lunardi (2006) para o crisântemo.

Tabela 1. Componentes do balanço hídrico de campo durante os estágios fenológicos da mamoneira, em dois ciclos de cultivo.

Primeiro ciclo					
Fase do cultivo	Nº de dias	ET ₀ (mm)	ETc (mm)	Irrigação (mm)	ETc média (mm)
Inicial	40	131,4	69,4	73,1	1,8
crescimento	35	126,3	104,5	110,0	3,1
intermediária	45	150,0	196,5	206,9	4,6
Maturação	30	87,3	94,5	99,4	3,3
Total	150	494,9	465,0	489,4	3,3
Segundo Ciclo					
Fase do cultivo	Nº de dias	ET ₀ (mm)	ETc (mm)	Irrigação (mm)	ETc média (mm)
Inicial	40	130,2	69,0	72,6	1,8
crescimento	35	105,4	94,0	98,9	2,8
intermediária	45	138,4	172,8	181,9	4,0
Maturação	30	92,9	89,0	93,7	3,1
Total	150	467,0	424,8	447,2	3,0

Comparando-se os dois ciclos, verifica-se que a soma da ETc para o primeiro ciclo foi igual a 465,0 mm; com média de 3,1 mm d⁻¹; e valores médios variando entre 1,7 mm d⁻¹, na fase inicial, e 4,4 mm d⁻¹, na fase intermediária. No segundo ciclo, a soma da ETc foi de 450,1 mm; com média de 3,0 mm d⁻¹; e valores médios entre 1,7 e 4,2 mm d⁻¹, nas fases inicial e intermediária, respectivamente. Estes valores médios condizem com os relatados por Reddy (2015), para a cultura da mamona.

2.3.4 Coeficientes de cultivo da mamoneira

Os valores de Kc para a mamoneira recomendados por Allen et al. (1998) para cada fase fenológica da cultura diferem dos encontrados neste experimento, haja vista que a duração total dos ciclos também difere. Além disso, os valores de Kc são altamente influenciados por outros fatores como a cultivar; o clima da região; a época e densidade de plantio; o preparo do solo; o sistema de produção; e a cobertura do solo (Da Silva et al., 2013; De Carvalho et al., 2012; Jiang et al., 2014; Wang et al., 2018), assim como o microclima formado no interior da estufa.

Em estudos conduzidos em estufas, Wang et al. (2018) relatam que os valores de Kc podem ser 40% superiores aos recomendados pela FAO-56 para ambientes de campo aberto. Por sua vez, Da Silva et al. (2013) e Lozano et al. (2017) observaram que o Kc calculado para uma determinada região pode divergir cerca de 40% durante as fases de desenvolvimento da cultura, quando comparados com os recomendados por Allen et al. (1998).

A determinação dos valores de Kc de modo preciso demanda uma grande quantidade de equipamentos e variáveis avaliadas, porém alguns métodos alternativos têm sido validados e podem auxiliar na determinação dos valores sem perder a precisão (Libardi et al., 2019). A metodologia do balanço de água no solo, utilizada neste experimento, tem sido testada e amplamente recomendada (Gabriel et al., 2015; Silva et al., 2012; Win et al., 2014), assim como a determinação de Kc dentro de estufa (Sharma et al., 2017).

Os valores de Kc para ambos os ciclos são apresentados na Figura 7, juntamente com as equações polinomiais que relacionam o valor de Kc com a quantidade de dias após a semeadura (DAS), e com os graus-dia acumulados (GDA).

A determinação destas equações possibilita determinar os valores de Kc em qualquer dia em específico, seja a partir da data após a semeadura (DAS) ou dos graus-dias acumulados (GDA); e certamente tornam-se importantes ferramentas para apoio na decisão de quanto e quando aplicar a lâmina ideal de irrigação.

Observa-se graficamente, na Figura 7, a forma como ocorreu o incremento dos valores de Kc, conforme as plantas cresciam, e o conseqüente declínio dos valores na fase de maturação, acarretado pela perda de área foliar.

É possível observar também que foram obtidas altas correlações entre os valores de Kc e os DAS: $R^2 > 0,96$ no primeiro ciclo e $R^2 > 0,94$ no segundo ciclo. A correlação entre os valores de Kc e os GDA também foi alta: $R^2 > 0,95$ e $R^2 > 0,93$ para o primeiro e segundo ciclo de cultivo, respectivamente; fornecendo, assim, uma ferramenta confiável para estimar o consumo hídrico da mamoneira em estufa.

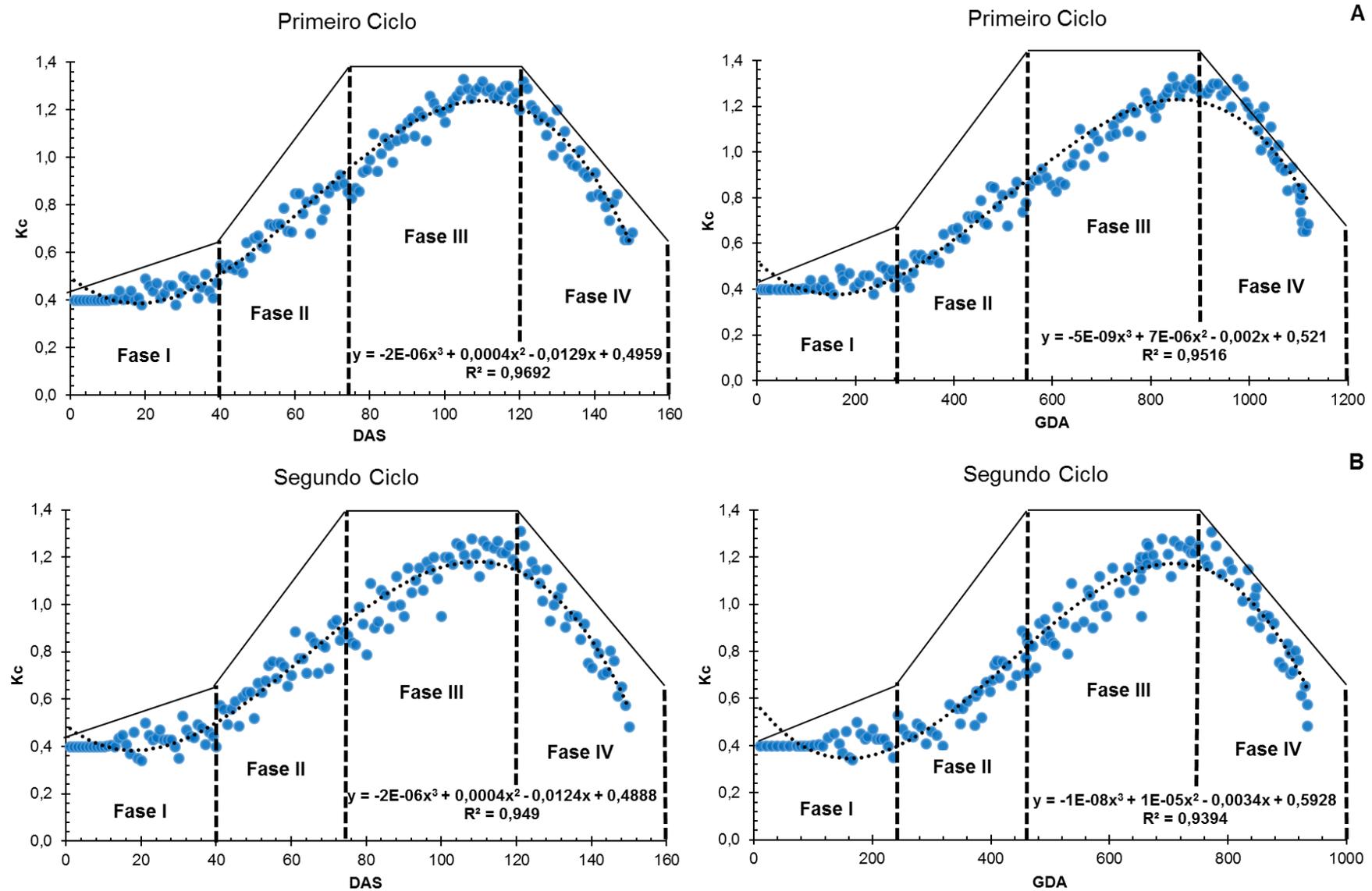


Figura. 7. Curva de coeficiente polinomial de cultura de 3ª ordem para a cultura da mamona durante o primeiro e segundo ciclo.

Em ambos os ciclos, o Kc aumentou consistentemente de 0,40 para 0,54 durante 40 dias após a semeadura (DAS). Posteriormente, apresentou aumentos graduais devido ao maior desenvolvimento e ao início do florescimento da cultura (fase de crescimento). Durante esta fase, compreendida entre 40 e 75 DAS, o Kc aumentou de 0,54 para 0,92 para os dois ciclos. Os maiores valores de Kc foram observados durante a fase intermediária (75 - 120 DAS), com valores médios de 1,23 e 1,17 para o primeiro e segundo ciclo, respectivamente. Os valores de Kc durante a fase de maturação (120 - 150 DAS) diminuíram gradualmente de 1,28 para 0,68, no primeiro ciclo, e de 1,21 para 0,48, no segundo ciclo.

Tabela 2. GDA, coeficiente de cultivo (Kc) médio por período e por fase fenológica, em ambos os ciclos.

Nº	Período (dias)	GDA (°C)		Kc médio		Kc médio por fase fenológica	
		Primeiro Ciclo	Segundo Ciclo	Primeiro Ciclo	Segundo Ciclo	Primeiro Ciclo	Segundo Ciclo
1	0-10	44	54	0,4	0,4		
2	10-20	123	129	0,4	0,4	0,4 (I)	0,4 (I)
3	20-30	202	196	0,5	0,4		
4	30-40	284	272	0,5	0,5		
5	40-50	354	356	0,6	0,6		
6	50-60	438	408	0,7	0,7	0,7 (II)	0,7 (II)
7	60-70	438	408	0,7	0,7		
8	70-80	602	497	0,9	0,9		
9	80-90	688	565	1,1	1,0		
10	90-100	773	636	1,2	1,1	1,23 (III)	1,17 (III)
11	100-110	840	664	1,27	1,21		
12	110-120	916	733	1,28	1,23		
13	120-130	1000	803	1,19	1,15		
14	130-140	1052	860	0,98	0,95	0,98 (IV)	0,95 (IV)
15	140-150	1103	913	0,79	0,71		

I= Fase inicial, II= Fase de crescimento, III= Fase Intermediária, e IV= Fase de maturação.

Na Tabela 2 são apresentados os valores diários de Kc, obtidos pela média de 10 dias.

É possível observar uma variação nos valores de Kc entre os dois ciclos, principalmente a partir do final da fase de crescimento. O Kc médio da fase intermediária no primeiro ciclo foi 5,1% maior do que no segundo ciclo, e na fase de maturação também houve uma diferença de 3,1% entre os ciclos. O GDA também

apresentou diminuição no segundo ciclo, quando comparado com o primeiro, a partir do final da fase de crescimento. Como os valores de Kc da cultura estão relacionados às condições climáticas nas quais a planta é submetida ao longo de todo o seu ciclo de vida, esta pode ser uma explicação da variação destes valores entre os dois ciclos, haja vista que outros autores, como Medeiros et al. (2000), que trabalharam com feijão carioca e Marques et al., (2015), com manjerição, também observaram comportamentos como estes e correlações significativas entre os valores de Kc e GDA ao longo do desenvolvimento da cultura.

Embora sejam evidenciadas variações dos valores de Kc ao longo das fases fenológicas, nos dois ciclos; e também em relação aos recomendados por Allen et al. (1998), verificou-se certa similaridade entre a curva de valores de Kc determinada neste experimento com outras determinadas em experimentos conduzidos com diferentes variedades de mamoneira, em regiões de diferentes características climáticas (Campbell et al., 2015; Dias et al., 2015; Reddy, 2015; Rios et al., 2011). Em linhas gerais, houve uma boa associação entre as médias dos valores de Kc determinados para os dois ciclos de cultivo (Figura 8).

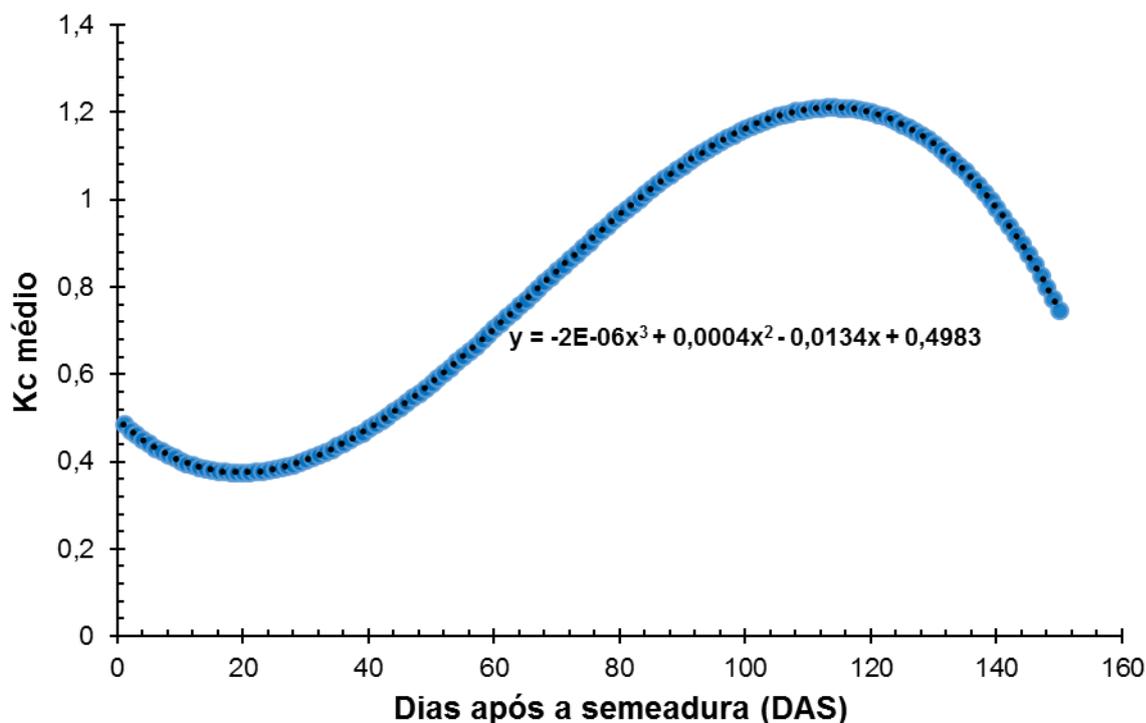


Figura. 8. Curva de valores de Kc para a cultura da mamona, a partir da média dos valores obtidos durante o primeiro e segundo ciclo de cultivo.

Os resultados obtidos neste experimento apresentaram valores diários diferentes dos determinados para outras variedades, porém, caso os produtores que cultivam a variedade IMA 110204 utilizarem os valores de Kc estimados para outra variedade, pode ocorrer uma superestimativa ou subestimativa da lâmina de irrigação aplicada na mamoneira, ocasionando prejuízos financeiros aos produtores.

Djaman et al. (2018) relatam que a superestimativa dos valores de Kc pode acarretar até 20% de desperdício de água no manejo da irrigação. Já Kharrou et al. (2011) observaram uma redução da produção de até 38%, quando se tem uma subestimativa dos valores.

2.4 CONCLUSÕES

O conhecimento dos coeficientes de cultura para cada uma das fases fenológicas da mamona é um importante parâmetro que influencia a estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc) e, conseqüentemente, a lâmina de irrigação a ser aplicada, impactando diretamente no desenvolvimento da cultura.

A partir dos valores de Kc determinados neste experimento para o híbrido AG IMA 110204, é possível estimar a necessidade hídrica por meio do balanço hídrico climático para esta região de estudo e outras regiões com características climáticas similares.

A ETc diária variou, em média, entre 1,7 e 4,4 mm no primeiro ciclo e entre 1,7 e 3,8 mm no segundo ciclo, atingindo valores totais da ordem de 465 e 450,1 mm no primeiro e segundo ciclo, respectivamente. Os valores médios de Kc da mamoneira determinados neste estudo foram de 0,42 para a fase inicial (0-40 DAS); 0,69, para a fase de crescimento (40-75 DAS); 1,2 para a fase intermediária (75-120 DAS); e de 0,97 para a fase de maturação (120-150 DAS).

REFERÊNCIAS

- Aires, R.F., dos Anjos e Silva, S.D., Eicholz, E.D., 2011. Análise de crescimento de mamona semeada em diferentes épocas. *Cienc. Rural*.
<https://doi.org/10.1590/S0103-84782011005000109>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrig. Drain. Pap. No. 56*, FAO.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek,

- G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift*. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Azevedo, D.M.P., Beltrão, N.E.M., 2007. O agronegócio da mamona no Brasil. (No. 2. ed. rev. amp. Campina Grande), Embrapa Informação Tecnológica. Brasília.
- Barros Junior, G., Guerra, H.O.C., Cavalcanti, M.L.F., Lacerda, R.D. de, 2008. Consumo de água e eficiência do uso para duas cultivares de mamona submetidas a estresse hídrico. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient*. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662008000400003>
- Bezerra, B.G., Silva, B.B. da, Bezerra, J.R.C., Brandão, Z.N., 2010. Evapotranspiração real obtida através da relação entre o coeficiente dual de cultura da FAO-56 e o NDVI. *Rev. Bras. Meteorol.* <https://doi.org/10.1590/s0102-77862010000300012>
- Brito Neto, J.F., Severino, L.S., Beltrão, N.E.M., 2014. Cultivo da mamona: clima e solo., in: Milani. M. (Ed.), *Sistemas de Produção 4*. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília.
- Campbell, D.N., Na, C.I., Rowland, D.L., Schnell, R.W., Ferrell, J.A., Wilkie, A.C., 2015. Development of a regional specific crop coefficient (Kc) for castor (*Ricinus communis* L.) in Florida, USA by using the sap flow method. *Ind. Crops Prod*. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.006>
- Centeno, C.R., Azevedo, C.A. V., Santos, D.B., Lira, V.M., Santos, J.B., 2012. Determinação do coeficiente de cultivo da mamona BRS Energia irrigada com água salina. *Rev. Verde Agroecol. e Desenvol. Sustentável* 7, 147–153.
- Da Eira, A.T.A., Gonçalves, C., Guidetti, M.Z.P., T., S.M.L., Ferreira, C.E., 2014. Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas (No. 200), 7. Campinas.
- Da Silva, V. de P.R., Da Silva, B.B., Albuquerque, W.G., Borges, C.J.R., de Sousa, I.F., Neto, J.D., 2013. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. *Agric. Water Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.06.007>
- De Carvalho, D.F., De Lima, M.E., De Oliveira, A.D., Da Rocha, H.S., Guerra, J.G.M., 2012. Crop coefficient and water consumption of eggplant in no-tillage system and conventional soil preparation. *Eng. Agric.* <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000400018>
- De Sá, R.O.; Galbieri, R., Bélot, J., Zanotto, M.D., Dutra, S.G., Severino, L.S., Silva, C.J., 2015. Mamona: opção para rotação de cultura visando a redução de nematoides de galha no cultivo do algodoeiro., *Circular técnica*, 15. Cuiabá.
- Dias, J.M., Azevedo, P.V. de, Bezerra, J.R.C., Beltrão, N.E. de M., Oliveira, G.D.S., Cavalcanti, M.I.P., 2015. CONSUMO HÍDRICO E COEFICIENTE DE CULTIVO DA MAMONEIRA, CULTIVAR BRS ENERGIA. IRRIGA. <https://doi.org/10.15809/irriga.2015v20n3p429>
- Djaman, K., O'Neill, M., Owen, C.K., Smeal, D., Koudahe, K., West, M., Allen, S., Lombard, K., Irmak, S., 2018. Crop evapotranspiration, irrigation water requirement and water productivity of maize from meteorological data under semiarid climate. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w10040405>
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979. Yield response to water., *Irrigation*. ed. Rome.
- Doorenbos, J., Pruitt, W., 1975. Crop water requirement's: Revised, *Irrigation and Drainage Paper*, 24. FAO, Roma.
- Dourado-Neto, D., Nielsen, D.R., Hopmans, J.W., Reichardt, K., Bacchi, O.O.S., 2000. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). *Sci. Agric.* <https://doi.org/10.1590/s0103-90162000000100031>

- Embrapa, 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos, Embrapa Solos.
- Embrapa, 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos, Embrapa Solos.
- Freitas, C.A.S. de, Bezerra, F.M.L., Silva, A.R.A. da, Pereira Filho, J. V., Feitosa, D.R.C., 2010. Comportamento de cultivares de mamona em níveis de irrigação por gotejamento em Pentecoste, CE. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* <https://doi.org/10.1590/s1415-43662010001000006>
- Gabriel, G. de G.C., Renato, C. de O., Marconi, B.T., Milton, S.D., Romenig, M.O.D., Clarice, A.M., 2015. Sugar cane crop coefficient by the soil water balance method. *African J. Agric. Res.* <https://doi.org/10.5897/ajar2015.9805>
- Jiang, X., Kang, S., Tong, L., Li, F., Li, D., Ding, R., Qiu, R., 2014. Crop coefficient and evapotranspiration of grain maize modified by planting density in an arid region of northwest China. *Agric. Water Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.006>
- Kharrou, M.H., Er-Raki, S., Chehbouni, A., Duchemin, B., Simonneaux, V., LePage, M., Ouzine, L., Jarlan, L., 2011. Water use efficiency and yield of winter wheat under different irrigation regimes in a semi-arid region. *Agric. Sci.* <https://doi.org/10.4236/as.2011.23036>
- Libardi, L.G.P., de Faria, R.T., Dalri, A.B., de Souza Rolim, G., Palaretti, L.F., Coelho, A.P., Martins, I.P., 2019. Evapotranspiration and crop coefficient (Kc) of pre-sprouted sugarcane plantlets for greenhouse irrigation management. *Agric. Water Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.003>
- Lozano, C.S., Rezende, R., De Freitas, P.S.L., Hachmann, T.L., Santos, F.A.S., Andrean, A.F.B.A., 2017. Estimation of evapotranspiration and crop coefficient of melon cultivated in protected environment. *Rev. Bras. Eng. Agric. e Ambient.* <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n11p758-762>
- Mariano, J.C.Q.; Santos, G.O.; Feitosa, D.G.; Hernandez, F.B.T., 2011. Software para cálculo da evapotranspiração de referência diária pelo método de Penman-Monteith. In: CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, XXI. Petrolina: ABID, 6p.
- Marques, P.A.A., José, J.V., da Rocha, H.S., Fraga, E.F., Soares, D.A., Duarte, S.N., 2015. Consumo hídrico do manjeriço por meio de lisímetro de drenagem. *IRRIGA.* <https://doi.org/10.15809/irriga.2015v20n4p745>
- Medeiros, G.A. De, Arruda, F.B., Sakai, E., Fujiwara, M., Boni, N.R., 2000. Crescimento vegetativo e coeficiente de cultura do feijoeiro relacionados a graus-dia acumulados. *Pesqui. Agropecuária Bras.* <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2000000900005>
- Moshkin, V.A., 1986. Castor. Kolos Publisher, Moskow.
- Ometto, J.C., 1981. Bioclimatologia Vegetal. Agronômica Ceres, São Paulo.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Pereira, A.R., Sedyama, G.C., Villa Nova, N.A., 2013. Evapotranspiração. Campinas: FUNDAG 323p.
- Pereira, L.S., Allen, R.G., 1997. Novas aproximações aos coeficientes culturais. *Eng. Agrícola* 16, 118–143.
- Reddy, K.C., 2015. Development of crop coefficient models of castor and maize crops. *Eur. J. Agron.* <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.06.003>
- Richards, L.A., 1965. Physical conditions of water in soil, in: BLACK, C.A., EVANS, D.D., WHITE, J.L., CLARK, F.E. (Eds.), *Methods of Soil Analysis - Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurements and Sampling.*

- ASA/SSSA, Madison, pp. 128–152.
- Rios, G.F.A., Carvalho, L.G. de, Magina, F. de C., Castro Neto, P., Silva, B.M., Fraga, A.C., 2011. Consumo hídrico e coeficiente de cultura da mamoneira na microrregião de Lavras, Minas Gerais. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* <https://doi.org/10.1590/s1415-43662011001200009>
- Severino, L.S., Auld, D.L., 2014. Study on the effect of air temperature on seed development and determination of the base temperature for seed growth in castor (*Ricinus communis* L.). *Aust. J. Crop Sci.*
- Severino, L.S., Auld, D.L., 2013. Seed yield and yield components of castor influenced by irrigation. *Ind. Crops Prod.* 49, 52–60. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.04.012>
- Severino, L.S., Auld, D.L., Baldanzi, M., Cândido, M.J.D., Chen, G., Crosby, W., Tan, D., He, X., Lakshamma, P., Lavanya, C., Machado, O.L.T., Mielke, T., Milani, M., Miller, T.D., Morris, J.B., Morse, S.A., Navas, A.A., Soares, D.J., Sofiatti, V., Wang, M.L., Zanotto, M.D., Zieler, H., 2012. A review on the challenges for increased production of castor. *Agron. J.* 104, 853–880. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0210>
- Sharma, H., Shukla, M.K., Bosland, P.W., Steiner, R., 2017. Soil moisture sensor calibration, actual evapotranspiration, and crop coefficients for drip irrigated greenhouse chile peppers. *Agric. Water Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.001>
- Silva, V. de P.R. da, Borges, C.J.R., Farias, C.H.A., Singh, V.P., Albuquerque, W.G., Silva, B.B. da, 2012. Water requirements and single and dual crop coefficients of sugarcane grown in a tropical region, Brazil. *Agric. Sci.* <https://doi.org/10.4236/as.2012.32032>
- Van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Wang, J., Zhang, Y., Gong, S., Xu, D., Juan, S., Zhao, Y., 2018. Evapotranspiration, crop coefficient and yield for drip-irrigated winter wheat with straw mulching in North China Plain. *F. Crop. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.010>
- Wang, S., Li, B., Gong, X., 2018. Research on validity examination of simulated results of eggplant water requirements with drip irrigation under mulch in sunlight greenhouse. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w10020130>
- Wiedenfeld, B., 2004. Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. *Agric. Water Manag.* [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00192-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00192-6)
- Win, S.K., Zamora, O.B., Thein, S., 2014. Determination of the Water Requirement and Kc Values of Sugarcane at Different Crop Growth Stages by Lysimetric Method. *Sugar Tech.* <https://doi.org/10.1007/s12355-013-0282-1>
- Wrege, M.S., Lunardi, D.M.C., 2006. Evapotranspiração e coeficiente de cultura (Kc) do crisântemo (*Dendranthema grandiflora* var. *Polaris Amarelo*). *Rev. Bras. Agrometeorol.* 14, 43–52.
- Yang, S., Logan, J., Coffey, D.L., 1995. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agric. For. Meteorol.* [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02185-M](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02185-M)
- Zuchi, J., Zanuncio, J.C., Peripolli Bevilaqua, G.A., Peske, S.T., dos Anjos e Silva, S.D., 2010. Castor yield components according to floral order and sowing season in the Rio Grande do Sul state. *Rev. Cienc. Agron.* <https://doi.org/10.1590/s1806-66902010000300009>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Variedade de mamoneira utilizada neste estudo demonstrou uma perda de produtividade final na produção de grãos e de óleo quando se aumenta a tensão de água no solo, além de uma diminuição nas suas características morfológicas como, altura, número de racemos, diâmetro do caule e número de frutos por racemos. Por esta razão quando se quer maximizar a produtividade, recomendasse trabalhar o manejo da irrigação nesta cultura com aplicações de água que mantenham uma oscilação da tensão de água no solo entre 20, 30 e no máximo 40 kPa, com respeito a tensão da capacidade de campo de 10 kPa.

Esta variedade também demonstrou uma produtividade da água com relação a produtividade de grãos e óleo maior para o tratamento manejado com tensão de 40 kPa, ainda que este tratamento não tenha apresentado a maior produtividade, mas a sua produção final não foi potencialmente afetada pelo aumento da tensão de água no solo. Assim, recomendasse trabalhar com esta tensão em áreas com menor disponibilidade do recurso hídrico.

A estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) com o auxílio da tensiometria e da evapotranspiração de referencia (ET_0) com a estação agrometeorológica permitiu a determinação dos coeficientes de cultivo desta variedade, sendo estes valores uma ferramenta para o manejo da irrigação realizado via clima, uma vez que estes valores são informações relevantes para determinar a ET_c em uma outra área, diferentes condições climáticas ou épocas de semeadura.

Sendo assim, neste trabalho são disponibilizadas informações para o manejo da irrigação realizado via solo ou via clima na cultura da mamoneira. Conseqüentemente, o produtor pode planejar adequadamente a realização de irrigações, sem excesso ou déficit hídrico que causem perda de produtividade da cultura da mamona.

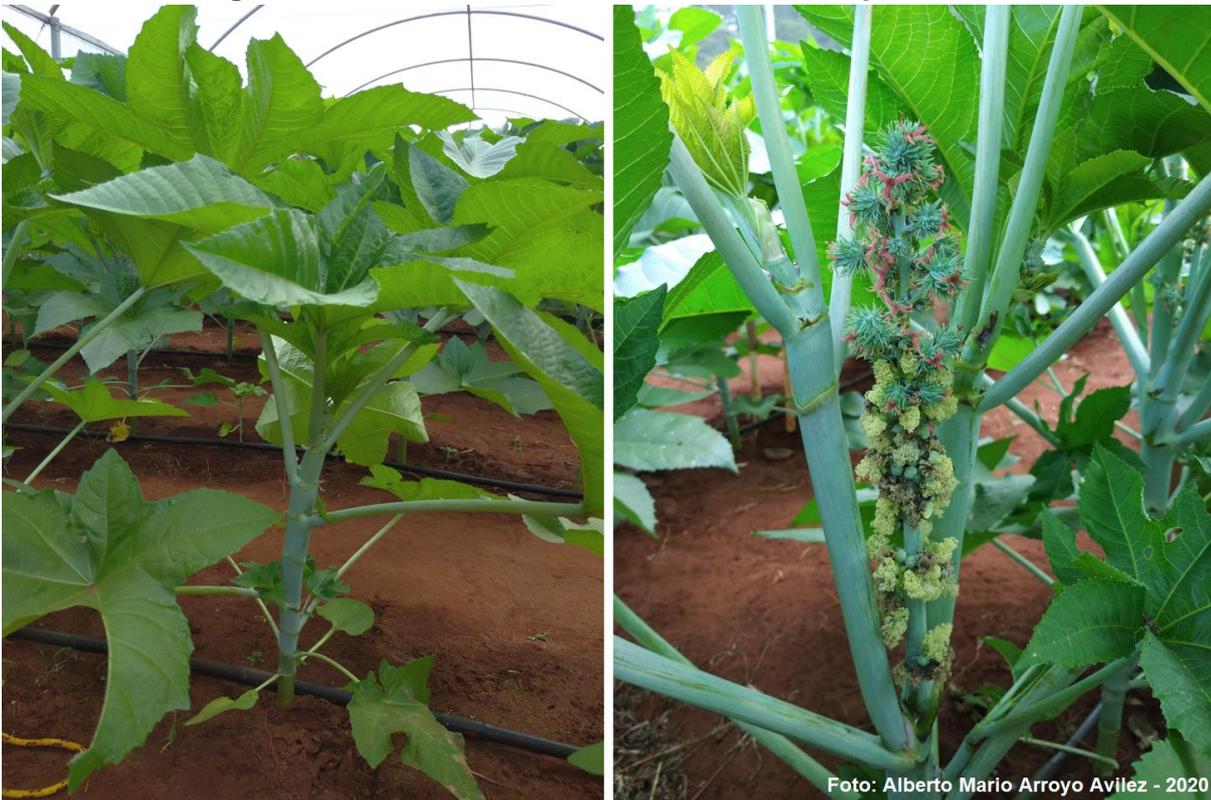
REFERÊNCIAS

- BELTRÃO, N. E. DE M.; CARDOSO, G. D. Informações sobre o sistema de produção utilizados na ricinocultura na região nordeste, em especial o semi-árido e outros aspectos ligados a sua cadeia. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006. 6p. Comunicado Técnico, 213
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra Brasileira Disponível em: https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/32327_b81d579517d7bc89b15b72e841195ebf. Acesso em 31 julho 2020.
- COSTA, F. X.; BELTRÃO, N. M.E; SILVA, F. E. A. A.; FILHO, J. S. M. M.; SILVA, M. A. S. Disponibilidade de nutrientes no solo em função de doses de matéria orgânica no plantio da mamona. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Limoeiro, v. 5, n. 3, p. 204-212, 2010.
- DE SÁ, R.O., GALBIERI, R., BÉLOT, J., ZANOTTO, M.D., DUTRA, S.G., SEVERINO, L.S., SILVA, C.J. Mamona: opção para rotação de cultura visando a redução de nematoides de galha no cultivo do algodoeiro., Circular técnica, 15. Cuiabá, 2015.
- DIAS, J. M.; AZEVEDO, P. V.; BEZERRA, J. R. C.; BELTRÃO, N. E. M.; OLIVEIRA, G. S.; CAVALCANTE, M. I. P. Consumo hídrico e coeficiente de cultivo da mamoneira, cultivar BRS Energia. Irriga, v.20, n.3, p.429-444, 2015.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Tecnologias Embrapa para a cultura da mamoneira. Embrapa Algodão: Campina Grande, 2011.
- FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura. Comercio. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize> Acesso em 26/05/2020.
- FARIA-MACHADO, A.F., DO VALE, A.T., BALDONI, A.B., ALVES, A.A., SAMIREDDYPALLE, A., Anais do Simpósio Destoxificação e Aproveitamento das Tortas de Pinhão-manso e mamona. Documento 16, Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 2013.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Comercio. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/pesquisa/14/0?indicador=10329> Acesso em 26/05/2020.
- TÁVORA, F.J.A.F. A cultura da mamona. Fortaleza: EPACE 1982. 111p

ANEXO A - Figura 1 – Cultivo da mamoneira de porte baixo (AG IMA 110204 - RNC-32752)



ANEXO B - Figura 2 – Cultivo da mamoneira antes e depois do florescimento



ANEXO C - Figura 3 – Cultivo da mamoneira na fase do início do florescimento



ANEXO D - Figura 4 – Cultivo da mamoneira na fase do início do enchimento dos frutos



Foto: Alberto Mario Arroyo Avilez - 2020

ANEXO E - Figura 5 – Cultivo da mamoneira na fase final (Frutos totalmente secos)



Foto: Alberto Mario Arroyo Avilez - 2020

ANEXO F - Figura 6 – processo de descasque para retirada dos grãos dos frutos



Foto: Alberto Mario Arroyo Avilez - 2020

ANEXO G - Figura 7 – Colheita da mamoneira de porte baixo (AG IMA 110204 - RNC-32752)



Foto: Alberto Mario Arroyo Avilez - 2020 e de Sá et al., 2015