UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

CALIBRAÇÃO, TESTE E APLICAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DO FEIJÃO SOB REGIMES DE IRRIGAÇÃO.

Wenderson Nonato Ferreira da Conceição

Engenheiro Agrônomo

Jaboticabal-SP
2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

CALIBRAÇÃO, TESTE E APLICAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DO FEIJÃO SOB REGIMES DE IRRIGAÇÃO.

Wenderson Nonato Ferreira da Conceição

Orientador: Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

Jaboticabal-SP
2022

C744c

Conceição, Wenderson Nonato Ferreira da
Calibração, teste e aplicação do modelo aquacrop para a cultura do feijão sob regimes de irrigação / Wenderson Nonato Ferreira da Conceição. -- , 2023
61 f. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal,
Orientador: Rogério Teixeira de Faria

1. Feijão. 2. Irrigação. 3. Modelagem de Culturas. 4. Software Aquacrop. 5. Simulação Agrícola. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CALIBRAÇÃO, TESTE E APLICAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DO FEIJÃO SOB REGIMES DE IRRIGAÇÃO

AUTOR: WENDERSON NONATO FERREIRA DA CONCEIÇÃO
ORIENTADOR: ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciencias Exatas DECEx / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. GEFFSON DE FIGUEREDO DANTAS (Participaçao Virtual)
UNIARA / Araquara/SP

Prof. Dr. LEANDRO BORGES LEMOS (Participaçao Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 14 de dezembro de 2022

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Wenderson Nonato Ferreira da Conceição – Brasileiro, nascido em 17 de setembro de 1997, natural de Belém, Pará, filho de Raimundo Nonato Amoras da Conceição e Dicilene Ferreira da Conceição. Cursou engenharia Agronômica na Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Belém, em Belém – PA, de 2015 a 2020. Bolsista de iniciação científica pela PIBIC/UFRA de 2018 a 2019, atuando principalmente nos temas: irrigação e manejo. Durante a graduação fez parte do Grupo de Pesquisa em nutrição da palma de óleo (NUTRIPALMA) e do grupo de Pesquisa Ciência e Tecnologia em Sistema de Produção de Frutíferas na Amazônia (SIFRUTAM). Em agosto de 2020, ingressou no curso de mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho (UNESP/FCAV), no Campus de Jaboticabal – SP, na área de pesquisa de Modelos de Simulação. Em maio de 2022, ingressou no MBA em agronegócio pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", unidade da Universidade de São Paulo (USP).

Pois Dele, por Ele e para Ele são
todas as coisas. A Ele seja a
glória para sempre! Amém.
Romanos 11:36

Dedico

A Deus, por toda sua misericórdia e graça sobre minha vida. Aos meus pais Raimundo Nonato Amoras da Conceição e Dicilene Ferreira da Conceição por todo apoio, carinho e amor. A minha esposa Tinayra Teyller Alves Costa que é minha fonte de motivação e que me ajudou nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado o dom da vida, pela sua graça e misericórdia que permitiu chegar a essa ocasião.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria, pelo direcionamento, oportunidade de trabalhar junto a ele, ensinamentos, paciência, respeito e compreensão dos momentos difíceis que enfrentei.

Aos membros da banca de qualificação e defesa, Profs. Drs. Eduardo Pinheiro de Freitas, Rivanildo Dallacorte, Geffson de Figueredo Dantas e Leandro Borges Lemos, pela disponibilidade de participar e pelas contribuições acerca deste trabalho de dissertação.

A Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo –, pela formação acadêmica e oportunidade de realização do curso de mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos engenheiros agrônomos e amigos que me ajudaram a construir este trabalho, em especial, ao Eng. e Mestre Igor Cristian de Oliveira Vieira, que sempre esteve disponível para ajudar nesta caminhada.

Aos meus pais, Raimundo Nonato Ferreira da Conceição e Dicilene Ferreira da Conceição que não mediram esforços para me derem incentivos para buscar uma formação acadêmica. A minha irmã Weveni Ferreira da Conceicao pelo apoio e incentivo para continuar.

A minha esposa Tinayra Teyller Alves Costa por todos os momentos em que esteve ao meu lado nessa trajetória, ajuda, conforto, amor e carinho, enfrentando todas as dificuldades ao meu lado.

A todos os demais familiares e amigos, que de alguma forma contribuíram nessa minha trajetória e na realização deste trabalho, compartilhando momentos que fazem a vida ter sentido.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3

2.1 A Cultura do Feijão 3

2.2 Balanço Hídrico do Solo 6

2.3.O modelo AquaCrop 6

3. MATERIAL E MÉTODOS 13

3.1. Condições experimentais 13

3.2. Calibração, teste e aplicação. 16

4. RESULTADOS 19

4.1 Calibração do Modelo 19

4.2 Teste do Modelo 24

4.3 Armazenamento de água no Solo 28

4.4. Aplicação do Modelo 29

5. DISCUSSÃO 32

6. CONCLUSÕES 38

7. REFERÊNCIAS 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Granulometria e retenção de água do Latossolo Vermelho distrófico da área experimental.....15

Tabela 2. Coeficientes calibrados da cultivar IAPAR 57 de feijoeiro para o modelo AquaCrop**. **20

Tabela 3. Durações das fases vegetativa (V0 – R6), reprodutiva (R6 - R9) e do ciclo fenológico (V0 - R9) do feijoeiro (Cultivar IAPAR 57) observadas e simuladas pelo modelo AquaCrop para o tratamento com irrigação plena (T1) nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). **Fase de Calibração.**.....22

Tabela 4. Produtividade (Y, kg ha^{-1}), índice de colheita (HI) e biomassa final (Bf, kg ha^{-1}) simuladas pelo modelo AquaCrop e observadas para a cultivar IAPAR 57 sob o tratamento com irrigação plena (T1) nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). **Fase de Calibração**.....24

Tabela 5. Durações em DAS de fases vegetativa (V0 – R6), reprodutiva (R6 - R9) e ciclo fenológico (V0 - R9) do feijoeiro (Cultivar IAPAR 57), observadas em campo e simuladas pelo modelo AquaCrop para os tratamentos não irrigado (T0) e irrigação deficitária (T2), nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). **Fase de Teste.**.....25

Tabela 6. Produtividade (Y, kg ha^{-1}), índice de colheita (HI) e biomassa final (Bf), kg ha^{-1}) do feijoeiro (Cultivar IAPAR 57) observadas e simuladas pelo modelo AquaCrop para o tratamento sem irrigação (T0) nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). **Fase de Teste**.....28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução da cobertura do dossel durante o ciclo de cultivo. CCo - cobertura inicial do dossel no momento da emergência da cultura, CGC - taxa de crescimento, CCx - cobertura máxima e CDC - coeficiente de declínio do dossel. Adaptado de Steduto et al. (2009). **.....**9

Figura 2. Fluxograma do modelo AquaCrop, indicando os principais componentes do contínuo solo-planta-atmosfera e os parâmetros da fenologia de transporte, cobertura do solo pelo dossel, transpiração, produção de biomassa e produção final (I - irrigação; Tn–temperatura mínima do ar; Tx – temperatura máxima do ar; ETo - evapotranspiração de referência; E - evaporação do solo; Tr– transpiração da cultura; gs - condutância estomática; WP- produtividade da água; HI - índice de colheita; CO2 - concentração de dióxido de carbono atmosférico; ES – escoamento superficial. (1), (2), (3), (4) - diferentes funções de resposta ao estresse de água). As linhas contínuas indicam ligações diretas entre as variáveis e os processos. As linhas tracejadas indicam retroalimentação. Fonte: Steduto et al. (2009).....12

Figura 3. Condições meteorológicas durante condução do experimento com feijoeiro (Cultivar IAPAR 57) estádios fenológicos (S: Semeadura; F: Floração; M: Maturação) em três épocas de semeadura (E1 – 21 de março, E2 – 24 de abril e E3 – 23 de agosto). 14

Figura 4. Cobertura do dossel e biomassa simulados pelo modelo AquaCrop e observadas para a cultivar IAPAR 57 sob o tratamento com irrigação plena (T1) nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). Fase de Calibração.....23

Figura 5. Cobertura do dossel observada e simulada para a cultivar IAPAR 57 pelo modelo AquaCrop para os tratamentos não irrigado (T0) e irrigação deficitária (T2), nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). Fase de Teste. 26

Figura 6. Biomassa observada e simulada para a cultivar IAPAR 57 pelo modelo AquaCrop para os tratamentos não irrigado (T0) e irrigação deficitária (T2), nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). Fase de Teste.....27

Figura 7. Armazenamento de água no solo na camada 0 - 35 cm observado (OBS) e simulado (SIM) pelo modelo AquaCrop para a cultivar de feijoeiro IAPAR 57, em função de estratégias de irrigação e épocas de semeadura. NI – Não irrigado; T2 - irrigação a ψ = - 25 kPa, T3 - irrigação a ψ = - 70 kPa, E1 -21/03, E2 - 24/04, E3 - 23/08, PMP- Ponto de Murcha Permanente, CC - Capacidade de Campo.....29

Figura 8. Produtividade de grãos, produtividade da água e lâmina de irrigação simuladas pelo modelo AquaCrop para feijoeiro (Cultivar IAPAR 57), em função de estratégias de irrigação e épocas de semeadura, durante o período 1980 – 2016. NI – Não irrigado, 200%RAW, 170%RAW, 120%RAW, 100%RAW e 50%RAW são depleções de 200,170, 120, 100 e 50% da água facilmente disponível na camada 0-35 cm. 31

Figura 9. Produtividade, precipitação ETo e irrigação simuladas pelo modelo AquaCrop para feijoeiro (Cultivar IAPAR 57), em função de estratégias de irrigação e épocas de semeadura, durante o período 1980 – 2016. NI – Não irrigado; 170%RAW, 120%RAW água facilmente disponível na camada 0- 35 cm. 32

CALIBRAÇÃO, TESTE E APLICAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DO FEIJÃO SOB REGIMES DE IRRIGAÇÃO.

RESUMO – A irrigação é essencial para a cultura do feijão em regiões com deficiência hídrica, pois proporciona suprimento hídrico adequado para atingir seu potencial produtivo. Modelos de simulação de crescimento de culturas relacionam os componentes solo-água-planta-atmosfera para estimar o desenvolvimento e a produtividade das plantas em diferentes cenários, possibilitando indicar estratégias eficientes de irrigação. Para serem aplicados, os modelos requerem testes com dados independentes, após calibração de alguns coeficientes de cultura. O objetivo deste trabalho foi: a) calibrar coeficientes de cultura e testar a capacidade do modelo AquaCrop em simular fenologia, crescimento e produtividade de uma cultivar de feijão (IAPAR 57) sob três regimes hídricos (T0 – sem irrigação, T1 – irrigação plena e T2 - irrigação deficitária) e três épocas de semeadura (E1 – 21 de março, E2 – 24 de abril e E3 – 23 de agosto), e b) determinar estratégias eficientes de irrigação para a cultura do feijão em Londrina, PR. A calibração dos coeficientes da cultivar IAPAR 57 foi bem-sucedida possibilitando bom desempenho do modelo para simular a fenologia, crescimento do dossel e biomassa, e produtividade nos três regimes hídricos, durante os períodos de cultivo com temperaturas adequadas (E1 e E3). No período em que predomina temperaturas abaixo do ideal para a cultura (≤17ºC), como em E2, associadas com irrigação deficitária ou sem irrigação, o modelo não penaliza adequadamente os estresses térmico e hídrico combinados, mesmo ajustando os coeficientes de estresse para estas condições, resultando em superestimativa do crescimento e produtividade da cultura. Portanto, falta ao modelo AquaCrop estender o efeito de estresse por frio, não apenas para o período de polinização, mas também para os outros períodos críticos, a fim de representar a desfolha do dossel ou mesmo a morte da planta. Nas simulações de longo período, o modelo foi capaz de calcular a variabilidade da produtividade devido às incertezas na precipitação ao longo dos anos e indicar estratégias de irrigação para Londrina, PR (irrigações após depleções de 120 e 170% da água facilmente disponível, para semeaduras em março e setembro, respectivamente) visando atingir altas produtividades da cultura (>2.769 kg ha^{-1}) e produtividades de água (1.050 a 1.445 kg m^{-3}), com a aplicação de lâminas

intermediárias (<150 mm). Embora haja necessidade de melhoria do cálculo de penalização por estresse térmico, o modelo AquaCrop tem boa capacidade para ser utilizado em estudos e aplicações em que regimes hídricos são limitantes à produção da cultura.

Palavras-chave: fração de cobertura, manejo de irrigação, modelagem agrícola, produtividade

CALIBRATION, TEST AND APPLICATION OF THE AQUACROP MODEL FOR CROPPING BEANS UNDER IRRIGATION SYSTEMS.

ABSTRACT – Irrigation is essential for bean cultivation in regions with water deficit, as it provides adequate water supply to reach its productive potential. Crop growth simulation models relate the soil-water-plant-atmosphere components to estimate the development and productivity of plants in different scenarios, making it possible to indicate efficient irrigation strategies. To be applied, the models require tests with independent data, after calibration of some crop coefficients. The objective of this work was: a) to calibrate crop coefficients and test the ability of the AquaCrop model to simulate phenology, growth and productivity of a common bean cultivar (IAPAR 57) under three water regimes (T0 - no irrigation, T1 - full irrigation and T2 - poor irrigation) and three sowing dates (E1 – March 21st, E2 – April 24th and E3 – August 23rd), and b) determine efficient irrigation strategies for bean crops in Londrina, PR. The calibration of the coefficients of the IAPAR 57 cultivar was successful, allowing good performance of the model to simulate the phenology, canopy and biomass growth, and productivity in the three water regimes, during the cultivation periods with adequate temperatures (E1 and E3). In the period in which suboptimal temperatures prevail for the crop (≤17ºC), as in E2, associated with poor irrigation or no irrigation, the model does not adequately penalize the combined thermal and water stress, even adjusting the stress coefficients for these conditions, resulting in overestimation of crop growth and productivity. Therefore, the AquaCrop model lacks to extend the effect of cold stress, not only to the pollination period, but also to the other critical periods, in order to represent canopy defoliation or even plant death. In long-term simulations, the model was able to calculate productivity variability due to uncertainties in precipitation over the years and indicate irrigation strategies for Londrina, PR (irrigations after depletions of 120 and 170% of easily available water, for sowing in March and September, respectively) aiming to achieve high crop yields (>2,769 kg ha^{-1}) and water yields (1,050 to 1,445 kg m^{-3}), with the application of intermediate depths (<150 mm). Although there is a need to improve the calculation of the thermal stress penalty, the AquaCrop model has good capacity to be used in studies and applications in which water regimes are limiting to crop production.

Keywords: canopy cover, irrigation management, agricultural modeling, productivity.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico de forma exponencial nos últimos anos demanda maior quantidade de alimentos e causa pressões ambientais pela necessidade de novas fronteiras agrícolas e incremento na utilização de recursos hídricos. Este cenário pressiona governantes a adotarem políticas públicas voltadas à utilização consciente dos recursos naturais, especialmente a água, uma vez que esse recurso é primordial e afeta diretamente a produção agrícola (Fagundes et al., 2020). O Brasil ocupa a sexta posição no ranking mundial de países com áreas irrigadas, com 8,2 milhões de hectares (FAO,2020), e sua área irrigada vêm aumentando significativamente nos últimos anos.

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é amplamente consumido no Brasil e no mundo. O Brasil situa-se entre os maiores produtores de feijão, com grande parte da produção destinada ao consumo interno, sendo o estado do Paraná o maior produtor nacional (CONAB, 2021).

O cultivo de feijão é realizado em grande parte por pequenos agricultores e é distribuído por todo o território durante três épocas distintas, “feijão das águas” na primavera, “feijão da seca” no outono e “feijão de inverno” no inverno, o que favorece a oferta ao longo do ano (Coêlho, 2018).

O feijoeiro é bastante sensível às condições ambientais adversas, sendo os fatores térmico e hídrico primordiais para o crescimento da cultura. Temperaturas fora do intervalo considerado ótimo (17°C a 25°C) podem impactar a floração, formação de vagens, e massa e número de sementes. A ocorrência de geada impacta diretamente o número de vagens e reduz a produtividade em razão do abortamento dos grãos. Altas temperatura, associadas com umidade do ar acima de 70%, são propensas ao aparecimento de doenças (Heinemann et al., 2009).

A deficiência hídrica reduz a população de plantas e causa abscisão de flores, polinização deficiente e menor número e massa de vagens e sementes, resultando em baixa produtividade, quando ocorre durante os períodos críticos que são a semeadura, florescimento, formação de vagens e enchimento de grãos (Faria, 1989;

Oliveira et al., 2018). O uso da irrigação na cultura do feijão é fundamental em áreas sobre deficiência hídrica, pois supre a necessidade hídrica durante o ciclo de cultivo, possibilitando atingir o seu potencial produtivo, além de permitir o cultivo em diversas épocas do ano. O estresse hídrico na cultura do feijão, dependendo do estágio fenológico em que acontece, reduz em até 75% a produtividade relativa de grãos, gerando prejuízos ao agricultor (Oliveira et al., 2018). Para as condições do Paraná, durante 8 anos de experimentação, (Faria, 1989) encontrou alta correlação (R^2 = 0,65) entre produtividade de feijoeiro e número de dias de déficit hídrico no período entre 10 dias antes e após o florescimento.

A quantificação do decréscimo de produtividade devido aos fatores climáticos, particularmente a variabilidade interanual da precipitação, é fundamental para se avaliar o risco da cultura em função da deficiência hídrica e se a irrigação é viável economicamente. A obtenção desses conhecimentos requer a condução de experimentos de campo durante vários anos, o que é muito custoso e demorado (Raes et al., 2012). Como alternativas, apresentam-se os modelos de crescimento de cultivos como ferramentas altamente eficientes e de baixo custo, para quantificar as respostas de uma ampla gama de culturas à restrição hídrica e à irrigação.

A utilização de modelos de crescimento de cultivos possibilitam realizar testes prévios antes de ir para o campo, reduzindo os custos com mão de obra e tempo (Steduto et al., 2009). Possibilitam ainda simulações ao longo de séries meteorológicas históricas existentes no local de interesse, visando determinar riscos e respostas de culturas aos diferentes manejos de irrigação.

Na literatura são disponíveis modelos já testados em larga escala para quantificar a produtividade de várias culturas, sob regimes hídricos diversos, visando avaliar a sua resposta à irrigação, a exemplo do modelo CSM- CROPGRO-Drybean do sistema DSSAT (Hoogenboom, et al,2019), em estudos conduzidos por Faria et al.(1997) e Oliveira et al. (2012) . Grande parte dos modelos incluem coeficientes de cultura como entrada, sendo, em sua maioria, difíceis de medir ou estimar (Ran et al., 2017), o que torna restrito o uso desses modelos (Jones et al., 2017).

O Modelo AquaCrop foi concebido pela FAO - Food and Agricultural Organization para ser um aplicativo menos complexo, que utiliza uma quantidade reduzida e intuitiva de coeficientes de entrada (Steduto et al., 2009), e concilia facilidade no uso, eficiência e robustez (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2012. O AquaCrop visa à comunidade técnico-cientifica, podendo ser utilizado por estudantes, extensionistas e especialistas em políticas públicas (Steduto et al., 2009).

No modelo AquaCrop as características de uma dada cultivar são representadas por parâmetros ou coeficientes que representam as suas características morfológicas, fenológicas e fisiológicas, a fim de simular o crescimento e desenvolvimento da cultura. Em virtude de cada cultivar estudada apresentar variabilidade genética e, consequentemente, distinção da cultivar padrão, há necessidade de calibração do modelo, que consiste em ajustar esses coeficientes para que as simulações se aproximem dos valores observados. Esse procedimento é realizado interativamente até que o resultado esteja dentro de uma faixa aceitável de erro.

O objetivo deste trabalho foi: a) calibrar e testar a capacidade do modelo AquaCrop em simular o crescimento e produtividade da cultura do feijão, cultivar IAPAR 57, sob estratégias de irrigação (T0 – sem irrigação, T1 – irrigação plena e T2 - irrigação deficitária) e épocas de semeadura (E1 – 21 de março, E2 – 24 de abril e E3 – 23 de agosto), e b) aplicar o modelo em simulações de longo período para determinar melhores estratégias de manejo de irrigação para o município de Londrina, Paraná, Brasil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Cultura do Feijão

O feijão comum é uma planta pertencente à família *Fabasae*, gênero *Phaseolus*, originário do continente americano, sendo cultivado em diversas regiões ao redor do mundo em diferentes climas e manejos, tendo grande importância no consumo humano (Freitas, 2006). É uma planta do tipo C3, que necessita de

suprimento hídrico de 250 a 300 mm bem distribuídos durante o ciclo (Oliveira et al., 2018) e temperaturas entre 18 e 25°C para atingir maiores taxas fotossintéticas (Paulilo, 2015).

O feijoeiro concentra seu sistema radicular nas camadas superficiais do solo, além de ter uma baixa capacidade de recuperação após a condição de estresse (Guimarães, Stone, Brunini, 2006). Para alcançar boas produtividades, a cultura requer boa distribuição de chuvas ao longo do ciclo (Bertoldo et al., 2019), no entanto, a ocorrência de estresse hídrico durante as fases críticas da cultura causa maiores decréscimos de produtividade. Os estádios mais sensíveis correspondem à semeadura e ao período de início da floração até a formação das vagens (Oliveira et al., 2018).

Diferentemente da maioria dos cultivos de grãos em que a produção é destinada ao mercado externo, a produção nacional de feijão atende principalmente às demandas do mercado interno, tornando o país um dos maiores consumidores (Costa et al., 2021). O fato de o maior consumo de feijão ser concentrado nos principais países exportadores, como no caso do Brasil, o comércio internacional é pequeno devido à menor demanda externa. Este cenário vem mudando pós-pandemia, devido a conscientização dos benefícios que a cultura oferece à saúde e a sua utilização em dietas vegetarias. Este novo cenário, começa a pressionar os países produtores a aumentar a sua produtividade para atender ao novo mercado consumidor (Coêlho, 2021).

O feijoeiro é uma espécie com boa adaptação aos climas quentes e úmidos, sendo cultivada em várias condições climáticas, tecnológicas, épocas e sistemas de plantio por todo o território brasileiro (Tavares et al., 2017). A temperatura é um fator primordial para o bom desenvolvimento da cultura, quando difere do intervalo considerado ótimo (17°C a 25°C), pode gerar prejuízos na formação de vagens, florescimento e até abortamento de flores; além disso, áreas com umidade do ar acima de 70% são mais propensas ao aparecimento de doenças. Conjuntamente a isto, a velocidade do vento influencia na sustentação das flores, todavia, a partir da formação da vagem, há uma resistência maior a força do vento (Heinemann et al., 2009).

A temperatura basal inferior para a cultura do feijão é 10°C e a temperatura basal superior 35°C, prejudicando o crescimento da planta em temperaturas menores/maiores (Renato et al., 2013). Temperatura acima dos 35°C causam esterilização do grão de pólen e abaixo dos 12°C retarda o crescimento vegetativo, principalmente se ocorrer junto ao estresse hídrico (Heinemann et al., 2009).

A disponibilidade de água contribui para o desenvolvimento da planta, impactando na produtividade. Quando bem manejada, a irrigação auxilia para que a cultura do feijão complete o ciclo, além de permitir o cultivo em diversas épocas do ano. O déficit hídrico prejudica o crescimento da cultura e afeta principalmente a floração e a formação de vagens. É importante destacar que há momentos em que o estresse hídrico é necessário, como na fase posterior ao enchimento dos grãos para favorecer a maturação e secagem (Andrade et al., 2015).

O excesso de água também prejudica no ciclo de cultivo do feijão, podendo diminuir a atividade respiratória e favorecer o surgimento de doenças como podridão radicular (patógenos *Fusarium solani* e *Rhizoctonia solanie*) mofo-branco (patógeno *Sclerotinia sclerotiorum*) (Wendland et al., 2018).

A irrigação realizada a partir de uma estimativa de evapotranspiração e balanço de água no solo auxilia a decisão da melhor estratégia a ser adotada em campo, de acordo com a disponibilidade do local. Em estudo realizado por Vale et al. (2012) e Bertoldo et al. (2019) foi constatado que, ao suspender a irrigação por um período de 10 e 15 dias, respectivamente, antes da pré-floração, ocorreram efeitos negativos na produtividade final. A falta de água no período reprodutivo, resulta abscisão de flores, polinização deficiente e redução de número de vagens e número de grãos por vagem, resultando na baixa produção de grãos (Oliveira et al., 2018).

Outros fatores também afetam o ciclo de cultivo do feijão, como a geada, que impacta diretamente no número de vagens e reduz o produtividade em razão do abortamento dos grãos. A temperatura do solo, umidade relativa, vento, granizo, e radiação também impactam na produtividade final da cultura (Heinemann et al., 2009).

2.2 Balanço Hídrico do Solo

O balanço hídrico é uma ferramenta que auxilia no entendimento do uso da água no solo, contabilizando sua entrada e saída no solo, possibilitando a caracterização do clima de uma região e na demanda de água para irrigação. O conceito desenvolvido por Thornthwaite (1948) e Thornthwaite e Mather (1955), serviram de base para compreender a correlação das variáveis climáticas com as culturas e entender como as plantas utilizam a água no solo, proporcionando uma agricultura mais eficaz para os sistemas de irrigação e manejo da cultura (Parreira et al., 2019).

Utilizando-se o balanço hídrico do solo é possível entender como o dinâmica da água está ocorrendo no sistema solo-planta-atmosfera, auxiliando na tomada de decisão no tocante à prática de irrigação para suprir a deficiência hídrica no solo. (Passos et al., 2017).

O balanço hídrico da cultura é elaborado a partir de dados de entrada da água no solo: irrigação ou precipitação, a sua infiltração na superfície, e dados de saída como evapotranspiração, drenagem e escoamento superficial, levando em consideração o sistema radicular da planta e um determinado período; se a quantidade de água que entra no tempo considerado for maior que a quantidade que sai durante o mesmo período, o saldo será positivo e, caso contrário, será negativo. Desse modo, é possível definir qual período a planta está mais propensa ao estresse hídrico, corroborando para melhor utilização dos recursos hídricos (Passos et al., 2017)

2.3.O modelo AquaCrop

A busca por conhecimento sobre modelagem de simulação agrícola foi intensificada a partir de 1960, por grupos de pesquisa, cientistas e usuários com *expertize* em áreas multidisciplinares de ciências agrárias, visando ao entendimento dos processos fisiológicos vegetais e a previsão do crescimento dos cultivos, tais como os estudos de De Wit (De Wit, 1965; Brouwer e De Wit, 1968).

Os modelos computacionais de crescimento de cultivos são aplicativos que

estimam o crescimento e desenvolvimento de plantas sob diversos cenários a partir de relações matemáticas empíricas (Chibarabada, Modi, Mabhaudhi, 2020) ou mecanicistas (Hoogenboom et al, 2019). Ao relacionarem os componentes do sistema solo-água-planta-atmosfera, esses modelos possibilitam a indicação de melhores estratégias de manejo para se atingir maior produtividade da água, definir melhores datas de semeadura/plantio, selecionar cultivares e fertilizações adequadas (Lima Filho et al., 2013).

A concepção do modelo AquaCrop baseia-se no trabalho de Doorenbos e Kassam (1979), que estima a resposta de culturas em função da disponibilidade hídrica, relacionando a produtividade da cultura à sua evapotranspiração:

$$\left(\frac{Y_m - Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(\frac{ET_m - ET_a}{ET_m}\right) \quad (1)$$

em que *Ym* e *Ya* são a produtividade máxima na ausência de estresse hídrico (kg ha^{-1}) e produtividade real (kg ha^{-1}), respectivamente, *ETm* e *ETa* são a evapotranspiração máxima e real (mm/unidade de tempo) e *Ky* é o coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (adimensional). O AquaCrop evolui em relação ao método de Doorenbos e Kassam (1979) pela partição da evapotranspiração (ET) em dois componentes: transpiração da cultura (Tr) e evaporação do solo (E), como será apresentado a seguir.

A calibração de um modelo o possibilita representar adequadamente a realidade de campo. No modelo AquaCrop as características de uma dada cultivar são representadas por parâmetros ou coeficientes que representam as suas características morfológicas, fenológicas e fisiológicas, a fim de simular o crescimento e desenvolvimento da cultura. Em virtude de cada cultivar estudada apresentar variabilidade genética e, consequentemente, distinção da cultivar padrão, há necessidade de calibração do modelo, que consiste em ajustar esses coeficientes para que as simulações se aproximem dos valores observados. Esse procedimento é realizado interativamente até que o resultado esteja dentro de uma faixa aceitável de erro.

Após esta etapa ser realizada com sucesso, procede-se à validação do modelo a fim de testar sua capacidade de imitar o comportamento em campo do cultivo. Uma vez calibrado e testado, o modelo pode ser aplicado em vários cenários, tais como é realizada para verificar o modelo diante de um cenário futuro, testando a capacidade de prever em diferentes situações. A sensibilidade do modelo e suas repostas a alterações é fundamental para sua aplicação (Lopes,2005).

O AquaCrop simula a produtividade da cultura em função da água, trazendo consigo a possibilidade de avaliar estratégias de manejo da cultura considerando condições climática, solo e coeficientes de cultivo (Chibarabada; Modi; Mabhaudhi, 2020; Magalhães et al., 2019; Oliveira et al., 2021).

No AquaCrop a produtividade potencial e a produtividade real são os focos do modelo, colaborando para melhor uso dos recursos hídricos em áreas que a água é um fator limitante na produção (Steduto et al., 2009). A produtividade do cultivo é calculada em quatro etapas, em passos de cálculo diários, que consistem na simulação do crescimento do dossel verde, transpiração das culturas, biomassa e a produtividade final de colheita (Vanuytrecht et al., 2014; Masasi, 2020). O AquaCrop é um modelo a nível de dossel (Mabhaudhi et al. (2014). Assim, o dossel, através de sua expansão, envelhecimento e senescência, é central para o modelo, pois determina a quantidade de água transpirada, que por sua vez determina a quantidade de biomassa produzida (Raes et al., 2009)

Diferentemente de outros modelos que utilizam o índice de área foliar (IAF), no modelo AquaCrop utiliza-se a cobertura do dossel (CC) para simulação da transpiração da cultura (Tr) e, posteriormente, no cálculo da biomassa (B), baseado no conceito de produtividade de água normalizada (Steduto et al., 2012). A evolução de CC ao longo do ciclo e os coeficientes envolvidos são ilustrados na Figura 1.

Tr é simulada diariamente no modelo de acordo com a equação a seguir:

$$T_r = \mathrm{CC}^{*}\ K_{c_{Tr,X}}\ ET_o \qquad (2)$$

em que Tr é transpiração (mm dia $^{-1}$), CC* é cobertura do dossel ajustada para efeitos

micro-advectivos (%), $K_{cTr,}$ é valor máximo do coeficiente de transpiração da cultura (adimensional) e ET_o é evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}). No AquaCrop o ajuste de CC para efeitos micro-advectivos baseia-se nos dados experimentais de Adams et al. (1976) e Villalobos e Fereres (1990).

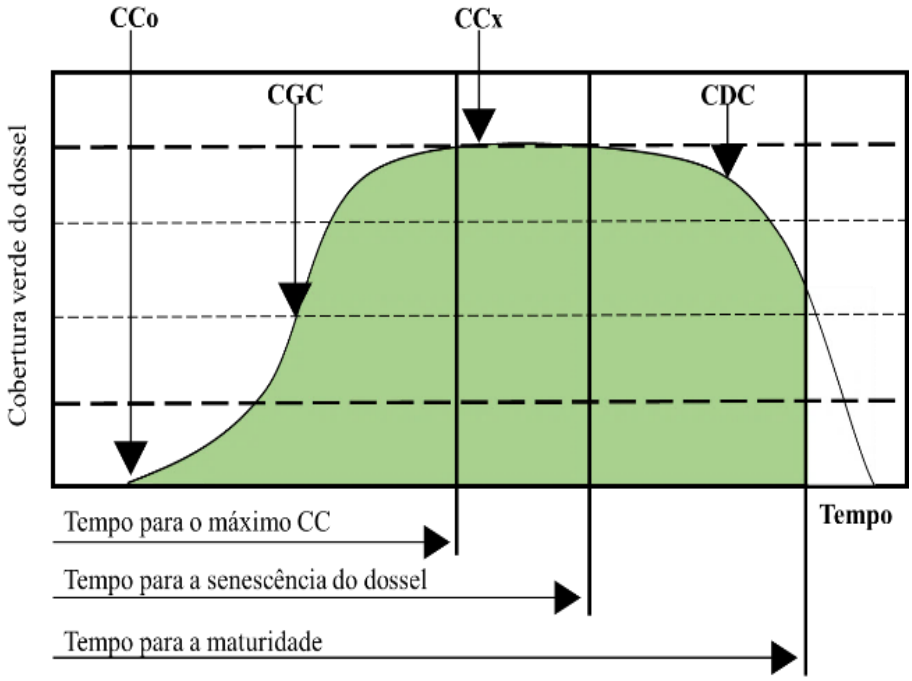


Figura 1. Evolução da cobertura do dossel durante o ciclo de cultivo. CCo - cobertura inicial do dossel no momento da emergência da cultura, CGC - taxa de crescimento, CCx - cobertura máxima e CDC - coeficiente de declínio do dossel. Adaptado de Steduto et al. (2009).

A produção de biomassa é estimada em função da transpiração da cultura pelo produto entre o parâmetro produtividade da água e transpiração da cultura, conforme a seguinte equação:

$$B = WP^* \times \Sigma Tr \quad (3)$$

sendo *B* biomassa da parte área (kg ha^{-1}), *WP** produtividade da água normalizada (kg m^{-2}), obtida da relação entre a biomassa produzida e água consumida e normalizada pela somatória diária da transpiração da cultura pela evapotranspiração

de referência (ETo) sob determinada concentração de CO_2 na atmosfera (Equação 4), tornando-se um fator conservativo fornecido no modelo como dado de entrada da cultura, e ΣTr: somatória da transpiração da cultura ao longo do ciclo (mm dia^{-1}) (Steduto et al., 2007).

$$WP^{*} = \left[\frac{B}{\sum\left(\frac{Tr}{ETo}\right)}\right]_{[CO_2]} \quad (4)$$

O modelo AquaCrop representa os tipos de estresse por coeficientes denominados como Ks, que variam de 0 a 1 e indicam os efeitos do estresse dependendo do tempo, gravidade e duração, podendo ocasionar: a) redução da taxa de expansão do dossel, b) alteração da taxa de senescência, c) fechamento de estômatos e d) redução do índice de colheita (HI) (Raes et al., 2009). Acima do limite superior do teor de água no solo, o estresse hídrico não é considerado, então Ks é "1". Abaixo do limite inferior, o efeito do estresse é pleno e o valor de Ks é "0". Entre os limites superior e inferior os valores de Ks são expressos conforme a fração (p) da quantidade total de água disponível do solo (TAW) entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (Steduto et al., 2009).

A produtividade potencial da cultura é simulada pelo produto entre B e índice de colheita (HI), e modificada pelo coeficiente de estresse f_{HI} para se obter a produtividade real (Y) por meio da seguinte equação:

$$Y = f_{HI} \times HI \times B \quad (5)$$

na qual B e *Y* são dados em kg ha^{-1} e f_{HI} e HI são adimensionais, sendo HI dado de entrada do modelo que é ajustado conforme estresses ocorridos ao longo do ciclo da cultura. Alguns autores sugerem que o valor deve de HI deve ser restrito a cada região e cultivar estudada (Vanuytrecht et al., 2014; Nunes et al., 2021).

Para realizar simulações, há necessidade de alimentar o modelo com dados de entrada, que devem ser organizados no formato requerido pelo modelo AquaCrop, agrupados em arquivos de cultura, clima, solo, irrigação e, posteriormente, agrupados um arquivo final denominado de Projeto para realizar as simulações. Esses dados

incluem características da cultivar de interesse, tais como profundidade de raiz (máxima e mínima), densidade de semeadura/plantio, requerimentos térmicos (temperatura basal inferior e superior), datas de estádios fenológicos (semeadura, floração, senescência, colheita), cobertura do dossel, índice de colheita, coeficientes de estresse; dados climáticos (precipitação, temperatura, vento, radiação solar, umidade relativa e concentração anual de CO_2) dados de solo (umidade no ponto de murcha permanente, saturação, textura, e condutividade hidráulica saturada) e escoamento superficial utilizando o método Número-Curva (CN); e de irrigação (lâmina aplicada e datas de aplicação).

O sistema contínuo solo-planta-atmosfera é retratado no AquaCrop levando a interação entre fatores climáticos, fenologia, balanço hídrico, fertilidade do solo e uso da água. As relações entre os diferentes componentes do modelo são apresentadas a partir do fluxograma da Figura 2.

Informações com maior detalhamento sobre programação e processos de simulação utilizado pelo modelo são disponíveis em artigos publicados pelos mentores do modelo (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009; Hsiao et al., 2009), complementadas na publicação da FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66 “Crop Yield Response to Water” (Steduto et al., 2012) e nos manuais de referência do modelo, no site da FAO, atualizados sempre que uma nova versão é lançada.

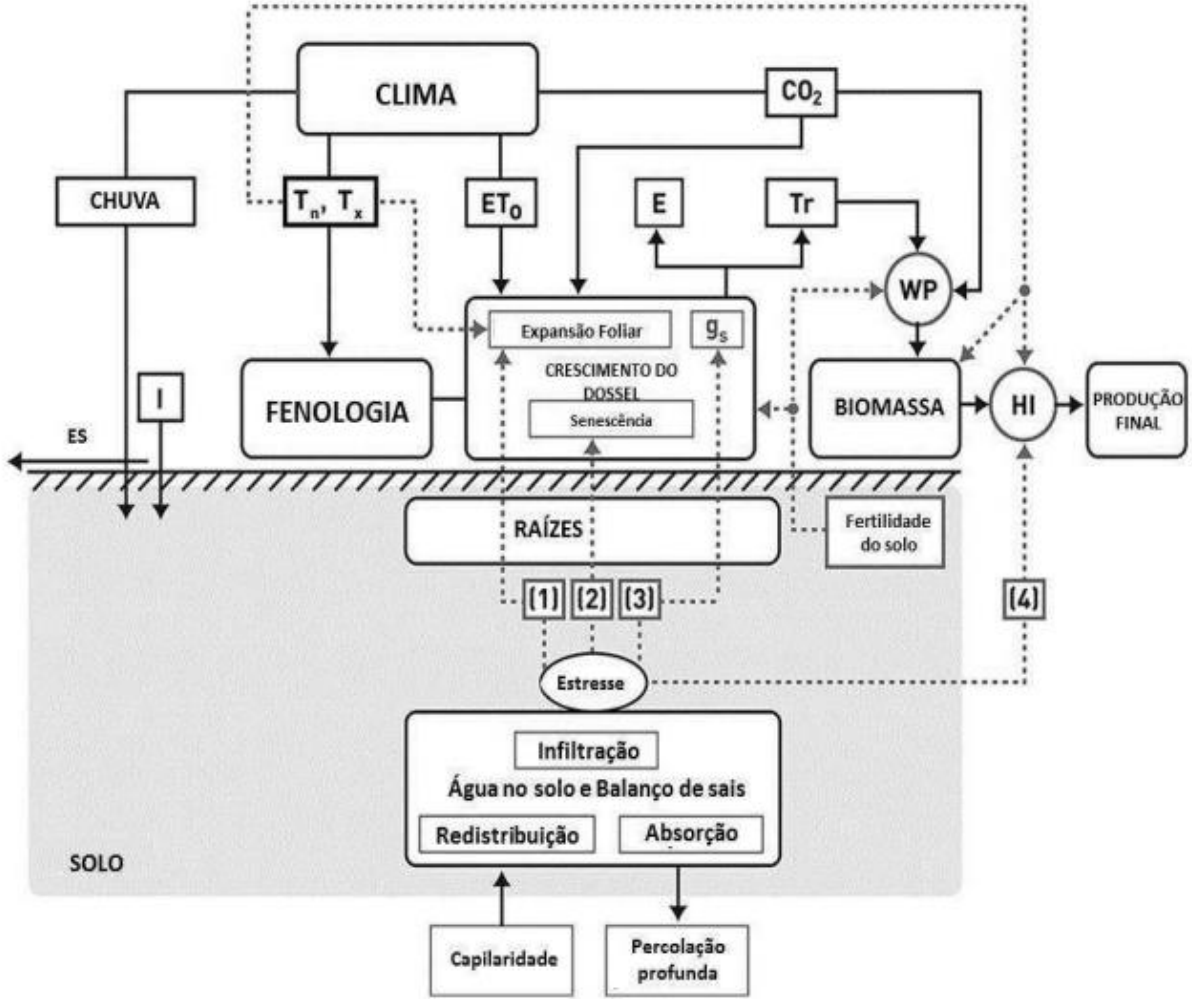


Figura 2. Fluxograma do modelo AquaCrop, indicando os principais componentes do contínuo solo-planta-atmosfera e os parâmetros da fenologia de transporte, cobertura do solo pelo dossel, transpiração, produção de biomassa e produção final (I - irrigação; Tn–temperatura mínima do ar; Tx – temperatura máxima do ar; ETo - evapotranspiração de referência; E - evaporação do solo; Tr– transpiração da cultura; gs - condutância estomática; WP- produtividade da água; HI - índice de colheita; CO2 - concentração de dióxido de carbono atmosférico; ES – escoamento superficial. (1), (2), (3), (4) - diferentes funções de resposta ao estresse de água). As linhas contínuas indicam ligações diretas entre as variáveis e os processos. As linhas tracejadas indicam retroalimentação. Fonte: Steduto et al. (2009)

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Condições experimentais

O conjunto de dados necessários para calibrar e testar o modelo foram obtidos no período de março a novembro de 1995 em experimento realizado no antigo Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), hoje incorporado ao Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná), em Londrina, PR (latitude 23°21'13.07" S , longitude 51°9'42.83" W). O clima da região, segundo a classificação climática de Köppen é do tipo Cfa, clima subtropical úmido, com temperatura do ar média do mês mais frio inferior a 18°C e temperatura do ar média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes e chuvosos, e veranicos ocorrendo ao longo do ano, sendo mais frequente nos meses de março a setembro e geadas ocasionais em julho, sem estação seca definida (Alvares et. al, 2014). O comportamento das variáveis meteorológicas durante a condução do experimento é apresentado na Figura 3.

O solo da área experimental em Londrina é classificado como Latossolo Vermelho distrófico, tendo como características textura argilosa, média capacidade de retenção de água disponível, boa drenagem, lençol freático muito profundo e baixo teor de matéria orgânica. As características de armazenamento e distribuição de água no solo foram obtidas a partir de curvas de retenção de água e condutividade hidráulica insaturada obtidas através das equações de Genuchten & Nielsen (1985). As características físico-hídricas do solo estão dispostas na Tabela 1, conforme dados obtidos por Faria et al., (1997).

O experimento em campo consistiu na avaliação do desenvolvimento, crescimento e produtividade da cultura do feijão sob três épocas de semeadura e três regimes hídricos. A cultivar de feijão utilizada foi a IAPAR 57, grão tipo carioca, hábito de crescimento tipo II, originária do cruzamento, realizado no IAPAR, entre os genótipos: MD 632 (Porrilo Sintético/Aeté 1-38 // Turrialba 1/TMD-1) / BAC 32. Após vários ciclos de seleção, obteve-se a linhagem IAPAR MD 806 em 1988. Esta foi testada e aprovada para recomendação em 1992, passando a ser largamente plantada em razão da tolerância ao vírus do mosaico dourado do feijoeiro *(Bean golden mosaic virus*, BGMV) (Juliatti et al., 2005). A escala de estádio fenológico utilizada foi proposta por Fernández, Gepts, López (1983) do Centro Internacional de

Agricultura Tropical - CIAT.

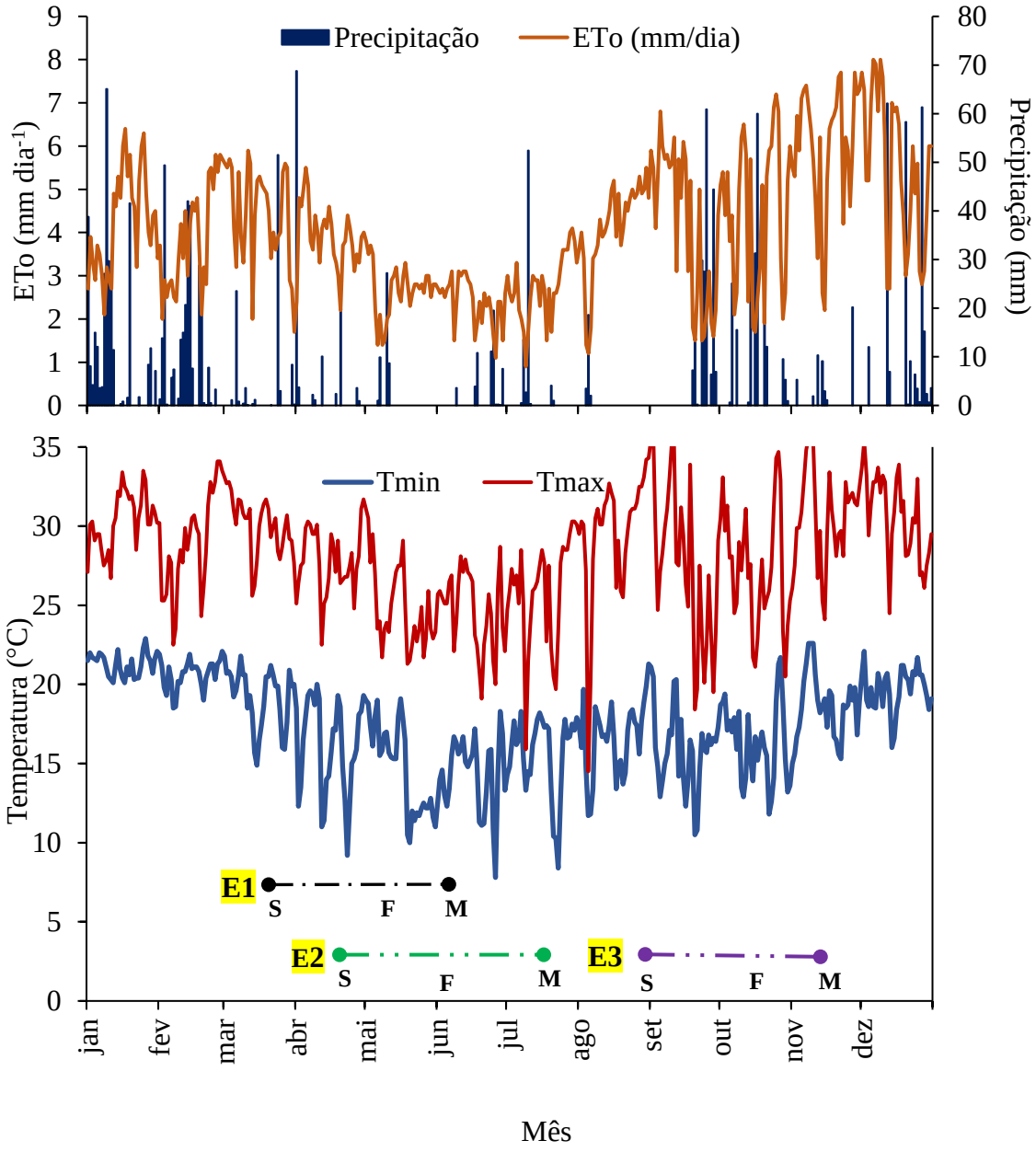


Figura 3. Condições meteorológicas durante condução do experimento com feijoeiro (Cultivar IAPAR 57) estádios fenológicos (S: Semeadura; F: Floração; M: Maturação) em três épocas de semeadura (E1 – 21 de março, E2 – 24 de abril e E3 – 23 de agosto).

Tabela 1. Granulometria e retenção de água do Latossolo Vermelho distrófico da área experimental.

Profundidade	Argila	Silte	Areia	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{SAT}
(cm)		%		($cm^3\ cm^{-3}$)		
0-10	82	13	5	0.20	0.35	0.43
10-25	82	11	7	0.27	0.38	0.45
25-40	80	14	6	0.27	0.38	0.45
40-70	79	14	7	0.27	0.36	0.43
70-100	78	13	9	0.27	0.36	0.43
100-130	79	13	8	0.27	0.36	0.44

θ_{PMP}: umidade no ponto de murcha permanente; θ_{cc}: umidade na capacidade de campo e θ_{SAT}: umidade na saturação. Fonte: Faria et al., (1997).

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com parcela subdividida, com três repetições, com tratamentos constituídos de épocas de semeadura alocadas na parcela e regimes hídricos na subparcela. As épocas de semeadura foram: E1 - 21 de março de 1995, E2 - 24 de abril de 1995 e E3 - 23 de agosto de 1995, e os regimes hídricos: T0 – não irrigado, T1 – Irrigação ao potencial matricial (ψ) de -25 kPa; e T2 – Irrigaçaõ ao ψ = -70 kPa.

Cada subparcela teve dimensões de 5 x 5 metros, sendo a bordadura as áreas incluídas a 0,5 m de cada lateral da parcela. O espaçamento entre linhas de semeadura foi de 0,5 m, com 10 a 12 plantas por metro, para se obter 200.000 plantas por hectares. O experimento foi mantido livres de invasoras e o controle fitossanitário e adubações foram realizados conforme recomendações do IDR-Paraná.

As irrigações foram realizadas por aspersão, sendo o momento de aplicação de água determinado por medidas de potencial matricial, realizadas por tensiômetros com vacuômetro de mercúrio, instalados no centro das subparcela, à profundidade de 25 cm. Quando o potencial matricial crítico era atingido, aplicaram-se lâminas de água necessárias para reposição da umidade do solo ao nível de capacidade de campo na camada 0 - 70 cm. Deste modo, nos tratamentos T1 e T2 aplicaram-se lâminas de 30

e 45 mm, correspondendo a 50 e 70% da água disponível do solo, respectivamente. As irrigações foram interrompidas nos estádios de semente formada.

A aplicação de água foi realizada por bicos pulverizadores TeeJet, cone cheio, instalados em canos de PVC sustentados por uma armação metálica a 0,5 m de altura das plantas. O volume de água aplicado em cada irrigação foi determinado por um hidrômetro instalado após um sistema de filtragem. O monitoramento da umidade do solo foi realizado por medições com frequência de 3 a 4 dias, por método gravimétrico a 0-10 cm de profundidade e por sonda de nêutrons (Campbell Pacific Neutron Probe/503 DR Hydroprobe), calibrada no local, às profundidades de 10-25, 25-40, 40-55, 55-70, 70-85, 85-100 e 100-115 cm.

A área foliar do feijoeiro foi determinada por um integrador de área (Li cor/Model 3100) e a matéria seca pela da secagem das plantas em estufa a 70°C, até peso constante, utilizando amostras de plantas coletadas em 1 metro de linha da cultura (nas amostragens parciais, durante o ciclo) e 2,5 metros na colheita. Estas mesmas amostras foram utilizadas para determinar a matéria seca e os componentes da produção, tais como massa de folhas, pecíolos e talos; massa e número de vagens e grãos. Os dados de área foliar do feijoeiro foram utilizados como base para obtenção da cobertura do dossel (CC) a partir do índice de área foliar (IAF) na Equação 6 proposta por Hsiao et al. (2009):

$$\mathrm{CC} = 1{,}005\ x\ [1 - \exp\ (-0{,}6\ IAF)]^{1{,}2} \qquad (6)$$

3.2. Calibração, teste e aplicação.

A calibração dos coeficientes da cultivar IAPAR 57 requeridos no modelo AquaCrop foi realizada com os dados experimentais do tratamento T1, considerado como irrigação plena, nas três épocas de semeadura (E1, E2 e E3). O teste do modelo foi realizado pela comparação entre as simulações obtidas com o modelo alimentado com os coeficientes calibrados da cultivar IAPAR 57 e os resultados experimentais dos tratamentos T0 e T2, nas três épocas de semeadura.

A aplicação do modelo foi realizada com simulações de longo período, utilizando-se dados meteorológicos históricos do local do experimento, de 1980 a 2016. As simulações foram efetuadas no modo sazonal do aplicativo AquaCrop, no qual simulam-se os vários ciclos de cultivo do período de dados meteorológicos históricos. As épocas de semeadura simuladas foram em março e setembro, a fim de representar os cultivos da seca, no outono, e das águas, na primavera.

Utilizou-se o aplicativo AquaCrop versão 6.1 – 2018 (Raes et al., 2018) para proceder às simulações requeridas para a calibração dos coeficientes da cultura, teste do modelo e aplicação de longo período. Inicialmente, foram criados os arquivos de clima, solo, condições iniciais e manejo de irrigação, correspondentes ao local do experimento e manejo de cada tratamento. Criou-se também o arquivo da cultivar de feijoeiro IAPAR 57 adotando-se, inicialmente, os coeficientes da cultivar padrão disponíveis no modelo AquaCrop (DrybeanGDD.CRO). Para representar as condições do estudo, foram substituídas os dados de fenologia e crescimento potencial da cultivar DrybeanGDD.CRO pelos valores medidos em campo para a IAPAR 57 no tratamento T1 - E3 e foram adotados as práticas de manejo da cultura, tais como datas de semeadura, densidade de plantas, além das condições iniciais de cultivo para este tratamento. Feito estes ajustes, as datas cronológicas foram convertidas para soma de graus-dia, com temperatura basal inferior igual a 12°C, definida após processo de tentativa e erro afim de minimizar os desvios na simulação.

A calibração dos coeficientes da cultivar IAPAR 57 foi realizada adotando-se um processo interativo de tentativa e erro, no qual os valores dos coeficientes da cultura eram ajustados, visando minimizar as discrepâncias entre as simulações e dados observados de fenologia, cobertura do dossel, biomassa da parte aérea, produtividade e índice de colheita (Nunes et al., 2021).

O arquivo de solo foi criado com dados obtidos por Faria et al., (1997) descrevendo as características do perfil de solo na área experimental conforme Tabela 1. O arquivo de clima foi elaborado com dados meteorológicos diários de temperaturas máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação, obtidos de uma estação meteorológica próximo ao local de estudo.

A precisão e acurácia, correspondentes ao desempenho do modelo para as variáveis determinadas durante o ciclo de crescimento da cultura (CC, B e armazenamento de água no solo), foram aferidas pelos índices estatísticos raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 7) e coeficiente de determinação (R^2) (Equação 8), conforme descritos por Raes et al., (2018). Para as variáveis determinadas ao final do ciclo, tais como durações das fases do ciclo vegetativo, biomassa final, índice de colheita e produtividade, o desempenho do modelo foi avaliado pelos desvios percentuais entre os valores observados e simulados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{(O_i - \bar{O}) \sum (S_i - \bar{S})}} \right] \quad (8)$$

sendo O_i o valor observado, $\bar{O}$ a média dos valores observados, S_i o valor simulado e $\bar{S}$ a média dos valores simulados.

O índice RMSE (Equação 7) afere a performance do modelo e retrata a diferença média entre os valores observados e simulados. A unidade do índice é expressa na mesma que é utilizada entre as variáveis observadas e simuladas, com os valores próximos a 0, indicando bom desempenho do modelo (Loague e Green, 1991).

O coeficiente de determinação (R^2) (Equação 8) indica a concordância entre dados observados e simulados. Segundo Steduto et al., (2009), diferenças menores que 10% entre os valores observados e simulados são consideras acuradas; ao mesmo tempo que diferenças menores que 20% são consideradas toleráveis.

Após a calibração do modelo, foram realizados testes, utilizando os dados independentes, isto é, que não foram utilizados no processo de calibração, sendo estes relacionados aos tratamentos T0 e T2 conforme descrito anteriormente. As aplicações do modelo foram geradas após a fase de teste, avaliando o desempenho do modelo em uma série histórica, com diferentes níveis de irrigação.

4. RESULTADOS

4.1 Calibração do Modelo

Os coeficientes calibrados para a cultivar IAPAR 57 para o modelo AquaCrop, utilizando dados experimentais do tratamento com irrigação plena (T1) nas três épocas de semeadura (E1, E2 e E3), são apresentados na Tabela 2. Adotando-se a temperatura basal de 12°C, a partir da semeadura, o tempo térmico em graus-dia (GD) simulado pelo modelo foi de 121 GD para a emergência, 432 até a floração, que teve duração de 320 GD, 689 GD até o início da senescência e 805 GD até a maturação. Os tempos térmicos para se atingir a profundidade máxima de raízes e a cobertura máxima do dossel foram de 421 e 547 GD, respectivamente.

O crescimento do dossel foi calibrado com cobertura máxima de 81% e a profundidade de raízes em 35 cm, O coeficiente de transpiração máximo de cultivo foi calibrado dentro do limite estabelecido pelo método FAO 56 (Allen et al., 1998), em 1,16, com redução de 0,3% dia^{-1} com a senescência. O índice de colheita de 53% reflete a maior partição de grãos na biomassa da cultivar IAPAR57. O valor calibrado para produtividade da água normalizada em 19 g m^{-2} situa-se dentro do intervalo recomendado pela FAO (15 a 20 g m^{-2}) para plantas C3 (Raes et al., 2018), como o feijoeiro.

A cultivar IAPAR 57 foi calibrada como “Sensível ao estresse hídrico” tanto para expansão da cobertura do dossel, quanto ao fechamento estomático. Para condições de frio afetando a transpiração da cultura, o limiar crítico foi calibrado em 16,6°C e o efeito da temperatura na polinização foi calibrado para a faixa crítica de temperaturas de 4 a 9°C.

Tabela 2. Coeficientes calibrados da cultivar IAPAR 57 de feijoeiro para o modelo AquaCrop.

Coeficiente	**Unidade**	**Valor**
População de plantas	Plantas por ha	200.000
Fenologia		
Tempo até a emergência	Graus-dia	121
Tempo para cobertura máxima do dossel (CCx)	Graus-dia	547
Tempo para a floração	Graus-dia	432
Tempo para atingir a profundidade efetiva máxima das raízes	Graus-dia	421
Duração da floração	Graus-dia	320
Tempo para a senescência do dossel	Graus-dia	689
Tempo até a maturação	Graus-dia	805
Período de determinação do índice de colheita (HI)	Graus-dia	360
Cobertura inicial do dossel (CCo)	%	2
Cobertura máxima do dossel (CCx)	%	81
Taxa de declínio do dossel (CDC)	% graus-dia^{-1}	0.788
Taxa de expansão do dossel (CGC)	% graus-dia^{-1}	12.9
Profundidade efetiva máxima das raízes	m	0.35
Evapotranspiração		
Coeficiente de transpiração máximo de cultivo (KcTr,x)	--	1.16
Redução de KcTr,x com a senescência	% dia^{-1}	0.300
Produção		
HI de referência	%	53
Produtividade da água normalizada (WP*)	g m^{-2}	19

Tabela 2. Coeficientes calibrados da cultivar IAPAR 57 de feijoeiro para o modelo AquaCrop. **Continuação**

WP* ajustada para a formação da produção	% da WP*	95
Resposta ao estresse		
Expansão do dossel (em resposta ao estresse hídrico)		Sensível ao estresse hídrico
p superior	--	0.12
p inferior	--	0.42
Fechamento estomático (em resposta ao estresse hídrico)	--	Sensível ao estresse hídrico
p superior	--	0.25
Senescência precoce do dossel (em resposta ao estresse hídrico)	--	Moderadamente tolerante ao estresse hídrico
Estresse de aeração	--	Moderadamente tolerante ao alagamento
Temperatura base	°C	12
Temperatura limite superior	°C	30
Transpiração da cultura afetada pelo estresse por frio (Ks_{Tr})	°C dia^{-1}	17
Polinização da cultura afetada pelo estresse por frio ($Ks_{pol,c}$)	°C	4 a 9
Incremento geral dos efeitos do estresse hídrico sobre HI	%	10

As durações das fases fenológicas simuladas pelo modelo AquaCrop, utilizando os coeficientes calibrados para a cultivar IAPAR 59 com os dados obtidos sob irrigação plena (T1), apresentaram diferenças na faixa ±10% em todos as épocas de semeadura (Tabela 3).

O desempenho do modelo para simulação da fração de cobertura (CC) ao longo do ciclo variou de moderadamente bom a muito bom (R^2= 0.95 – 1.00; RMSE = 6.6% – 12.9%) (Figura 4). No tratamento T1 – E3, o modelo sobrestimou CC em cerca de 10% no período de 60 a 75 DAS. Para as E1 e E2 o modelo subestimou ligeiramente CC, entretanto, seguiu a tendência de crescimento apresentada pela cultura do feijão em campo.

O modelo apresentou desempenho muito bom para simulação de biomassa ao longo dos ciclos de E2 e E3 ($R^2 \geq 0.99$; RMSE ≤ 300kg ha^{-1}) e desempenho moderado a bom em E1 (R^2 = 0.93; RMSE = 900 kg ha^{-1}) ((Figura 4), com ligeiras subestimativas entre 30 e 60 DAS e superestimativas entre 60 a 90 DAS.

Tabela 3. Durações das fases vegetativa (V0 – R6), reprodutiva (R6 - R9) e do ciclo fenológico (V0 - R9) do feijoeiro (Cultivar IAPAR 57) observadas e simuladas pelo modelo AquaCrop para o tratamento com irrigação plena (T1) nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). **Fase de Calibração.**

Fase	Fenologia (DAS)								
	E1			E2			E3		
	Obs.	Sim.	%	Obs.	Sim.	%	Obs.	Sim.	%
V0 – R6	44	45	2	55	60	9	54	49	-9
R6 - R9	49	47	-4	46	45	-2	35	37	6
V0 - R9	93	100	7	101	109	8	89	86	-3

DAS - dias após a semeadura, Obs.: Observada e Sim.: Simulada.

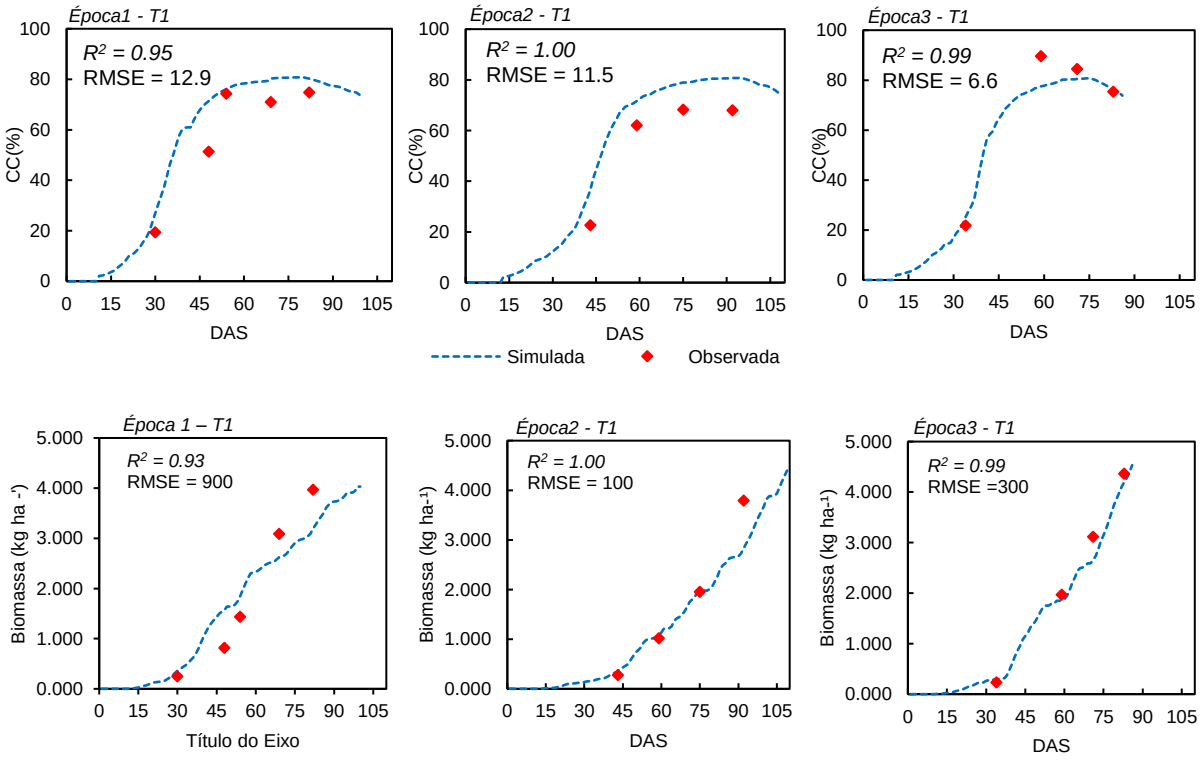


Figura 4. Cobertura do dossel e biomassa simulados pelo modelo AquaCrop e observadas para a cultivar IAPAR 57 sob o tratamento com irrigação plena (T1) nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). **Fase de Calibração.**

A produtividade (Y), índice de colheita (HI) e Biomassa final (Bf) simulados para E1 e E3 sob T1 apresentaram diferenças entre -10 e 9% em relação aos dados observados (Tabela 4). Para E2, o desempenho do modelo foi considerado entre bom e regular, uma vez que os desvios de Y e B estimados foram superiores aos observadas em campo em 16% e 25%, respectivamente. O desempenho do modelo em simular HI foi bom, com desvios entre -1 e 9% em relação aos valores observados.

Tabela 4. Produtividade (Y, kg ha^{-1}), índice de colheita (HI) e biomassa final (Bf, kg ha^{-1}) simuladas pelo modelo AquaCrop e observadas para a cultivar IAPAR 57 sob o tratamento com irrigação plena (T1) nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). **Fase de Calibração**

Variável	E1			E2			E3		
	Obs.	Sim.	%	Obs.	Sim.	%	Obs.	Sim.	%
B	4.424	4.419	-0,1	3.790	4.397	16	4.973	4.533	-9
HI	50	55	9	50	54	8	53	52	-1
Y	2.205	2.412	9	1.887	2.358	25	2.615	2.353	-10

Obs.: Observada e Sim.: Simulada.

4.2 Teste do Modelo

O teste do modelo AquaCrop, utilizando os coeficientes calibrados para a cultivar IAPAR 57, comparadas com dados independentes de campo, isto é, dados que não foram usados na calibração, correspondentes aos resultados observados nos tratamentos não irrigado (T0) e com irrigação deficitária (T2 -Irrigação a potencial matricial igual a -70 kPa), nas três épocas de semeadura (E1, E2 e E3), são apresentados a seguir.

O modelo AquaCrop teve bom desempenho na simulação da fenologia para ambos os regimes hídricos e épocas de semeadura (Tabela 5). As diferenças entre as durações das fases fenológicas se mantiveram na faixa de ±17% nas três épocas de semeadura. Nas Épocas 1 e 2, esses desvios foram devidos ao retardamento das datas de ocorrência dos estádios fenológicos simulados pelo AquaCrop, comparado ao que ocorreu em campo. Na Época 3, o modelo simulou precocemente a fase reprodutiva (9 a 10 dias antes do valor observado), porém foi boa a acurácia para o momento de maturação fisiológica, com desvio de -1 a -2%.

Tabela 5. Durações em DAS de fases vegetativa (V0 – R6), reprodutiva (R6 - R9) e ciclo fenológico (V0 - R9) do feijoeiro (Cultivar IAPAR 57), observadas em campo e simuladas pelo modelo AquaCrop para os tratamentos não irrigado (T0) e irrigação deficitária (T2), nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). **Fase de Teste.**

Estratégia de Irrigação	Fase	Épocas								
		E1			E2			E3		
		Obs.	Sim.	%	Obs.	Sim.	%	Obs.	Sim.	%
T0	V0 – R6	46	45	-2	53	60	13	57	48	-16
	R6 - R9	40	47	17	44	46	4	30	34	13
	V0 - R9	86	100	16	97	109	12	87	86	-1
T2	V0 – R6	44	48	9	55	62	13	58	48	-17
	R6 - R9	50	52	4	42	47	12	33	34	3
	V0 - R9	94	106	13	97	113	16	91	89	-2

DAS - dias após a semeadura, Obs.: Observada e Sim.: Simulada.

Na simulação de CC (Figura 5) para as épocas E1 e E3, o modelo teve desempenho muito bom (R^2 > 0.99; RMSE < 6%) sob o tratamento T2 e moderadamente bom (R^2 > 0.84; RMSE < 14.7%) sob T0. Para E2, o desempenho foi regular (R^2 > 0,94; RMSE = 31,5%) para T2 e muito ruim (R^2 > 0.19; RMSE = 49%) para T0, devido à superestimativa do modelo em simular cobertura do dossel ao longo de todo o ciclo para ambos os tratamentos.

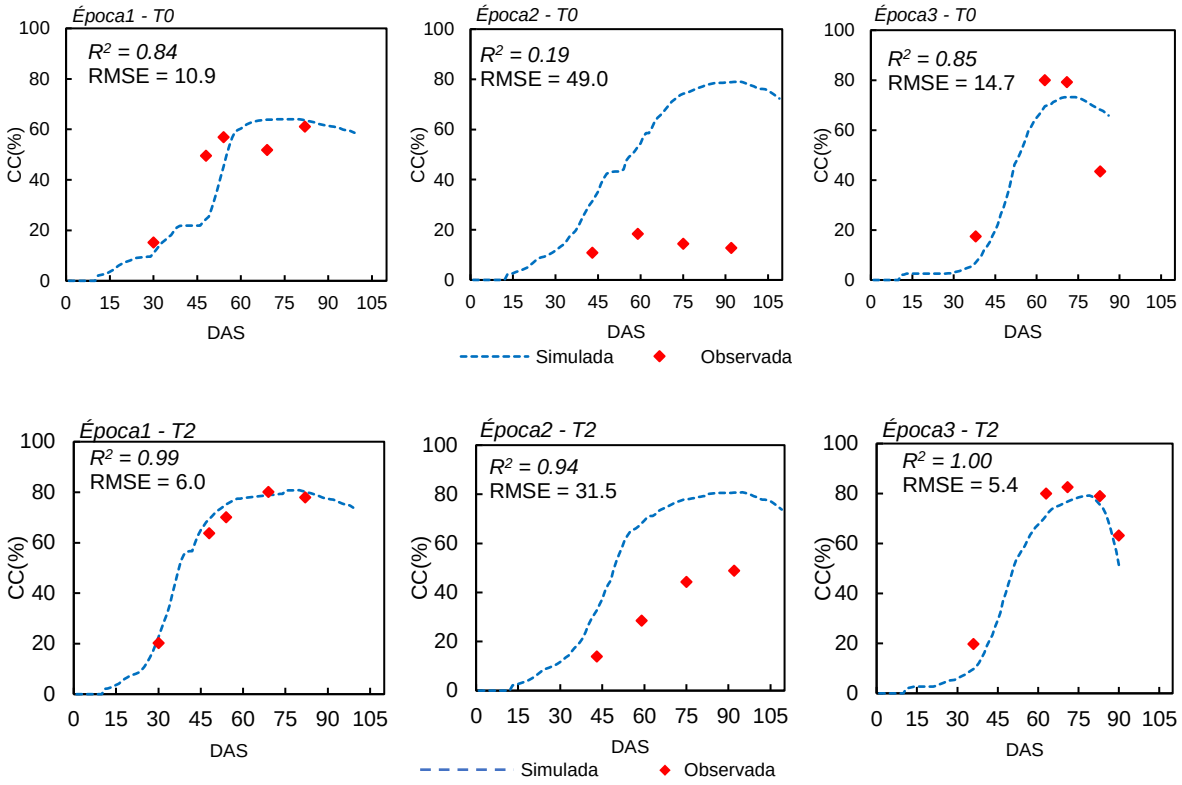


Figura 5. Cobertura do dossel observada e simulada para a cultivar IAPAR 57 pelo modelo AquaCrop para os tratamentos não irrigado (T0) e irrigação deficitária (T2), nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). Fase de Teste.

Da mesma forma que para CC, nas simulações de B, o modelo AquaCrop apresentou desempenho moderadamente bom ($R^2 \geq 0.95$; RMSE ≤ 600 kg ha^{-1}) sob o tratamento T2 e nas épocas E1 e E3 sob T0. Na Época 2 sob T0 o desempenho do modelo foi muito ruim ($R^2 \geq 0.99$; RMSE ≤ 1.100 kg ha^{-1}) com superestimação das simulações sobre os valores observados. (Figura 6).

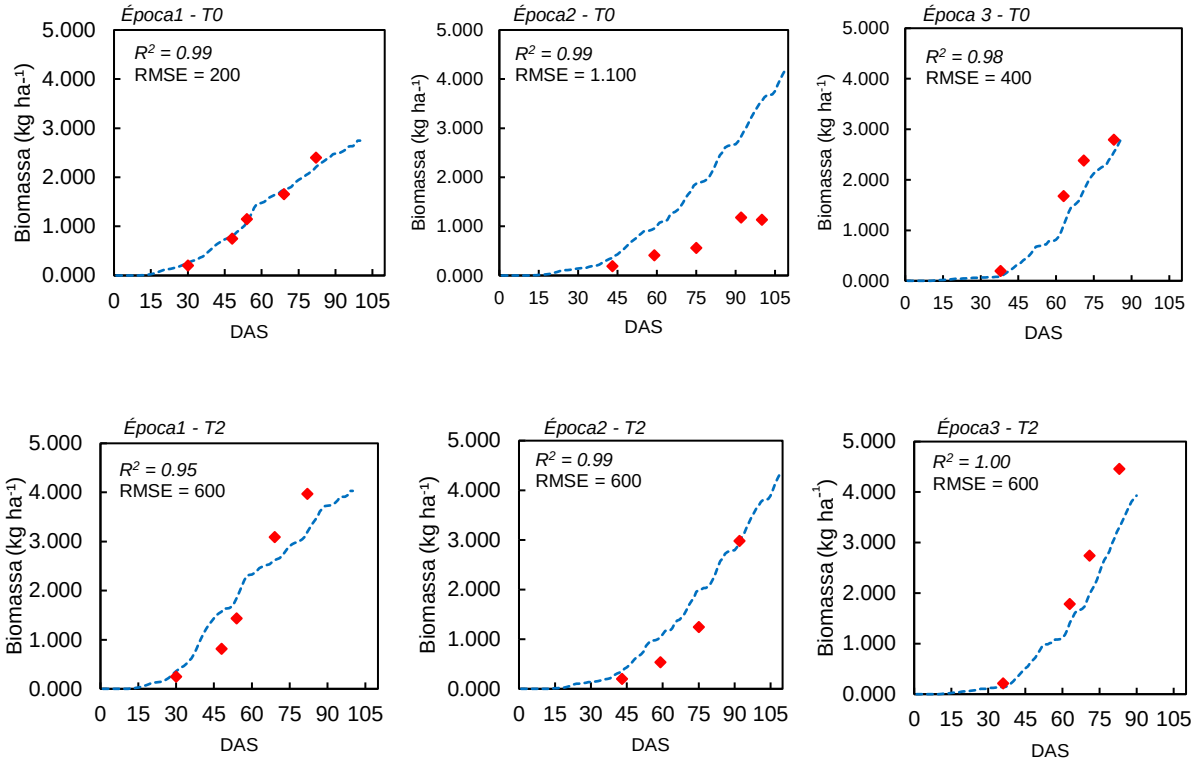


Figura 6. Biomassa observada e simulada para a cultivar IAPAR 57 pelo modelo AquaCrop para os tratamentos não irrigado (T0) e irrigação deficitária (T2), nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). Fase de Teste.

Bf e Y para a Época 3 foram estimadas com grande precisão e acurácia pelo modelo, com desvio entre os valores observados e simulados entre 2 e 3% sob T0, e -15 e -21 sob T2, respectivamente (Tabela 6). Para a Época 1 houve superestimativa do modelo em 26% para B e 25% para Y, e, para a Época2, de 271 e 281%, respectivamente. O índice de colheita (HI) apresentou baixas diferenças entre valores simulados e observados para T0 (- 1% a 3 %) e ligeiramente maiores para T2 (-15 a 11%).

Tabela 6. Produtividade (Y, kg ha^{-1}), índice de colheita (HI) e biomassa final (Bf), kg ha^{-1}) do feijoeiro (Cultivar IAPAR 57) observadas e simuladas pelo modelo AquaCrop para o tratamento sem irrigação (T0) nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). **Fase de Teste**.

Estratégia de Irrigação	Fase	Épocas								
		E1			E2			E3		
		Obs.	Sim.	%	Obs.	Sim.	%	Obs.	Sim.	%
T0	Bf	2.171	2.746	26	1.130	4.197	271	2.734	2.824	3
	HI	45	44	-1	48	50	3	41	41	-1
	Y	967	1.216	25	547	2.086	281	1.123	1.148	2
T2	Bf	4.437	4.042	-9	2.447	4.758	94	4.559	3.840	-15
	HI	47	52	11	58	49	-15	56	53	-6
	Y	2.079	2.102	1	1.419	2.338	65	2.574	2.029	-21

Obs - Observada e Sim - Simulada.

4.3 Armazenamento de água no Solo

O modelo AquaCrop seguiu a tendência observada em campo na simulação do armazenamento de água no solo na maioria dos tratamentos (Figura 7). Em E1 e E3 a simulação foi mais precisa, com o modelo estimando melhor a extração de água pela cultura e sua variação ao longo do ciclo. O tratamento T1 apresentou melhor ajuste entre os dados observados e os dados estimados pelo modelo, quando comparados ao tratamento T2. Verifica-se que no início dos ciclos há uma tendência de sobrestimar o conteúdo de água no solo por parte do modelo, o que vai diminuindo com o passar dos dias tendo momentos excelente acurácia em todas as épocas.

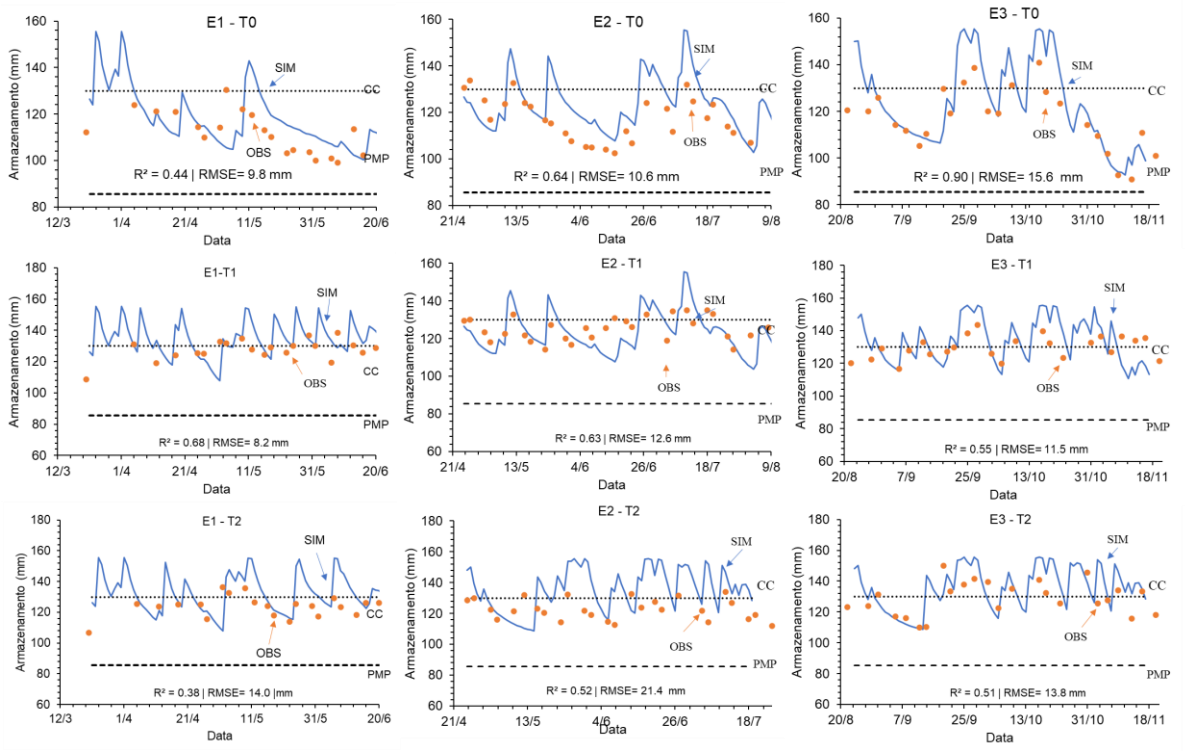


Figura 7. Armazenamento de água no solo na camada 0 - 35 cm observado (OBS) e simulado (SIM) pelo modelo AquaCrop para a cultivar de feijoeiro IAPAR 57, em função de estratégias de irrigação e épocas de semeadura. NI – Não irrigado; T2 - irrigação a ψ = - 25 kPa, T3 - irrigação a ψ = - 70 kPa, E1 -21/03, E2 - 24/04, E3 - 23/08, PMP- Ponto de Murcha Permanente, CC - Capacidade de Campo

.

A Época 3 apresentou os índices estatísticos $R^2 \geq 0.50 – 0.90$; RMSE = 11.5 – 15.6 mm (Figura 7). Os tratamentos E1 – T1 e E3 – T1 apresentaram o menor erro comparando-os com os dados observados (RMSE = 6.4 e 8.8 mm; respectivamente).

4.4. Aplicação do Modelo

Os resultados do modelo AquaCrop para as simulações de longo período (1980-2016) (Figura 8) revelaram que, no cultivo não irrigado semeado em março, a produtividade média (1.296 kg ha^{-1}) foi superior em 34% à média observada na Época 1 do experimento (967 kg ha^{-1}) (Tabela 6), para a mesma época e regime hídrico. Para o cultivo não irrigado semeado em setembro, a média simulada (1.082 kg ha^{-1})

foi 6% inferior à produtividade deste tratamento no experimento (1.148 kg ha^{-1}).

Em ambos os períodos de cultivo não irrigado, a amplitude da produtividade simulada foi de 0 a 2.544 kg ha^{-1}, refletindo o alto risco dessa estratégia de manejo devido, principalmente, à elevada variabilidade interanual da precipitação (Figura 9). Essa condição resulta em produtividades abaixo de 250 e 500 kg ha^{-1} em 25% dos cultivos semeados em março e setembro, respectivamente (Figura 8).

Nas estratégias irrigadas, o modelo simulou menores amplitudes de variação de produtividade ao longo dos anos (Figura 8), em decorrência do suprimento hídrico aplicado em cada estratégia de irrigação. Dentre as opções de manejo de irrigação para a semeadura em março, destacou-se a estratégia de se aplicar irrigação após depleção de 120% da água facilmente disponível (120%RAW), a qual apresentou a maior produtividade média (2.769 kg ha^{-1}), com aplicação de lâmina intermediária (150 mm), resultando na melhor produtividade da água (1.445 kg m^{-3}). Para o cultivo semeado em setembro, a melhor estratégia foi a 170%RAW, com produtividade simulada de 2.853 kg ha^{-1}, lâmina aplicada de 133 mm e produtividade da água de 1.050 kg m^{-3}.

As diferenças de produtividade entre o cultivo não irrigado e as obtidas com as estratégias 120%RAW e 170%RAW demonstram as respostas de irrigação ao longo dos anos (Figura 9). Em anos com alta precipitação, a produtividade do cultivo não irrigado se aproxima da produtividade da cultura irrigada, porém, sem irrigação, a produtividade é baixa na maioria dos anos. Salienta-se ainda que a irrigação não elimina por completo a variabilidade interanual da produtividade, pois o modelo simula o efeito de temperatura ao longo dos anos, calculando menores produtividades para ciclos de cultivo com temperaturas sub-ótimas.

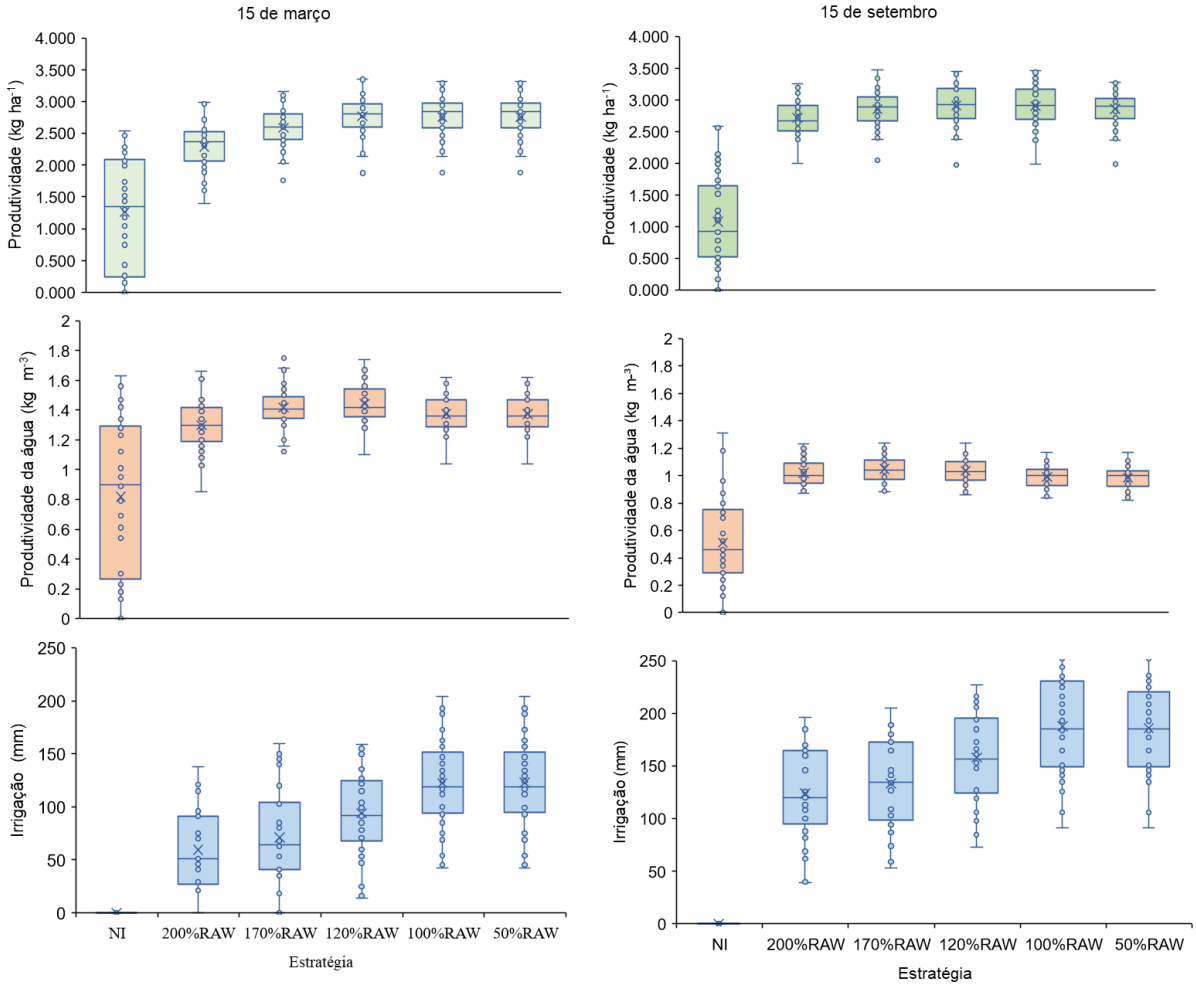


Figura 8. Produtividade de grãos, produtividade da água e lâmina de irrigação simuladas pelo modelo AquaCrop para feijoeiro (Cultivar IAPAR 57), em função de estratégias de irrigação e épocas de semeadura, durante o período 1980 – 2016. NI – Não irrigado, 200%RAW, 170%RAW, 120%RAW, 100%RAW e 50%RAW são depleções de 200,170, 120, 100 e 50% da água facilmente disponível na camada 0-35 cm.

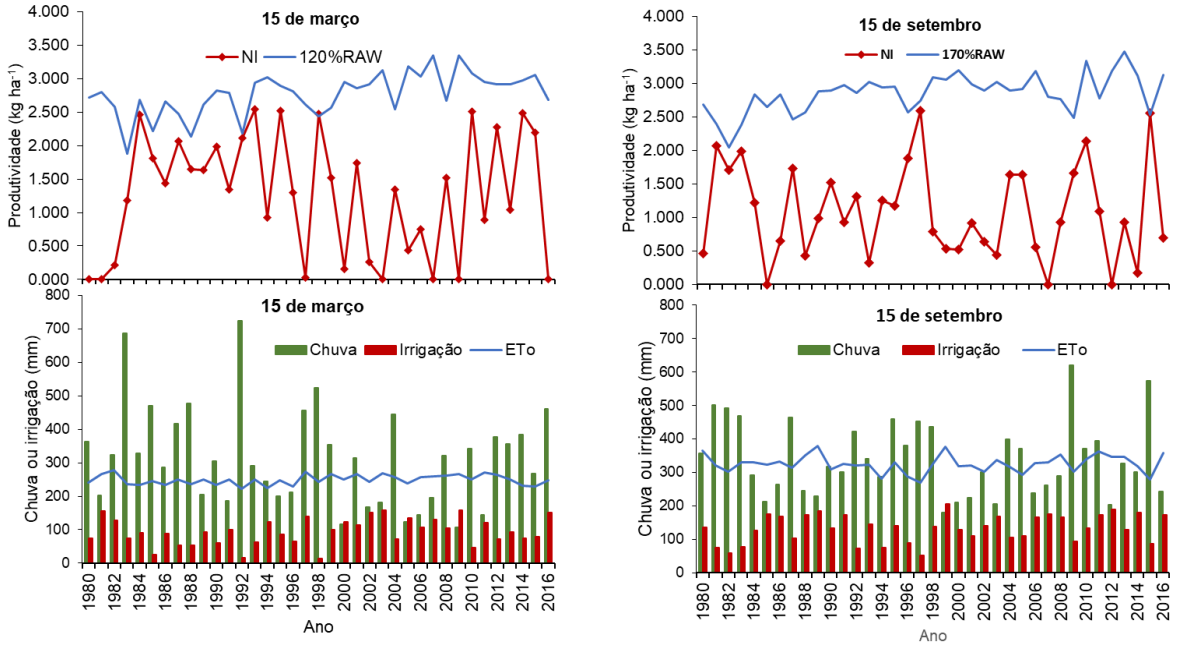


Figura 9. Produtividade, precipitação ETo e irrigação simuladas pelo modelo AquaCrop para feijoeiro (Cultivar IAPAR 57), em função de estratégias de irrigação e épocas de semeadura, durante o período 1980 – 2016. NI – Não irrigado; 170%RAW, 120%RAW água facilmente disponível na camada 0- 35 cm.

5. DISCUSSÃO

A boa precisão e acurácia nas simulações sob o tratamento com irrigação plena (T1), nas três épocas de semeadura, indica que o modelo AquaCrop tem boa capacidade para simular a fenologia (Tabela 3), cobertura do dossel e biomassa (Figura 4), e produtividade (Tabela 6), em condições de ausência de déficit hídrico. Este bom desempenho foi semelhante aos resultados encontrados em simulações de outros experimentos de feijoeiro sem estresse hídrico utilizando o modelo AquaCrop, tais como os estudos conduzidos por Silva (2019), no Nordeste brasileiro, Oliveira et al. (2021), em Cuba, e Costa et al. (2021), em Minas Gerais.

A calibração correta dos coeficientes que definem a fenologia e a evolução de CC ao longo do ciclo, como apresentada na Tabela 2, é fundamental para o bom desempenho do modelo AquaCrop para simular B e Y (Steduto et al., 2012; Kim e Kaluarachchi, 2015). Portanto, a simulação acurada das datas de ocorrência dos

estádios fenológicos no presente estudo possibilitou estabelecer os períodos críticos aos estresses ambientais, enquanto os coeficientes relacionados com a expansão, envelhecimento e senescência do dossel possibilitaram calcular, com boa exatidão, a influência de CC na transpiração da cultura e, indiretamente, no acúmulo de biomassa e sua partição em vagens.

A cobertura máxima do dossel (CCx), calibrada em 81% (Tabela 2), corresponde à condição de cobertura parcial do solo pelo dossel que limita o potencial produtivo da cultivar IAPAR 57. O valor de CCx foi medido em campo no tratamento sob irrigação plena (T1), na época de semeadura com menor limitação de temperatura e radiação solar (E3). O menor crescimento do dossel pode estar associado às características de crescimento da cultivar IAPAR 57 e à densidade de semeadura adotada no presente experimento. CCx de cerca de 80% também foi obtido por Chibarabada; Modi; Mabhaudhi (2018), utilizando o modelo AquaCrop, em avaliações de CC sob diferentes condições hídricas para feijoeiro na África do Sul.

Na fase de teste, o bom desempenho do modelo AquaCrop para simular a fenologia da cultivar IAPAR 57 (Tabela 5), sob os tratamentos T0 e T2, nas três épocas de semeadura, comprova a boa adequação do método utilizado no modelo AquaCrop para contabilizar do tempo térmico pelo acúmulo de graus-dia, adotando-se o valor calibrado de temperatura-base de 12ºC (Tabela 2).

O desempenho do modelo AquaCrop foi também considerado bom em simular CC, B, Bf e Y sob os tratamentos T0 e T2 nas épocas E1 e E3, porém este desempenho não se repetiu em E2 (Figura 5, Tabela 6), quando ocorreram as temperaturas mais baixas do ano, além de deficiência hídrica devido à menor precipitação e irrigação deficitária. Os níveis sub-ótimos de temperatura e de suprimento hídrico ocorridos em E2 causaram redução da taxa de expansão do dossel da cultura em campo a valores de CCx de cerca 20 e 50% nos tratamentos T0 e T2, respectivamente, contrastando com a superestimativa do modelo AquaCrop, que calculou CCx em 80% para ambos os tratamentos (Figura 5). Consequentemente, os desempenhos do modelo foram regular para T2 e ruim para T0. Estes resultados se contrapõem também ao bom desempenho do modelo sob o tratamento T1 - E2, sob

irrigação plena, evidenciando o fato de que o modelo não simulou corretamente a penalização do crescimento e produtividade da cultura no campo, à medida que a restrição hídrica aumentou de T1 para T2 e de T2 para T0.

A temperatura do ar é um fator determinante para o feijoeiro, sendo a faixa de 18 a 24°C considerada ótima para o ciclo de cultivo e 21°C para o período de floração. (Vieira et al., 2006; Hoffmann Junior et al., 2007). Em condições em que o ambiente é desfavorável ao desenvolvimento da cultura, a redução no tamanho dossel é uma forma de a planta diminuir as perdas por água na transpiração (Prasad et al., 2008).

Em E2, a temperatura mínima diária foi mais baixa do que em E1 e E3, com a maior parte do ciclo com valores inferiores a 17ºC (Figura 3). Este limiar de temperatura foi o valor calibrado para o coeficiente de transpiração afetada por estresse por frio no modelo AquaCrop (Ks_{Tr}, Tabela 3). Durante o processo de calibração, notou-se que este coeficiente foi muito pouco efetivo para reduzir o crescimento do dossel e acúmulo de biomassa (Figuras 5 e 6) na faixa de temperatura abaixo do valor calibrado para Ks_{Tr}, o que resultou nas superestimativas das simulações de Bf e Y em 65% e 94% sob T2, e de 271% e 281% sob T0.

Em duas ocasiões durante E2, ocorreram frentes frias que reduziram as temperaturas mínimas abaixo de 10ºC, quando a cultura estava em pré-florescimento e início de enchimento de vagens (Figura 3). Considerando estes eventos, a faixa crítica de temperatura calibrada para o coeficiente de polinização afetada por estresse por frio ($Ks_{pol,c}$) foi de 4 a 9ºC (Tabela 3). No campo, estes eventos causaram desfolha do dossel e, portanto, redução de CC (Figura 5), seguido da redução B (Figura 6) e Bf e Y (Tabela 6). Apesar da faixa compatível de temperatura com a condição meteorológica transcorrida durante a época 2 para definir $Ks_{pol,c}$, este coeficiente também não foi efetivo para que o modelo AquaCrop representasse a redução do crescimento do dossel conforme ocorrido no cultivo em campo e, em decorrência, superestimou a produção de biomassa e a produtividade da cultura.

Durante o processo de calibração dos coeficientes Ks_{Tr} e Ks_{pol}, realizado por tentativa e erro, observou-se baixa sensibilidade do crescimento da cultura a estes

coeficientes para a faixa de temperatura transcorrida durante o ciclo em E2. Este fato indica que falta ao modelo AquaCrop um método que seja eficiente para considerar o efeito de temperaturas críticas, que ocorrem não somente na fase de polinização, mas também em períodos críticos do ciclo, e que causam danos significativos à planta, tais como desfolha do dossel e abortamento de órgãos reprodutivos. Da mesma forma que no ajuste pelo estresse hídrico, este método deveria possibilitar a definição de limites em diferentes estágios na cultura, para representar os efeitos que uma temperatura acima ou abaixo do ideal, que podem causar danos em diferentes fases de crescimento na cultura. Com isso, em situações em que ocorrem estresse por térmico, o modelo conseguiria captar seus efeitos na fenologia e crescimento da planta em simulação

Ainda em E2, a precipitação foi também menor do que as ocorridas em E1 e E3 (Figura 3), o que reduziu o armazenamento de água no solo (Figura 7) e, consequentemente, acentuou o estresse hídrico no início da fase reprodutiva nos tratamentos T0 e T2 (Figura 7). No campo, sob o tratamento T1, as irrigações mitigaram a desfolha do dossel causada por estresse por frio, promovendo o crescimento foliar da planta, o que também ocorreu em menor grau no tratamento T2. Sob T0, a deficiência hídrica foi extremamente prejudicial, reduzindo drasticamente CC, B, Bf e Y em campo (Figura 5, Figura 6 e Tabela 6). Esses efeitos também não foram simulados adequadamente pelo modelo AquaCrop, sendo as superestimativas provavelmente resultantes da deficiência do modelo em considerar adequadamente o feito de estresse por frio, que não penalizou o crescimento foliar, resultando em estimativas elevadas de biomassa e produtividade.

Vários autores relatam desvios entre as simulações pelo modelo AquaCrop e dados observados em campo sob condições de escassez de água, semelhantes aos encontrados no presente estudo. Assim Kanda, Senzanje, Mabhaudhi (2021) reportaram superestimativa da biomassa de feijão-caupi na África do Sul de 33% sob estresse hídrico; Oteki (2015), avaliando o desempenho do modelo AquaCrop em diferentes níveis de irrigação do feijoeiro no Quênia, verificou que, em condições de menor quantidade de água disponível a planta, o modelo AquaCrop superestimou em 12% a cobertura do dossel e 15% a biomassa acumulada. Também Chibarabada;

Modi; Mabhaudhi (2018), encontraram superestimações de 53% na biomassa acumulada e de 23% na cobertura do dossel em condição de estresse hídrico. Nunes et al. (2021), avaliaram o desempenho do modelo AquaCrop com feijão caupi no norte do Brasil em função de níveis de irrigação e datas de semeadura e obtiveram desempenho satisfatório para a cobertura do dossel, ressaltando a importância de a semeadura ser feita na época correta e atribuído ao atraso na semeadura o prejuízo na produção final.

Espadafor et al. (2017) atribuiu às inacurácias do modelo AquaCrop em simular a produtividade e a biomassa sob restrição hídrica aos possíveis erros na determinação da senescência do dossel, tais como a diferença do momento exato em que o estresse hídrico passa a afetar o desenvolvimento da planta. Imprecisões na estimativa de produtividade podem ser também devidas ao índice de colheita, que é ajustado em razão da disponibilidade hídrica e da temperatura que influencia na polinização da cultura, afetando número de flores e, por conseguinte, número de frutos (Steduto et al., 2009). Também Ran et al. (2018) atribuem aos erros de estimativa ao método como biomassa é calculada pelo modelo (Equação 3), que utiliza um valor fixo de produtividade da água (WP) e não considera sua variação no decorrer do ciclo. Diferentemente do que acontece no ajuste pelo estresse hídrico, em que é possível definir limites em diferentes estágios na cultura, os efeitos que uma temperatura acima ou abaixo do ideal podem causar em diferentes fases de crescimento na cultura ficam limitados no aplicativo em uma única abordagem. Com isso, em situações em que ocorrem estresse por frio, o modelo não consegue captar a dinâmica o que ocorre na planta em razão diversos processos fisiológicos.

O bom desempenho do modelo AquaCrop nas simulações de armazenamento de água no solo durante E1 e E2 (Figura 7) refletem a boa estimativa da evolução de CC ao longo desses ciclos de cultivo, que foram melhores que na E2. Destaca-se que o modelo AquaCrop utiliza o mesmo método proposto por Allen et al. (1998) para calcular a demanda de ETo e balanço de água no solo. Os desvios encontrados entre simulações e dados observados neste estudo, também são relatados por outros autores ao fazer a comparação entre simulado e observado como por Costa et al. (2021), em simulações com a cultura de feijão em Minas Gerais utilizando o modelo

AquaCrop. Coorevits (2010), que estudou a parametrização do AquaCrop para a cultura de feijão nas condições climáticas da Bélgica relata também que em condições de estresse, o modelo gera resultados menos precisos, que pode estar relacionado ao seu fator de estresse (Ks).

A adoção do mesmo nível de profundidade máxima de raiz em todos os tratamentos pode ter contribuído para os erros de estimativa de armazenamento de água no solo. Tal premissa não leva em conta que as raízes se aprofundam quando a planta é submetida ao estresse hídrico e, como consequência, a distribuição de água no solo torna-se diferente em função do suprimento hídrico (Conceição, 2021). Zeleke et al. (2011) e Mkhabela e Bullock (2012) relatam estimativas satisfatórias do modelo AquaCrop dos teores de água no solo, mas que, assim como no presente estudo, há uma disposição em superestimar os resultados, especialmente nos tratamentos submetidos ao déficit hídrico. Segundo estes autores, a superestimação pode estar relacionada ao fato do modelo não permitir que o armazenamento de água fique abaixo do PWP ou não penalização suficientemente a perda de água no solo.

A análise de longo período com o modelo AquaCrop calibrado com os coeficientes da cultivar IAPAR 57 (Tabela 2) possibilitou quantificar o risco de decréscimo de produtividade devido ao clima, bem como estimar o benefício da irrigação para aumentar e estabilizar a produtividade do feijoeiro ao longo dos anos e indicar as melhores estratégias de manejo de irrigação. Estes resultados podem ser utilizados em análises econômico-financeiras em outros estudos para subsidiar tomadas de decisão sobre a adoção da prática de irrigação em propriedades agrícolas.

Assim, os resultados das simulações apresentados nas Figuras 8 e 9 demonstram o alto risco do cultivo do feijão não irrigado na região de Londrina-PR, tanto para o outono, quanto para a primavera, o que inviabiliza sua exploração na maioria dos anos. Em contraste, os incrementos de produtividade média da cultura irrigada sobre a não irrigada de 113% e 163%, para a semeadura em março e setembro, respectivamente, indicam a excelente viabilidade agronômica do cultivo de feijão irrigado. Visando à viabilidade ambiental, o modelo AquaCrop possibilitou testar

vários critérios de depleção de água no solo, ao longo da série histórica, para definir o momento e a quantidade de água a ser aplicada, para definir as melhores estratégias de manejo de irrigação (120%RAW e 170%RAW), que resultam em maiores produtividades médias (>2.769 kg ha^{-1}) e maiores produtividades da água (1.050 a 1.445 kg m^{-3}), com aplicação de lâminas intermediárias (<150 mm). Tendo em vista o elevado valor desta comodity, a viabilidade econômica da exploração de cultivos de feijão irrigados será positiva na maioria das áreas com boa aptidão agrícola e com recursos hídricos disponíveis para irrigação.

As simulações de longo período possibilitaram ainda analisar a representatividade dos dados do experimento conduzido nesta pesquisa, em relação aos resultados estimados pelo modelo AquaCrop durante o período 1980- 2016. Diferentemente dos dados de campo, a simulação do cultivo de feijão semeado em março apresenta produtividade média mais elevada que a obtida no experimento na mesma época de semeadura (E1). Este resultado pode estar relacionado ao ano de 1995 ser atípico, com temperaturas abaixo da normal para o período, reduzindo CC, B e produtividade, ao contrário do que ocorreu nas simulações na maior parte dos anos na série histórica (Figura 9).

6. CONCLUSÕES

A calibração dos coeficientes da cultivar IAPAR 57 foi bem-sucedida possibilitando bom desempenho do modelo para simular a fenologia, crescimento do dossel e biomassa, e produtividade nos três regimes hídricos, durante os períodos de cultivo com temperaturas adequadas (E1 e E3).

No período em que predomina temperaturas abaixo do ideal para a cultura (≤17ºC), como em E2, associadas com irrigação deficitária ou sem irrigação, o modelo não penaliza adequadamente os estresses térmico e hídrico combinados, mesmo ajustando os coeficientes de estresse para estas condições, resultando em superestimativa do crescimento e produtividade da cultura. Portanto, falta ao modelo AquaCrop estender o efeito de estresse por frio, não apenas para o período de

polinização, mas também para os outros períodos críticos, a fim de representar a desfolha do dossel ou mesmo a morte da planta.

Nas simulações de longo período, o modelo foi capaz de calcular a variabilidade da produtividade devido às incertezas na precipitação ao longo dos anos e indicar estratégias de irrigação para Londrina, PR (irrigações após depleções de 120 e 170% da água facilmente disponível, para semeaduras em março e setembro, respectivamente) visando atingir altas produtividades da cultura (>2.769 kg ha^{-1}) e produtividades de água (1.050 a 1.445 kg m^{-3}), com a aplicação de lâminas intermediárias (<150 mm).

Embora haja necessidade de melhoria do cálculo de penalização por estresse térmico, o modelo AquaCrop tem boa capacidade para ser utilizado em estudos e aplicações em que regimes hídricos são limitantes à produção da cultura.

7. REFERÊNCIAS

Adams, J. E.; ARKIN, G. F.; RITCHIE, J. T. Influence of row spacing and straw mulch on first stage drying. **Soil Sci. Soc**. Am. J. 40, 436-442, 1976.

Allen, R. G.; pereira, L. S.; raes, D.; smith, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelinesfor computing crop water requirements. Rome:FAO**, 1998. 300p.(Irrigation and Drainage Paper,56).

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014

Andrade, M. J. B.; Oliveira, D. P.; Figueiredo, M. A.; Martins, F. A. D. Exigências edafoclimáticas. In: Carneiro, J. E.; Paula Júnior, T. J.; Borém, **A. Feijão: do plantio a colheita**. 1 ed. UFV (Viçosa): UFV, 2015. Capítulo 4, p. 67-95.

Bertoldo, J. G., Pelisser, A., Silva, R. P., Favreto, R., Radin, B. Sensibilidade de genótipos de feijão ao estresse hídrico. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 25, n. 3, p. 36-50, 2019.

Brouwer, R.; De Wit, C. T. A simulation model of plant growth with special attention to root growth and its consequences. **IBS**, 1968.

Chibarabada, T. P.; Modi, A. T.; Mabhaudhi, T. Calibration and testing of AquaCrop for

groundnut (*Arachis hypogaea*) and dry bean (*Phaseolus vulgaris*). **Water use and nutritional water productivity of selected major and underutilised grain legumes**, p. 138, 2018.

Chibarabada, T. P.; Modi, A. T.; Mabhaudhi, T. Calibration and evaluation of aquacrop for groundnut (*Arachis hypogaea*) under water deficit conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 281, p. 107850, 2020.

Coêlho, J. D. Produção e Grãos – Feijão, Milho e Soja. 2018.

Coêlho, J. D. Feijão: Produção e mercados. 2021.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento, 2021. *Relatório da safra brasileira de feijão*, 2021.

Conceição, C. G. D. **Estimativa da produção da cultura do milho irrigado através de simulação com o modelo AquaCrop e determinação da lâmina ótima econômica**. 2021. Doctoral dissertation. Universidade Federal de Santa Maria.

Costa, M. S., Mantovani, E. C., de Jesus, F. L. F., Sanches, A. C., da Silva, J. L. B., de Oliveira Santos, J. Uso do software AquaCrop para simular a resposta do feijão à diferentes regimes de irrigação. **IRRIGA**, v. 1, n. 3, p. 557-572, 2021.

Coorevits, L. **Calibration and validation of green beans for the AquaCrop model**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) –Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

De Wit, C.T. Photosynthesis of leaf canopies. Pudoc, Wageningen, **Agricultural Research Reports** no. 663. 64 p. 1965.

Doorenbos, J.; Kassam, A. H**. FAO irrigation and drainage paper No. 33 "Yield response to water"**. FAO–Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1979.

Espadafor, M. et al. Simulation of the responses of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to irrigation. **Transactions of the ASABE**, v. 60, n. 6, p. 1983-1994, 2017.

Fagundes, O. S., Oliveira, L. C. A., Yamashita, O. M., Silva, I. V., Carvalho, M. A. C., Rodrigues, D. V. The water crisis and its implications in Brazilian agribusiness: a bibliographic review**. Scientific Electronic Archives**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 42, 3 jan. 2020. Scientific Electronic Archives. .

FAO – **Food and Agriculture Organization of the United Nations - Information system on water and agriculture** – AQUASTAT. 2020. Disponível em: https://www.fao.org/aquastat/en/. Acesso em: 18 out 2021.

FAO, I., **The State of Food Security and Nutrition in the World 2021**, FAO.

Disponível em: https://www.fao.org/3/cb4474en/online/cb4474en.html . Acesso: 06 de Maio de 2022. CID: 20.500.12592/p0dx35.

Faria, R. T. Irrigação, in: O feijão no Paraná. Londrina, IAPAR, Circular n. 63, 1989.

Faria, R. T., Folegatti, M. V., Frizzone, J. A., & Saad, A. M. Determination of a long-term optimal irrigation strategy for dry beans in Parana State, Brazil. **Scientia Agricola,** v. 54, p. 155-164, 1997.

Fernández, F.; Gepts, P.; López, M. Etapas de desarrollo de la planta de frijol común. CIAT - Centro Internacional de Agricultura Tropical.Cali, Colombia.CIAT. 1983. 18p.

Freitas, Fábio de Oliveira. Evidências genético-arqueológicas sobre a origem do feijão comum no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** [online]. 2006, v. 41, n. 7 , pp. 1199-1203. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000700018>

Genuchten, M.Th. Van & Nielsen, D.R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsatured soils. **Ann. Geoph**., 3:615-628, 1985

Guimarães, C.M.; Stone, L. F.; Brunini, O. Adaptação do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 70-75, 2006.

Hadebe, S. T., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2017). Calibration and testing of AquaCrop for selected sorghum genotypes. **Water SA**, 43(2), 209-221.

Heinemann, A. B.; Stone, L. F.; Silva, S. C. Cultivos Temporários: Feijão. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Organizador). **Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília – DF: INMET, 2009. p. 183-203

Hoogenboom, G., & Porter, C. H. The DSSAT crop modeling ecosystem. In: p.173-216 [K.J. Boote, editor] **Advances in Crop Modeling for a Sustainable Agriculture.** Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, United Kingdom. 2019. http://dx.doi.org/10.19103/AS.2019.0061.10

Hoffmann Júnior, L., Ribeiro, N. D., Rosa, S. S. D., Jost, E., Poersch, N. L., Medeiros, S. L. P.. Resposta de cultivares de feijão à alta temperatura do ar no período reprodutivo. **Ciência Rural**, v. 37, p. 1543-1548, 2007.

Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agron. J**. 101, 448-459, 2009

Jamieson, P.D., Porter, J.R., Wilson, D.R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field Crops Research** 27, 337–350, 1991.

Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., ... & Wheeler, T. R. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural systems**, v. 155, p. 240-254, 2017.

Juliatti, F. C., Moraes, S. A., Silva, H. D., & Borges, M. H. Seleção de progênies de feijoeiro F4 resistentes ao Bean Golden Mosaic Virus. **Fitopatologia Brasileira**, v. 30, p. 279-285, 2005.

Kanda, E. K.; Senzanje, A.; Mabhaudhi, T. Calibration and validation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). **Physics and Chemistry of the Earth,** Parts A/B/C, v. 124, p. 102941, 2021

Katerji, N., Campi, P., & Mastrorilli, M. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. **Agric. Water Manag**. 130, 14–26. 2013

Kim, D.; Kaluarachchi, J. Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional Crop information. Agric. Water Manag. 149, 143–155, 2015.

Lima Filho, A. F., Coelho Filho, M. A., & Heinemann, A. B.. Determinação de épocas de semeadura do feijão caupi no recôncavo baiano através do modelo CROPGRO. Rev. Bras. **Eng. Agríc. Ambient**. 17 (12), 1294–1300. 2013

Loague, K.; Green R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. **Journal of contaminant hydrology**, v. 7, n. 1-2, p. 51-73, 1991.

Lopes, P. M. S. **Metodologias de calibração e validação do modelo de simulação climática CLIGEN de apoio à modelação de perda de solo**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de Évora.

Magalhães, I. D., Lyra, G. B., de Souza, J. L., Teodoro, I., da Rocha, A. E. Q., Cavalcante, C. A., ... & de Souza Ferraz, R. L. Performance of the AquaCrop model for bean ('Phaseolus vulgaris' L.) under irrigation condition. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 7, p. 1188-1196, 2019.

Masasi, B., Taghvaeian, S., Gowda, P. H., Marek, G., & Boman, R. Validation and application of AquaCrop for irrigated cotton in the Southern Great Plains of US. **Irrigation Science**, v. 38, n. 5, p. 593-607, 2020

Mabhaudhi, T., Modi, A. T., & Beletse, Y. G. Parameterisation and testing of AquaCrop for a South African bambara groundnut landrace. **Agron. J.** 106 243–251. 2014 https://doi.org/10.2134/ agronj2013.0355

Mkhabela, M. S.; Bullock, P. R. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. **Agricultural Water Management,** v. 110, p. 16-24, 2012.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1 - A Discussion of Principles. **Journal of Hydrology**, 10, 282-290. 1970

Nunes, H. G. G. C., Farias, V. D. S., Sousa, D. P., Costa, D. L. P., Pinto, J. V. N., Moura, V. B., ... & Souza, P. J. O. P. Parameterization of the AquaCrop model for cowpea and assessing the impact of sowing dates normally used on yield. **Agricultural Water Management**, v. 252, p. 106880, 2021.

Oliveira, E. C. D., Costa, J. M. N. D., Paula Júnior, T. J. D., Ferreira, W. P. M., Justino, F. B., & Neves, L. D. O. The performance of the CROPGRO model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield simulation. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 34, n. 3, p. 239-246, 2012.

Oliveira, N. T., Gómez Masjuan, Y., Boicet Fabré, T., & Brown Manrique, O. Evaluación del modelo AquaCrop en condiciones de riego óptimo y deficitario en Phaseolus vulgaris. **Centro Agrícola**, v. 48, n. 2, p. 37-46, 2021.

Oliveira, L. F. C., Oliveira, M. D. C., Wendland, A., Heinemann, A., Guimarães, C., Ferreira, E. D. B., & Silveira, P. M. (2018). **Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos. Santo Antônio de Goiás, GO**: Embrapa Arroz e Feijão.

Oteki, D. R. **Evaluation of Deficit Irrigation on Water Productivity and Yield Response of Beans Using AquaCrop in Eldoret, Kenya. 2015**. Doctoral dissertation. Moi University.

Parreira, A. G. B.; Marasca, I.; Solino, A. J. S.; Santos, G. O. Water balance climatological to the county of Rio Verde, Goiás. **Científica Multidisciplinary Journal**, 6(1), 16-33, 2019.

Paulilo M. T. S. **Capítulo 5**: Fotossíntese. In: Maria Terezinha Silveira Paulilo. **Fisiologia Vegetal**. Florianópolis: UFSC, 2015. p. 85.

Passos, M. L. V.; Zambrzycki, G. C.; Pereira, R. S. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Balsas-MA. **Scientia Agrária**, v. 18, n. 1, p. 83-89, 2017.

Prasad, P. V. V., Staggenborg, S. A., & Ristic, Z. **Impacts of Drought and/or Heat Stress on 689 Physiological, Developmental, Growth, and Yield Processes of Crop Plants, in: Ahuja, L.R., 690 Reddy, V.R., Saseendran, S.A., Yu, Q. (Eds**.), 2008. Advances in Agricultural Systems Modeling.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. Crop water productivity. **Calculation procedures and calibration guidance. AquaCrop version 3.0**. FAO. Land and Water Development Division, Rome, 2009.

RAES, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. **Reference Manual AquaCrop** (Version 4.0). 2012.

Raes, D. Steduto, P. Hsiao, C. T. Fereres, E. Reference Manual, Chapter 1 – AquaCrop, Version 6.0 – 6.1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 2018.

Ran, H., Kang, S., Li, F., Tong, L., Ding, R., Du, T., ... & Zhang, X. (2017) Performance of AquaCrop and SIMDualKc models in evapotranspiration partitioning on full and deficit irrigated maize for seed production under plastic film-mulch in an arid region of China. **Agricultural Systems** 151:20-32.

Ran, H., Kang, S., Li, F., Du, T., Tong, L., Li, S., ... & Zhang, X. Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 438-450, 2018.

Renato, N. dos S. et al. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 382-388, 2013.

Silva, A. C. S. L. **Consumo hídrico e calibração/validação do modelo AquaCrop para a cultura do feijão caupi cultivado no semiárido do nordeste do Brasil**. 2019. Tese de doutorado.

Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrigation Science**, v. 25, n. 3, p. 189-207, 2007.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., Fereres, E., 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agron. J.** 101, 426-437.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. **Crop yield response to water. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2012.

Tavares, T., Sousa, S., Salgados, F., Santos, G., Lopes, M., Fidelis, R. Adaptabilidade e estabilidade da produção de grão em feijão comum (*Phaseolus vulgaris*). **Revista de Ciências Agrárias,** v. 40, n. 2, p. 411-418, 2017.

Thornthwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review [online]** 38. Disponível: 10.2307/210739. Acesso: 28 de outubro. 2022.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R., 1955. The water balance. Publication in Climatology 8, **Laboratory of Climatology**, Centerton, N. J.

Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., ... & Moreno, P. M. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 351-360, 2014

Vale, N. M., Barili, L. D., Rozzeto, D. S., Coimbra, J. L. M., Guidolin, A. F., & Köop, M. M. Avaliação para tolerância ao estresse hídrico em feijão. **Biotemas**, v. 25, n. 3, p. 135-144, 2012.

Vieira, C.; Júnior, T. J. P.; Borém, A. Feijão. Cap.4 – Exigências Edafoclimáticas. 2 ed. Viçosa: UFV -Universidade Federal de Viçosa, 2006. 600p

Villalobos, F. J., Fereres, E., 1990. Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. **Agron. J.** 82, 1153-1159.

Wendland, A.; Lobo Júnior, M.; De Faria, J. C. Manual de identificação das principais doenças do feijoeiro-comum. 2018.

Zeleke, K. T.; Luchett, D.; Cowley, R.; Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 6, p. 1610-1618, 2011