



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CONSUMO HÍDRICO E CALIBRAÇÃO/VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP
PARA A CULTURA DO FEIJÃO CAUPI CULTIVADO NO SEMIÁRIDO DO
NORDESTE DO BRASIL**

ANA CAROLINE SOUSA LOPES DA SILVA

Mestranda

Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

Orientador

CAMPINA GRANDE – PB

Abril / 2019

**CONSUMO HÍDRICO E CALIBRAÇÃO/VALIDAÇÃO DO MODELO
AQUACROP PARA A CULTURA DO FEIJÃO CAUPI CULTIVADO NO
SEMIÁRIDO DO NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: Agrometeorologia e Micrometeorologia

Subárea: Necessidades hídricas da cultura

Orientador: Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva

CAMPINA GRANDE – PB

Abril / 2019

S586c

Silva, Ana Caroline Sousa Lopes da.

Consumo hídrico e calibração do modelo aquacrop para a cultura do feijão caupi cultivado no semiárido do Nordeste do Brasil / Ana Caroline Sousa Lopes da Silva. – Campina Grande, 2019.

60 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, Prof. Dr. Madson Tavares Silva".

Referências.

1. AquaCrop. 2. Calibração. 3. Feijão-caupi. 4. Evapotranspiração da Cultura. I. Silva, Vicente de Paulo Rodrigues da. II. Silva, Madson Tavares. III. Título.

CDU 633.35:551.573(043)

ANA CAROLINE SOUSA LOPES DA SILVA

CONSUMO HÍDRICO E CALIBRAÇÃO/VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP
PARA A CULTURA DO FEIJÃO CAUPI CULTIVADO NO SEMIÁRIDO DO
NORDESTE DO BRASIL

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/04/2019

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Dr. JOHERLAN CAMPOS DE FREITAS
Universidade Paulista

DEDICATÓRIA

Dedico primeiramente a Deus por ser o responsável pela minha vida e por todas as minhas conquistas alcançadas. A minha mãe Valdirene Sousa, meu pai Teodorico Lopes, meus irmãos Agostinho Neto, Amanda Sousa e Ana Beatriz Sousa, e a todos meus familiares e amigos que acreditam na minha capacidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por toda sabedoria, proteção e discernimento que Ele me proporcionou durante toda a minha vida, principalmente durante a realização desta dissertação.

Ao meu pai Teodorico Lopes e a minha mãe Valdirene Sousa, meus agradecimentos por todo o incentivo e apoio durante toda a minha vida. Muito obrigada por sempre estarem cuidando de mim em tudo e em qualquer projeto que eu me proponha a realizar. Sinto-me orgulhosa de ter pessoas tão especiais como vocês na minha vida. Amo vocês.

Aos meus irmãos Amanda Sousa, Ana Beatriz Lopes e Agostinho Neto, por compreenderem o meu isolamento em inúmeras dias durante esses dois anos. Obrigada pela paciência e por sempre estarem prontos a me apoiar em tudo nesta vida.

A minha amiga irmã Yvine Moraes que esteve sempre presente em todos os momentos e que foi uma das principais incentivadoras de minhas conquistas. Obrigada pelo apoio incondicional de toda a vida e pelas palavras de carinho.

Ao meu grande amigo Gabriel Barbosa que em vários momentos me ajudou a manter a sanidade e me arrancou sorrisos nos momentos mais improváveis. Obrigado por permanecer ao meu lado, pelo presente de cada dia, pelo seu sorriso e por saber me fazer feliz.

Agradeço aos meus amigos de faculdade, Alfredo Quaresma, Leticia Cardoso, Eduardo Margalho, José Felipe Menezes, Silvia Martins Oliveira e Wendy Matsunaga, pelo companheirismo e pela paciência. Vocês foram uma família para mim nestes anos e sempre serei muito grata por todos os momentos compartilhados.

Aos amigos de Curso por todas as experiencias trocadas e pelas alegrias vividas.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pela oportunidade concedida para a realização deste curso e desta dissertação.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por acreditar em minha capacidade e pela contribuição através da bolsa para que pudesse realizar todo o Mestrado em Meteorologia.

Ao meu orientador professor Dr. Vicente de Paulo, pela dedicação, competência e todo conhecimento compartilhado. Meus sinceros agradecimentos por toda a paciência que me dedicou e pelo apoio incondicional em todos os momentos. Obrigado por

acreditar em mim. Tenho certeza que não chegaria neste ponto sem o seu apoio. Você foi e está sendo muito mais que orientador: para mim será sempre mestre e amigo.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 16 |
| 2. OBJETIVOS | 18 |
| 2.1 Geral | 18 |
| 2.2 Específicos | 18 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 3.1. Cultura do feijão caupi | 19 |
| 3.2. Consumo hídrico das culturas | 20 |
| 3.3. Balanço hídrico do solo | 20 |
| 3.4. Evapotranspiração | 21 |
| 3.5. Coeficiente de cultivo | 22 |
| 3.6. Modelagem agrícola..... | 23 |
| 3.7. O modelo Aquacrop | 24 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 26 |
| 4.1. Localização da área de estudo | 26 |
| 4.2. Área experimental..... | 26 |
| 4.2.1 Delineamento experimental | 28 |
| 4.3 Controle de plantas invasoras, pragas e doenças | 29 |
| 4.4. Climatologia | 29 |
| 4.5. Tipo de cultura | 30 |
| 4.6. Coeficiente de cultivo | 30 |
| 4.7. Evapotranspiração da cultura..... | 30 |
| 4.8. Obtenção dos dados para o balanço hídrico..... | 31 |
| 4.9. Evapotranspiração de referência | 32 |
| 4.10. Descrição do Aquacrop..... | 32 |
| 4.10.1. Dados do modelo AquaCrop..... | 33 |
| 4.10.1.1. Clima..... | 33 |
| 4.10.1.2. Solo | 34 |
| 4.10.1.3. Cultura..... | 34 |
| 4.10.1.4. Manejo | 34 |
| 4.10.2. Calibração e validação do modelo | 35 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 37 |
| 5.1. Propriedades químicas do solo | 37 |
| 5.2. Características climáticas do local de estudo durante o período chuvoso | 37 |
| 5.3 Primeiro experimento | 38 |
| 5.3.1 Demanda hídrica do feijão caupi no período chuvoso | 39 |
| 5.3.2. Variáveis fenométricas do feijoeiro analisadas no período chuvoso..... | 39 |
| 5.3.3. Variáveis de produção para o período chuvoso | 41 |
| 5.3.4. Umidade média do solo | 41 |
| 5.4 Características climáticas do local no período seco | 42 |
| 5.5 Segundo experimento | 44 |
| 5.5.1 Demanda hídrica do feijão caupi no período seco | 44 |
| 5.5.2. Variáveis fenométricas do feijoeiro analisadas no período seco | 44 |
| 5.5.2.1. Variáveis de produção para o período seco | 46 |
| 5.5.3. Umidade média do solo | 46 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.6 | Determinação da evapotranspiração da cultura e do coeficiente de cultivo | 47 |
| 5.7 | Calibração do modelo. | 48 |
| 5.8 | Validação do Aquacrop | 51 |
| 6. | CONCLUSÕES..... | 55 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 56 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Localização geográfica da área de estudo, com destaque para a cidade de Campina Grande – PB. | 26 |
| Figura 2. Estação Agrometeorológica Experimental (EstAgro – DCA) da Universidade Federal de Campina Grande. | 27 |
| Figura 3. Canteiros após a instalação do sistema de irrigação, antes de ser determinado a vazão média (l/h) por gotejador na área de estudo | 28 |
| Figura 4. Canteiros durante o primeiro experimento, com seus respectivos tratamentos. | 28 |
| Figura 5. Dados meteorológicos: a) temperaturas do ar (°C) máxima e mínima, b) umidades relativas do ar (%) máxima e mínima, c) velocidade do vento (m/s), d) radiação solar (W/m ²), e) evapotranspiração de referência (mm/dia) e f) precipitação pluvial (mm/dia), ocorridos durante a execução do primeiro experimento do feijoeiro. | 38 |
| Figura 6. Médias dos valores das variáveis de crescimento: a) altura da planta (cm) e b) diâmetro do caule (mm) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do feijoeiro. | 40 |
| Figura 7. Médias dos valores das variáveis de crescimento: a) peso total (g); b) peso parte aérea seca (g); c) peso raiz (g) e d) peso raiz seca (g) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do feijoeiro. | 40 |
| Figura 8. Valores das variáveis de produção: a) peso total (kg) e b) peso do grão (kg) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do feijoeiro. | 41 |
| Figura 9. Umidade média do solo para os níveis: a) 10, b) 20, c) 30 e d) 40 cm de profundidade respectivamente, durante o experimento na área experimental. | 42 |
| Figura 10. Dados meteorológicos: a) temperaturas do ar (°C) máxima e | 43 |

mínima, b) umidades relativas do ar (%) máxima e mínima, c) velocidade do vento (m/s), d) radiação solar (W/m²), e) evapotranspiração de referência (mm/dia) e f) precipitação pluvial (mm/dia), ocorridos durante a execução do segundo experimento do feijoeiro

- Figura 11. Médias dos valores das variáveis de crescimento: a) altura da planta (cm) e b) diâmetro do caule (mm) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do segundo experimento do feijoeiro. 45
- Figura 12. Médias dos valores das variáveis de crescimento: a) peso total (g); b) peso parte aérea seca (g); c) peso raiz (g) e d) peso raiz seca (g) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do segundo experimento do feijoeiro. 45
- Figura 13. Valores das variáveis de produção: a) peso total (kg) e b) peso do grão (kg) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do segundo experimento do feijoeiro. 46
- Figura 14. Umidade média do solo para os níveis: a) 10, b) 20, c) 30 e d) 40 cm de profundidade respectivamente, durante o experimento na área experimental 47
- Figura 15. Comportamentos diários: a) evapotranspiração (mm) e b) coeficiente de cultura (Kc) do feijoeiro para a região de estudo determinados por meio do balanço hídrico do solo através da execução dos experimentos. 47
- Figura 16. Comparação entre os valores observados e simulados pelo AquaCrop no processo final de calibração para a cultura do feijoeiro durante a execução do a) 1º e b) 2º experimento. 48
- Figura 17. Resultados gerados pelo modelo AquaCrop após a calibração local do 1º experimento de cultivo para: a) cobertura do solo pelo dossel (%); c) profundidade da raiz (m); e) biomassa total produzida (ton/ha); g) produtividade simulada (ton/ha); i) processo de formação do índice de colheita (%) e k) produtividade em função da demanda de água evapotranspirada pela cultura (kg/m³). Resultados gerados pelo modelo 50

AquaCrop após a calibração local do 2º experimento de cultivo para: b) cobertura do solo pelo dossel (%); d) profundidade da raiz (m); f) biomassa total produzida (ton/ha); h) produtividade simulada (ton/ha); j) processo de formação do índice de colheita (%) e l) produtividade em função da demanda de água evapotranspirada pela cultura (kg/m³).

Figura 18. Comparação dos valores observados em condições de campo com os simulados pelo modelo AquaCrop no processo de validação para os tratamentos de 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura: a) comportamento das biomassas totais (ton/ha) observada e simulada para os tratamentos durante o 1º experimento; b) comportamento das produtividades (ton/ha) observada e simulada para os tratamentos durante o 1º experimento; c) comportamento das biomassas totais (ton/ha) observada e simulada para os tratamentos durante o 2º experimento e d) comportamento das produtividades (ton/ha) observada e simulada para os tratamentos durante o 2º experimento

LISTA DE TABELAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabela 1. Relação de produtos utilizados para o controle no experimento. | 29 |
| Tabela 2. Dados meteorológicos climáticos médios de Campina Grande-PB no período de 1977 a 2015. | 29 |
| Tabela 3. Valores do coeficiente de cultivo do feijoeiro utilizados como base para a determinação da lâmina bruta aplicada. | 30 |
| Tabela 4. Propriedades químicas do solo na área experimental. | 37 |
| Tabela 5. Dados meteorológicos durante o primeiro período experimental da região de Campina Grande, PB em 2018. | 37 |
| Tabela 6. Total de água aplicada em cada tratamento durante o primeiro experimento. | 39 |
| Tabela 7. Dados meteorológicos durante o segundo período experimental da região de Campina Grande, PB em 2018. | 42 |
| Tabela 8. Total de água aplicada em cada tratamento durante o segundo experimento. | 44 |
| Tabela 9. Coeficiente de cultivo utilizado no experimento e o coeficiente médio encontrado no decorrer desta pesquisa. | 48 |
| Tabela 10. Comparação entre os valores contidos no AquaCrop e os valores calibrados para a cultura do feijoeiro no ano de 2018. * 1º / 2º experimento. | 49 |
| Tabela 11. Comparação entre os valores observados e simulados pelo AquaCrop para os tratamentos de 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura. | 53 |
| Tabela 12. Estatísticas utilizadas na validação do modelo AquaCrop para biomassa total (ton/ha) e produtividade (ton/ha) do feijão. 1º experimento / 2º experimento. | 53 |

RESUMO

Este trabalho teve como principal objetivo realizar a calibração e validação do modelo AquaCrop para a cultura do feijão-caupi de modo a torná-lo aplicável na simulação da produtividade em regiões semiáridas tropicais e em especial para a região Nordeste do Brasil. Nesta pesquisa foram realizados dois experimentos de campo na área de estudo, localizada no município de Campina Grande – PB nos meses de abril a Junho de 2018 (período chuvoso) e setembro a novembro (período seco) utilizando a espécie de feijão ‘*Vigna unguiculata* (L.) Walp’. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com 5 tratamentos que consistiram de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura com 2 repetições cada, totalizando 10 parcelas experimentais. Foram analisadas características da planta e de seu grão, buscando entender o comportamento do crescimento e produção em função desta variação. Foi determinado também a evapotranspiração da cultura juntamente com seu coeficiente. Foram utilizados dados obtidos no tratamento de 100% de reposição para calibração do modelo AquaCrop e a sua validação deu-se através da comparação dos valores encontrados pelo modelo com os observados em campo em condições de deficiência hídrica. Dentre os vários resultados encontrados na pesquisa, destacam-se que as variáveis como peso e diâmetro do feijoeiro apresentaram diferenças significativas para os tratamentos nos dois experimentos. A lâmina recomendada para irrigação foi a de 100% e os resultados mostraram que a reposição de 20% não é suficiente para a sobrevivência da cultura durante o período seco na região. Os valores do Kc encontrados foram de 0,85; 1,1; 1,2 e 1,0 para os estágios inicial, crescimento, reprodutivo e final, respectivamente. Por fim, essa proposta de validação do modelo AquaCrop foi satisfatória sob o ponto de vista estatístico por apresentar resultados excelentes para a biomassa total e produtividade, confirmando a capacidade do modelo de realizar boas estimativas de produtividades em situações de déficit hídrico no feijoeiro.

Palavras-chave: AquaCrop, calibração, feijão-caupi, evapotranspiração da cultura.

ABSTRACT

The main goal of this work was to calibrate the AquaCrop model for cowpea bean in order to make it applicable in the simulation of productivity in tropical semi-arid regions and especially in the Northeast region of Brazil. In this research two field experiments were carried out in the study area, located in Campina Grande - PB from April to June 2018 (rainy period) and from September to November (dry period) using the bean 'Vigna unguiculata (L.) Walp'. The experimental design was completely randomized, with 5 treatments that consisted of 100, 80, 60, 40 and 20% of replenishment of the water required for the crop with 2 replicates each, totaling 10 experimental plots. The characteristics of the plant and its grain were analyzed, seeking to understand the behavior of growth and production as a function of this variation. Evapotranspiration of the crop was also determined along with its coefficient. The DAPa that was used, was obtained in the treatment of 100% replacement for calibration of the AquaCrop model and its valiDAPion was obtained by comparing the values found by the model with those observed in the field under conditions of water deficit. Among the several results found in the research, the variables such as weight and diameter of the bean tree showed significant differences for the treatments in the two experiments. The recommended blade for irrigation was 100% and the results showed that the 20% replacement is not sufficient for the survival of the crop during the dry period in the region. The Kc values found were 0.85; 1.1; 1,2 and 1,0 for the initial, growth, reproductive and final stages, respectively. Finally, this proposal of valiDAPion of the AquaCrop model was satisfactory from the statistical point of view because it presented excellent results for the total biomass and productivity, confirming the capacity of the model to make good estimates of productivity in situations of water deficit in the bean tree.

Key words: AquaCrop, calibration, cowpea, crop evapotranspiration.

1. INTRODUÇÃO

A demanda por alimentos vem crescendo ano após anos como consequência do crescimento da população mundial. Logo, há uma grande necessidade de aperfeiçoar a produção de alimentos para suprir essa demanda, fazendo com que técnicas de aprimoramento sejam cada vez mais cotadas para proporcionar maiores produtividades. Uma alternativa para esta questão é a produção agrícola sob irrigação, que serve tanto para complementar as necessidades hídricas das regiões úmidas, como para tornar produtivas as áreas áridas e semiáridas do globo, que constituem cerca de 55% de sua área continental total.

A irrigação possibilita um número maior de safras por ano e sua finalidade básica é proporcionar água às culturas de maneira a atender às exigências hídricas durante todo seu experimento, possibilitando altas produtividades e produtos de boa qualidade (LIMA et al., 1999). Além de uma maior produtividade, a irrigação também é uma ótima alternativa para o consumo sustentável de água, considerando que a agricultura é uma das atividades que mais consomem água em termos de volume no mundo. Segundo Assad et al. (2016), no Brasil a quantidade de água usada para irrigação é de 836 m³/s, mostrando a necessidade de aumentar a eficiência do uso da água no país e novas técnicas de irrigação são essenciais para este fim.

Com a irrigação, estima-se o consumo de água pela planta com base em equações que calculam a evapotranspiração de referência (ET_o) e coeficientes que ajustam às condições reais de cultivo. Com isso em vista, há uma necessidade de novas pesquisas e estudos, visando entender e aprimorar os recursos hídricos utilizados na irrigação. O feijão é um dos alimentos mais consumidos no Brasil, assim amplamente cultivado predominantemente nas regiões Norte e Nordeste do país e principalmente por pequenos e médios produtores. É uma planta de experimento curto, em torno de 90 dias, permitindo o cultivo mais de uma vez ao ano, tendo a temperatura significativa influência sobre o seu desenvolvimento.

A produtividade desta leguminosa é diretamente influenciada pela disponibilidade hídrica, já que o estresse hídrico tem sido relatado como um dos fatores limitantes da produtividade, pois afeta não somente a produção do grão, como todo o processo de crescimento de todos os órgãos da planta e seu metabolismo (ZIMMERMANN et al., 1988). A irrigação contribui significativamente para o aumento

de produtividade do feijão, principalmente quando essa for bem manejada. A disponibilidade de água regular e conforme à necessidade hídrica da cultura, promove um melhor desenvolvimento e permite que a planta complete seu experimento. A irrigação também contribui para o cultivo contínuo nas outras épocas do ano (SILVA et al., 2013).

A modelagem climática é uma ótima alternativa para se estudar estratégias promissoras no auxílio da irrigação, pois estima a necessidade hídrica da cultura ao longo do experimento, além de fornecer subsídio para uso da função de produção de água (GEERTZ e RAES, 2009). Quando se pretende estudar a resposta da produtividade da cultura, associada a diferentes lâminas de irrigação em campo ou em experimentos controlados, é essencial a utilização destes modelos, por serem formados por um conjunto de algoritmos que descrevem processos físicos e fisiológicos.

O AquaCrop é um modelo desenvolvido pela organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), que prediz a produtividade das culturas, a necessidade de água e a eficiência do uso da água, sob condições limitantes de déficit hídrico (RAES et al., 2009). É parametrizado para cada tipo de cultura para que se possa obter com mais precisão alguns objetivos como: produção de biomassa, produtividade, balanço de água no solo entre outros. Com isso, este trabalho visa-se os objetivos descritos abaixo.

2. OBJETIVOS

2.1 **Geral:** Realizar a calibração e validação o modelo AquaCrop para o feijão-caupi cultivado no semiárido do Nordeste do Brasil.

2.2 **Específicos:** (i) determinar a evapotranspiração e produção de biomassa do feijão; (ii) realizar o balanço hídrico do solo sob condições irrigadas;(iii) obter as variáveis de crescimento das cultura analisada no estudo ao longo dos seus experimentos de produção; (iv) encontrar a laminar de água mais apropriada para o manejo da irrigação da cultura analisadas no estudo; (v) realizar simulações da produtividade das culturas através do AquaCrop com intuito de saber as respostas do modelo a diferentes níveis de irrigação; (vi) avaliar o crescimento e produtividade através de ferramentas estatísticas descritiva; (vii) comparar as respostas da produtividade da cultura modelada com o sistema real em função de diferentes reposições de água.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Cultura do feijão

O feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] é um leguminosa granífera de origem africana e uma importante fonte de proteína para milhões de pessoas na África subsaariana e em outras partes do mundo em desenvolvimento (SEBETHA et al., 2015).

É bastante utilizada na alimentação humana e amplamente cultivada nas áreas semi-áridas do Nordeste brasileiro. É uma espécie rústica, bem adaptada às regiões de clima quente, úmida ou semi-árida, do Norte (Trópico Úmido) e Nordeste (Trópico Semiárido), respectivamente. Conhecido nas demais regiões do País como hortaliça para produção de grãos verdes e vagens, é também utilizado na produção de ramos e folhas para a alimentação de animais, sendo consumido naturalmente como feno (TEIXEIRA et al., 2015).

As principais características desta cultura incluem uma boa qualidade de proteína (23-32%), com alto valor nutricional, boa capacidade de fixação de nitrogênio atmosférico e ser tolerante à seca e as altas temperaturas, além de ter a capacidade de crescer em solos de baixa fertilidade, estabelecendo associações com diversos microorganismos (bactérias do gênero rizóbio e fungos micorrízicos arbusculares) (CRUZ et al., 2014; CARVALHO et al., 2017).

A cultura concentra elevada porcentagem do sistema radicular na camada superficial do solo, refletindo-se em alta sensibilidade ao déficit hídrico. Em função disso, o adequado desenvolvimento das plantas está associado à distribuição regular das chuvas ou ao eficiente uso da água de irrigação (CARLESSO et al., 2007).

O desenvolvimento reprodutivo tem se demonstrado extremamente sensível as altas temperaturas durante a noite, sendo mais prejudicial do que a alta temperatura diurna. Esse estresse térmico pode suprimir o desenvolvimento de botões florais e induzir aborto quando ocorre nos primeiros estágios de cultivo, enquanto que em um estágio posterior de desenvolvimento, danifica o desenvolvimento das anteras, resultando em esterilidade do pólen e abscisão de flores (AHMEDE et al. 1993).

A cultura do feijão-caupi também possui grande relevância na área socioeconômica, devido principalmente, à mão de obra empregada durante o experimento da cultura, pelo baixo custo de produção, por apresentar experimento curto

e rusticidade para desenvolver-se em solos de baixa fertilidade (FREIRE FILHO et al., 2011).

3.2 Consumo hídrico da cultura

O conhecimento do consumo de água nos diversos estádios ou etapas de desenvolvimento das plantas permite irrigação mais racional, de acordo com a exigência da cultura. Para a irrigação dar bons resultados, deve ser bem quantificada, pois aplicação de lâminas de água insuficientes repõem água somente nas camadas superficiais do solo, não umedecendo toda a zona das raízes. Por outro lado, irrigações excessivas proporcionam perda de água e nutrientes, além de favorecer o aparecimento de microrganismos patogênicos, podendo prejudicar as raízes por falta de arejamento em casos de solos com drenagem deficiente (FERNANDES E TURCO, 2018). Para se determinar o consumo hídrico das culturas é necessária a estimativa da evapotranspiração, que nada mais é que a transferência da água das superfícies cultivadas para a atmosfera e é controlada pela disponibilidade de energia e pelo suprimento hídrico do solo (PENMAN, 1948).

O consumo de água pelas culturas é denominado de evapotranspiração da cultura (ET_c), que é a ocorrência simultânea de dois processos importantes no cultivo das plantas, a evaporação da água do solo e a transpiração das plantas. Na ausência de equipamentos de medidas diretas de evapotranspiração da cultura, os pesquisadores, muitas vezes, lançam mão de estimativas baseadas na ET_o e no coeficiente de cultura (K_c) (OLIVEIRA, 2011). Uma maneira muito utilizada de obter a evapotranspiração de referência (ET_o) é por meio de métodos de estimativa de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO e considerado como padrão, enquanto outros são bastante criticados e, muitas vezes, desprezados (SILVA, 2011).

3.3 Balanço hídrico do solo

O conhecimento de como as plantas utilizam a água no solo, e de como respondem aos níveis de armazenagem a partir do balanço hídrico, pode ser uma saída viável para o estabelecimento de estratégias eficazes de manejo visando ao melhor uso possível das reservas de água no solo pelas culturas (CINTRA et al., 2000).

Portanto, a melhor caracterização dos fatores que interferem neste movimento se torna imprescindível, uma vez que o movimento da água no sistema solo-planta-atmosfera envolve processos como infiltração, redistribuição, drenagem e absorção pelas plantas, os quais podem ser medidos ou estimados pelo método do balanço hídrico (LIMA et al., 2006).

Para se efetuar o balanço hídrico de uma cultura é necessário, portanto, computar as entradas de água no solo via precipitação pluvial ou irrigação, a partir da sua infiltração na superfície, e as saídas, representadas pela drenagem interna, evapotranspiração e deflúvio superficial num volume de solo, com base na configuração do sistema radicular da cultura em estudo, em determinado período de tempo; 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. (LIBARDI, 2005). O balanço hídrico é importante para avaliar a intensidade das saídas e entradas de água no solo e assim definir os períodos mais prováveis de estresse hídrico para a cultura. Relacionando não só o conhecimento dos fatores que o compõem (evapotranspiração, precipitação, drenagem interna ou ascensão capilar, escoamento superficial) como, também, o conhecimento das características da planta, principalmente da sua fenologia, que representa o ponto de partida para a interpretação coerente dos resultados do balanço (CINTRA et al., 2000).

3.4 Evapotranspiração

A evapotranspiração é um importante termo na equação do balanço hídrico, e está intimamente ligada a características da vegetação. É um componente do experimento da água e é o termo usado para descrever a transferência de água de uma variedade de superfícies para a atmosfera, além de ser, por meio de calor latente, responsável por 70% do transporte global de energia lateral (OGUNTUNDE, 2004).

É um processo complexo que é afetado pela ocorrência de chuvas, radiação solar disponível, advecção, turbulência dos ventos, resistência do dossel, área foliar e água disponíveis nas plantas (ZHANG et al. 1999). Em regiões áridas e semiáridas, a evapotranspiração é quase igual a precipitação, enquanto que em áreas úmidas, ela é limitada pela energia solar disponível. Sob condições secas, os principais controles da evapotranspiração são a água disponível nas plantas e a resistência do dossel; em condições úmidas, os controles dominantes são advecção, radiação, área foliar e

transporte turbulento. Enquanto que, em condições intermediárias a importância relativa desses fatores varia dependendo do clima, solo e vegetação (ZHANG et al. 2001).

As informações de evapotranspiração de referência (E_{To}) e máxima de cultura (E_{Tm}) encontradas na literatura, em sua grande maioria vêm de regiões com regimes pluviométricos diferentes do nordeste Brasileiro, que apresenta um regime dividido em período úmido e período seco. Por esse motivo, é necessário que se façam comparações entre as informações encontradas na literatura e as obtidas dentro da realidade climática de cada região. Os métodos de estimativas de evapotranspiração são conhecidos como diretos e indiretos. Dentro dos métodos diretos encontram-se os lisímetros ou evapotranspirômetros, de drenagem e nível constante. Chang (1971) comparou oito métodos de estimativas de evapotranspiração potencial, concluindo que, levando em consideração a precisão, facilidade no manuseio, custo e o tempo necessário para se determinar a evapotranspiração potencial, a estimativa dada pelo método do tanque Classe A é satisfatória para uso no campo, sendo este o método indireto mais viável.

Segundo Sedyama (1987) a determinação da necessidade de água de uma cultura usando a evapotranspiração de referência foi proposta por Van Wijk e de Vries, através de um coeficiente adimensional, conhecido como coeficiente de cultivo ou de cultura e que permite obter a necessidade de água de uma cultura em seus diferentes estádios de desenvolvimento. Sammis et al. (1985), utilizaram a equação proposta por Penman (1948) para a estimativa da evapotranspiração, esta sendo uma combinação da energia líquida disponível ao sistema com a velocidade de troca no processo de transporte de massa; e relacionaram os coeficientes de cultura fornecidos pela equação E_{Tm}/E_{To} em períodos mensais com a soma térmica, concluindo que houve menor variabilidade dos resultados quando utilizaram a soma térmica. O desafio em modelagem de evapotranspiração em escala de captação é ser capaz de representar os processos físicos e fatores climáticos de maneira simples a fim de usar dados disponíveis e permitir a previsão prática do efeito das mudanças na vegetação.

3.5 Coeficiente de cultivo

A determinação dos valores do coeficiente de cultivo (K_c) durante o experimento de desenvolvimento, é fundamental para se outorgar, dimensionar e manejar a irrigação de uma cultura e, uma vez que esses valores variam conforme a disponibilidade energética do local, variedade e idade da planta são importantes à

obtenção de valores regionalizados (SILVA et al., 2018). O coeficiente de cultivo é a razão entre a evapotranspiração máxima da cultura e a evapotranspiração de referência, que dependem do estágio de desenvolvimento da cultura, do sistema de irrigação, da configuração de plantio e das condições meteorológicas reinantes (TEXEIRA et al., 1999).

O valor de K_c muda de acordo com o crescimento e o desenvolvimento da cultura, variando também com a fração de cobertura da superfície do solo pela vegetação à medida que as plantas envelhecem e atingem a maturação (SEDIYAMA et al., 1998).

O K_c é um parâmetro relacionado aos fatores ambientais e fisiológicos das plantas devendo, preferencialmente, ser determinado para as condições locais nas quais será utilizado. Os valores quantificados das oscilações na demanda temporal com base no K_c , recomendados por Doorenbos e Kassam (1994), variam de acordo com a fase de desenvolvimento da cultura utilizada, uma vez que no ambiente atmosférico a dinâmica de fluxo de água é uma função conjunta dos fatores climáticos da região (MEDEIROS et al., 2004).

3.6 Modelagem agrícola

Os modelos de estimativas de produção auxiliam na previsão de produtividade utilizando dados meteorológicos associados à agrometeorologia. Com isso, modelos agrícolas podem colaborar para uma melhor interpretação quantitativa dos efeitos da variabilidade climática sobre a produção vegetal. Basicamente, um modelo de cultura pode ser descrito como um esquema quantitativo para prever o crescimento, desenvolvimento e rendimento de uma cultura, dado um conjunto de características genéticas e variáveis ambientais relevantes (MONTEITH, 1996).

Os modelos de culturas podem ser úteis para diferentes propósitos, principalmente, modelos de culturas que interpretam resultados experimentais e trabalham ferramentas de pesquisa agrônômica para a síntese de conhecimento em pesquisa. Experimentos de campo longos e caros, especialmente com um elevado número de tratamentos, pode ser pré-avaliado através de modelo comprovado para aprimorar os testes de campo e diminuir custos globais (WHISLER et al., 1986).

Dependendo da finalidade e objetivos do modelo de cultivo, podemos distinguir duas abordagens principais de modelagem: ciência e engenharia. O primeiro visa

principalmente melhorar nossa compreensão do comportamento das culturas, sua fisiologia e suas respostas mudanças ambientais. A segunda, tenta fornecer conselhos de gestão para os agricultores ou previsões para os responsáveis políticos (STEDUTO, 2009).

Segundo Steduto (2009), o modelo Aquacrop é do tipo da engenharia, focado principalmente em simular biomassa de culturas atingível e rendimento colhível em resposta a água disponível. O modelo foca na água porque é um importante impulsionador da produção agrícola. O Aquacrop estabelece equilíbrio entre precisão, simplicidade, robustez e facilidade de uso, sendo destinado a usuários práticos, tais como especialistas em extensão, gestores de recursos hídricos, economistas e especialistas em políticas públicas que utilizam modelos simples para planejamento e análise de cenário.

3.7 O modelo Aquacrop

O AquaCrop é um modelo de safra da FAO, que visa simular os rendimentos atingíveis das principais culturas herbáceas como uma função do consumo de água sob condições de irrigação. O mecanismo do modelo é impulsionado pela água, com a transpiração sendo calculada primeiro e traduzida em biomassa usando um parâmetro conservador e específico da cultura: a produtividade de água da biomassa, normalizada pela demanda evaporativa atmosférica e pela concentração de CO₂ no ar (STEDUTO, 2009). Este modelo tem uma estrutura simples e de fácil utilização, empregando 33 parâmetros que podem ser observados facilmente no campo; por exemplo, a percentagem de cobertura do dossel e outros insumos fisiológicos relacionados à biomassa (TODOROVIC et al., 2009). Espera-se que essa estrutura simples e com número reduzido de parâmetros possa facilitar a calibração e utilização do modelo para diferentes culturas e sob diferentes estratégias de gestão.

Não obstante a redução e simplificação das variáveis de entrada, o modelo mantém um número significativo de dados de saída principais, incluindo a simulação da cobertura do dossel, biomassa e componentes da água do solo ao longo de todo o experimento de crescimento, e a colheita final (RAES et al., 2009). Segundo Vanuytrecht (2014), o AquaCrop simula o rendimento da safra em quatro etapas fáceis de entender, o que torna a abordagem de modelagem transparente. As etapas consistem

na simulação do desenvolvimento da cobertura da copa das culturas verdes, transpiração das culturas, biomassa e rendimento final da colheita.

Diversos pesquisadores em todo mundo estudam o comportamento de culturas por meio da modelagem. O AquaCrop tem se destacado e despertado o interesse em sua parametrização e validação para diversos locais e culturas.

Katerji et al. (2013) analisaram o desempenho do modelo AquaCrop após uma série de testes realizados em 12 experimentos de cultivo, relativos ao milho e ao tomate, cultivados na região do Mediterrâneo, com três níveis de estresse hídrico na planta: ausência de estresse hídrico na planta (controle), estresse moderado e estresse severo. Um dos resultados mostrou que o AquaCrop simulou adequadamente a cobertura diária do dossel (CC) nos tratamentos de controle de tomate e milho como também no tratamento de estresse moderado do milho. No tratamento com estresse severo do milho, os valores simulados de CC foram próximos aos valores medidos até 60 dias após a sementeira. Depois deste período, os valores simulados não se encaixaram nas medidas.

O Aquacrop também foi utilizado para a cultura do arroz, sob várias formas de gestão de água. Segundo Lin et al. (2012), sob condições de inundação ele teve um bom desempenho na simulação do desenvolvimento de arroz, biomassa e rendimento. Já em condições de estresse hídrico ou de experimentos de molhamento de secagem, o AquaCrop simulou bem o desenvolvimento e a produção das culturas de arroz (AMIRI, 2016; AMIRI et al., 2015).

Faharani (2009) afirma que a parametrização do modelo é específica do local e, portanto, a aplicabilidade dos principais parâmetros calibrados deve ser testada sob diferente clima, solo, variedade, métodos de irrigação e manejo de campo. Este modelo foi testado com sucesso para algodão, milho, trigo, beterraba sacarina, girassol, amendoim, tomate e outros em uma ampla gama de ambientes (JIN et al., 2014). Estudos anteriores demonstraram que o modelo simula com precisão a cobertura da copa das culturas, a produção de biomassa e a produtividade de grãos tanto em condições regulares como deficitárias, e em condições de baixa fertilidade do solo (FARAHANY, 2009).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização da área de estudo

A pesquisa foi realizada no município de Campina Grande, a segunda maior cidade do Estado da Paraíba. Esta cidade se localiza no semiárido nordestino, na mesorregião do Agreste Paraibano (Figura 1), zona oriental do Planalto da Borborema, na bacia hidrográfica do Médio Paraíba, com latitude sul de $07^{\circ} 13' 50''$ e longitude oeste de $35^{\circ} 52' 52''$ (Ferreira et al., 2016)

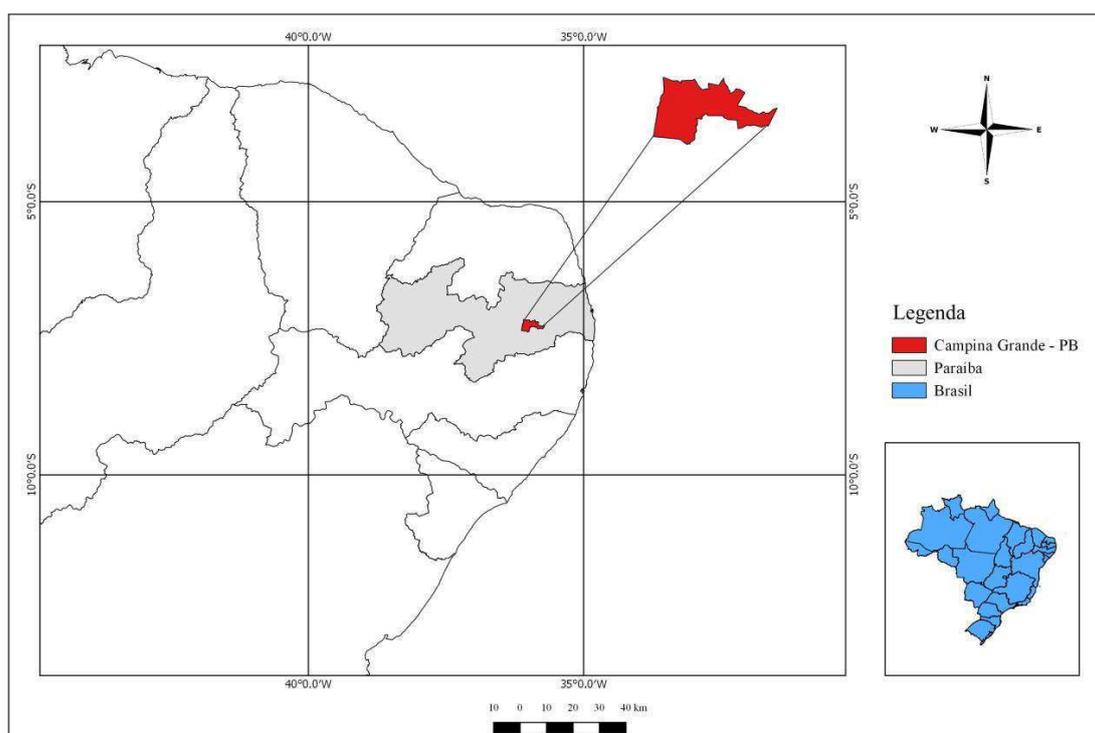


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo, com destaque para a cidade de Campina Grande – PB. Fonte: Oliveira, 2018.

4.2 Área experimental.

Os experimentos foram desenvolvidos na Estação Agrometeorológica Experimental (EstAgro - DCA) ($7^{\circ}12'52,85''$ S e $35^{\circ}54'26,78''$ O) do Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) (Figura 2).



Figura 2. Estação Agrometeorológica Experimental (EstAgro – DCA) da Universidade Federal de Campina Grande. Fonte: Freitas et al, 2018.

Foi realizado com 5 canteiros separados em torno de 0,38 m, com dimensões internas de 1 m de largura, 7,6 m de comprimento e altura de aproximadamente 0,15 m cada. O sistema de irrigação utilizado foi o por microgotejadores e para cada um dos canteiros, foram feitos os plantios com feijões, em 34 covas em cada canteiro. O espaçamento entre covas foi de 0,3 m e entre linhas de 0,4 m, onde foram instaladas 2 linhas de mangueiras com gotejadores em cada canteiro.

Em cada canteiro foram anteriormente instalados 2 tubos de acesso para o monitoramento da umidade do solo. As medições de umidade do solo foram realizadas 3 vezes por semana durante os experimentos da cultura.

Os dados observacionais para a determinação da ETo foram obtidos pela Estação Meteorológica Automática localizada na cidade de Campina Grande pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), com dados diários de precipitação, temperatura do ar máxima e mínima, umidade relativa do ar máxima e mínima, velocidade do vento, radiação solar global.

Antes a semeadura, houve a limpeza da área interna dos canteiros, bem como em volta deles para eliminar plantas indesejadas. A vazão dos gotejadores foi realizada através de sorteio aleatório onde se escolhe uma mangueira de cada canteiro com amostragem de 2 dos 17 pontos de micro gotejadores. Para tanto, foram utilizados copos descartáveis para o armazenamento da água coletada dos gotejadores e contabilizar o volume de água em proveta apropriada para posterior determinação da vazão média (Figura 3).



Figura 3. Canteiros após a instalação do sistema de irrigação, antes de ser determinado a vazão média (l/h) por gotejador na área de estudo.

4.2.1. Delineamento experimental

O delineamento experimental foi através de esquema inteiramente casualizados, composto por 5 tratamentos e 10 repetições de lâmina de água. Os tratamentos de irrigação testados foram de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura. Assim, essa reposição de água foi feita através da multiplicação da evapotranspiração de referência (E_{To}) pelo coeficiente de cultivo da cultura (K_c) conforme definido por Bastos e Ferreira (2018). A Figura 4 exibe os canteiros na estação agrometeorológica experimental.



Figura 4. Canteiros durante o primeiro experimento, com seus respectivos tratamentos.

4.3 Controle de plantas invasoras, pragas e doenças.

As limpezas ao redor dos canteiros foram realizadas sempre que necessário, propiciando, assim, que plantas invasoras não adentrassem na área; o controle nos canteiros foi feito através de capinas manuais em toda área. Já para o controle fitossanitário, foram utilizados produtos conforme exibidos a seguir (Tabela 1). As dosagens foram realizadas de acordo com recomendação fornecida pelos fabricantes dos produtos, além do uso do equipamento de proteção individual (EPI).

Tabela 1. Relação de produtos utilizados para o controle no experimento.

| CONTROLE | NOME COMERCIAL DO PRODUTO |
|-----------------|----------------------------------|
| Formigas | MIREX-S MAX |
| Mosca | ABAMEX – DECIS-25 |
| Pulgão | LANNATE BR |
| Fungos | CALDA BORDALESA |

4.4 Climatologia da área

O clima da cidade foi considerado tropical pela classificação climática de Köppen, com temperatura média do mês mais frio superior aos 18 °C e precipitação média anual superior a 700 mm cuja fórmula climática é Asi (CABRAL JUNIOR et al., 2013).

A Tabela 2 exibe características climáticas do município de Campina Grande-PB.

Tabela 2. Dados meteorológicos climáticos médios de Campina Grande-PB no período de 1977 a 2015. Fonte: INMET.

| Dados Meteorológicos | Média Anual |
|---|--------------------|
| Pressão Atmosférica (mbar) | 951,9 |
| Temperatura média compensada do ar (°C) | 23,3 |
| Temperatura Máxima do ar (°C) | 28,6 |
| Temperatura Mínima do ar (°C) | 20,1 |
| Precipitação Total (mm) | 808,7 |
| Evaporação acumulada do ar (mm) | 1523,0 |
| Umidade Relativa do ar (%) | 78,1 |
| Isolação Total (h) | 2563,1 |

De acordo com esta tabela, pode-se perceber a quantidade razoável de precipitação que se concentra em sua maioria no período considerado chuvoso na região (Março á Junho). O período considerado seco se concentra nos meses de agosto a novembro e é caracterizado pela baixa ocorrência de precipitação e temperaturas mais elevadas.

4.5 Tipo de cultura

A cultura do feijão que utilizada no experimento é da espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp, da classe cores e subclasse vinagre (cultivares com grãos com tegumento liso de cor vermelha), apropriado para a região de acordo com o regulamento técnico da Embrapa. Conhecido popularmente como feijão de corda, ele tem em média um cultivo de 90 dias, um experimento considerado curto o que permite o cultivo de duas vezes no ano. Além disso, é uma cultura sensível ao estresse hídrico, a elevadas temperaturas e exigente em nutrientes (PEREIRA et al., 2015).

4.6 Coeficiente de cultivo

O coeficiente de cultivo (Kc) é um parâmetro relacionado aos fatores ambientais e fisiológicos das plantas, devendo, preferencialmente, ser determinado para as condições locais, nas quais será utilizado. Para a cultura do feijão, o Kc utilizado neste experimento foi baseado nos valores apresentados no artigo de Bastos et al (2018), por se tratar de localidades com as características climáticas parecidas com as deste experimento, como mostra a tabela 3.

Tabela 3. Valores do coeficiente de cultivo do feijoeiro utilizados como base para a determinação da lâmina bruta aplicada. Fonte: Bastos et al, 2018.

| Estádios fenológicos | Duração (dias) | Kc |
|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| I-Inicial | 15 | 0,8 |
| II-Crescimento | 25 | 0,8 a 1,2 |
| III-Reprodutivo | 17 | 1,2 a 1,4 |
| IV-Final | 13 | 1,4 a 0,3 |

4.7 Evapotranspiração da cultura

A evapotranspiração do feijão foi determinada pelo método do balanço hídrico no solo, expresso por (LIBARDI, 2005):

$$ET_c = P + I + A - D \pm \Delta W \pm R \quad (1)$$

em que:

P: Precipitação pluviométrica (mm dia⁻¹)

I: Lâmina de irrigação (mm dia⁻¹)

A: Ascensão capilar (mm dia⁻¹)

D: Drenagem profunda (mm dia⁻¹)

W: Variação da lâmina de água disponível no solo (mm dia⁻¹)

R: Escoamento superficial (mm dia⁻¹)

A ascensão capilar não foi considerada e o escoamento superficial foi considerado nulo, visto que a topografia do terreno é plana. P será adquirida junto a Estação Meteorológica Automática de Campina Grande-PB, e W determinado com base no perfil de umidade do solo.

A variação do armazenamento de água no perfil do solo (ΔS), considerando a profundidade de 40 cm neste estudo, foi determinada pela diferença dos valores do conteúdo de água do solo obtidos do perfil final e inicial para cada período considerado (dia), através da equação:

$$\Delta S = (\theta_2 - \theta_1) \cdot Z_{BH} \quad (2)$$

em que:

ΔS : Variação do armazenamento de água nos dias considerados (mm);

θ_2 : Umidade do solo encontrada no tempo 2 (final), m³m⁻³;

θ_1 : Umidade do solo encontrada no tempo 1 (inicial), m³m⁻³;

Z_{BH} : Profundidade considerada para o balanço hídrico (0,8 m).

4.8 Obtenção dos dados para o balanço hídrico

O monitoramento da umidade do solo foi realizado com base em sonda de capacitância, modelo Diviner 2000®, Sentek Pty Ltd, Austrália. Este equipamento é constituído de um display com teclado e coletor de dados (DATalogger) acoplado, através de um cabo, a uma haste cuja extremidade apresenta o sensor que ao ser inserido no tubo de acesso no solo, faz automaticamente leituras do teor da umidade a cada 10

cm de profundidade à medida que a sonda é inserida no tubo (ANDRADE JUNIOR et al., 2007). A sonda é inserida no tubo e a varredura é feita a cada 0,1 m de profundidade até 0,75 m. Os dados dessas leituras são armazenados no DATalogger do equipamento.

4.9 Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência foi determinada através do programa ET_o Calculator, seguindo o procedimento de Penman-Monteith da FAO (Allen et al., 1998) dada pela equação (3) abaixo:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (3)$$

em que:

ET_o: evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹)

R_n: saldo de radiação à superfície da cultura (MJ m⁻² d⁻¹)

G: densidade do fluxo de calor do solo (MJ m⁻² d⁻¹)

T: média da temperatura do ar a 2 m de altura (°C)

u₂: velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹)

e_s-e_a : déficit da pressão de vapor medido a 2 m de altura (kPa)

Δ: declinação da curva de pressão de vapor (kPa °C⁻¹)

γ: constante psicométrica (kPa °C⁻¹)

Nesta equação o valor 0,408 converte o saldo de radiação R_n expresso em MJ m⁻² d⁻¹ para a evaporação equivalente expressa em mm d⁻¹ (FREITAS et al, 2018).

4.10. Descrição do Aquacrop

A estrutura do modelo AquaCrop inclui quatro componentes: ar (com sistema térmico, precipitação, demanda por evaporação atmosférica e concentração de dióxido de carbono), colheita (com processos de crescimento, desenvolvimento e produção), solo (com balanço hídrico do solo), e de gestão (com irrigação e fertilidade do solo, especialmente de nitrogênio e outros aspectos relacionados com a água). O modelo funciona com o cálculo de biomassa, que é baseado na quantidade de água transpirada.

As equações estruturais do modelo estimam a produção de biomassa diretamente da transpiração das culturas através do uso eficiente da água e o rendimento final com base no índice de colheita, dada pelas equações 4 e 5, respectivamente:

$$B = WP \times \Sigma T \quad (4)$$

$$Y = B \times HI \quad (5)$$

em que:

WP: é a produtividade da água ($\text{Kg m}^{-2} \text{mm}^{-1}$)

T: transpiração (mm)

B: representa a biomassa seca (Kg)

Y: produtividade final (ton/ha)

HI: índice de colheita (%)

O índice de área foliar (IAF) é a taxa de área da folha total pela área média de terra por planta. A cobertura do dossel (CC) foi obtida com base no IAF seguindo a equação de Hsiao et al. (2009):

$$CC = 1.005[1 - \exp(-0.6LAI)]^4 \quad (6)$$

4.10.1. Dados do modelo AquaCrop

Para a calibração e validação do modelo AquaCrop na Estação Agrometeorológica Experimental (EstAgro – DCA), foram utilizados dados de entrada de clima, solo, cultura e manejo obtidos durante o experimento.

4.10.1.1. Clima

Os elementos do clima exigidos pelo modelo AquaCrop são valores diários de temperatura do ar mínima e máxima, evapotranspiração de referência da cultura (ET_o), precipitação e concentração média anual de dióxido de carbono (CO₂). A ET_o foi

calculada pelo método de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998), como foi mostrada na equação 3 através do software ETo Calculator Version 3.2 (FAO, 2012).

4.10.1.2. Solo

Para o solo, o modelo admite até cinco diferentes horizontes sendo cada um com suas características físicas. Já para as características hidráulicas do solo são necessários dados de capacidade de campo, ponto de murcha permanente, coeficiente de drenagem e a condutividade hidráulica à saturação. Para este experimento não houve a coleta desses dados, foi feito o uso de valores indicativos fornecidos pelo próprio modelo Aquacrop.

4.10.1.3. Cultura

O componente da cultura no modelo inclui os seguintes subcomponentes: fenologia, cobertura do dossel, profundidade de enraizamento, transpiração da cultura, evaporação do solo, produção de biomassa e rendimento alcançável.

De acordo com o crescimento e desenvolvimento da cultura, ela tende a expandir sua cobertura e aprofundar o seu sistema radicular, transpirando água e acumulando biomassa, enquanto progride através dos seus estádios fenológicos. Com base nisso, o índice de colheita (HI) altera a porção de biomassa que será colhida. É importante notar que no AquaCrop, além da partição de biomassa em rendimento, não há outra divisão entre os vários órgãos de plantas, que evita lidar com a complexidade e incertezas associadas aos processos deste particionamento.

4.10.1.4. Manejo

No modelo AquaCrop, divide-se o manejo em duas categorias principais: manejo de campo e manejo de irrigação. No manejo de campo são considerados três aspectos: fertilidade do solo para o cultivo da cultura, práticas de superfície como mulch do solo que reduz a evaporação do solo e o uso de métodos que visem o controle do escoamento superficial e melhora da infiltração.

Já o manejo de irrigação é oferecido opções para avaliar e analisar a produção agrícola e o manejo e uso da água, em condições de chuva ou irrigação. Este foi

realizado diariamente, aplicando dez lâminas de irrigação, duas para cada tratamento, denominadas de T1, T2, T3, T4 e T5 da maior para a menor lâmina. Quando ocorreu registro de precipitação, o volume precipitado foi descontado da lâmina diária.

4.10.2. Calibração e Validação

A calibração e validação do modelo foi realizada através da comparação dos valores observados e simulados para as variáveis biomassa total (ton/ha) e produtividade (ton/ha) nos tratamentos, ajustando-o às diversas informações encontradas e definidas em condição de campo, onde foi possível encontrar os parâmetros adequados às condições locais do município de Campina Grande para o feijoeiro.

O desempenho do modelo foi avaliado usando os seguintes parâmetros estatísticos: erro de previsão (Pe), índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (E), erro médio absoluto (MAE), raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (RMSEN) e do índice Willmott (d). Tanto as estatísticas de Pe e d foram usadas para definir a robustez do modelo, bem como para prever os valores, enquanto Pe, RMSEN e MAE foram usados para avaliar o erro de previsão do modelo.

$$Pe = \frac{(S_i - O_i)}{O_i} \times 100 \quad (7)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$RMSEN = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N}} \times 100 \quad (9)$$

$$MAE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{N}} \quad (10)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (11)$$

em que:

S_i e O_i : são valores simulados e observados, respectivamente

\overline{O}_i : valor médio de O_i

N : representa o número de observações

Quando E e d se aproximam da unidade, e Pe , $RMSEN$ e MAE aproximam-se de zero, representam indicadores positivos de desempenho do modelo. A simulação é considerada excelente se $RMSEN$ for menor que 10%; é considerada boa se ele for entre 10 e 20%; justo se for entre 20% e 30%; e ruim quando for acima de 30%.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades químicas do solo

Na tabela 4 são apresentadas as propriedades químicas do solo encontrados nos canteiros.

Tabela 4. Propriedades químicas do solo na área experimental.

| Características químicas | |
|---|---------|
| Cálcio (cmol/dm ³) | 3,26 |
| Magnésio (cmol/dm ³) | 2 |
| Sódio (cmol/dm ³) | 0,07 |
| Potássio (cmol/dm ³) | 0,3 |
| Hidrogênio (cmol/dm ³) | 1,93 |
| Alumínio (cmol/dm ³) | 0 |
| Carbonato de cálcio qualitativo | Ausente |
| Carbono Orgânico (g/kg) | 14,6 |
| Matéria Orgânica (g/kg) | 25,1 |
| Fósforo Assimilável (mg/dm ³) | 34,7 |
| Ph H ₂ O (1;2;5) | 5,76 |
| Condutividade elétrica – mmhos/cm | 0,11 |

Essa análise foi realizada no laboratório de irrigação e salinidade presente no departamento de engenharia agrícola da Universidade federal de Campina Grande.

5.2 Características climáticas do local durante o período chuvoso.

Os valores das variáveis meteorológicas durante a realização do experimento são apresentados na Tabela 6. De acordo com esta tabela, percebe-se que a precipitação total durante o primeiro experimento (período chuvoso) de cultivo foi de 236,2 mm. A temperatura do ar e umidade relativa máxima e mínima apresentaram valores médios de 27,4°C, 20,2°C e 95% e 61%, respectivamente, enquanto a velocidade média do vento foi de 2,6 ms⁻¹.

Tabela 5. Dados meteorológicos durante o primeiro período experimental da região de Campina Grande, PB em 2018

| Variáveis | PRP (mm) | V. Vento (m/s) | T.máx (°C) | T.min (°C) | UR máx (%) | UR mín (%) | Rs (W/m ²) |
|-----------|----------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------------------|
| Total | 239 | - | | | | | |
| Média | - | 2,6 | 27,4 | 20,2 | 95 | 61 | 210 |
| Máx | 29,2 | 3,6 | 30,4 | 22,2 | 98 | 85 | 331 |
| Mín | 0,0 | 1,4 | 25 | 17,7 | 90 | 43 | 97 |

5.3 Primeiro experimento.

O primeiro experimento foi realizado em condições de campo no período de abril a junho de 2018, período considerado chuvoso. Na Figura 5 são apresentados os resultados do comportamento temporal das variáveis meteorológicas do primeiro experimento: temperaturas do ar ($^{\circ}\text{C}$) máxima e mínima, umidades relativas do ar (%) máxima e mínima, velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m^2), para o local no primeiro experimento de estudo.

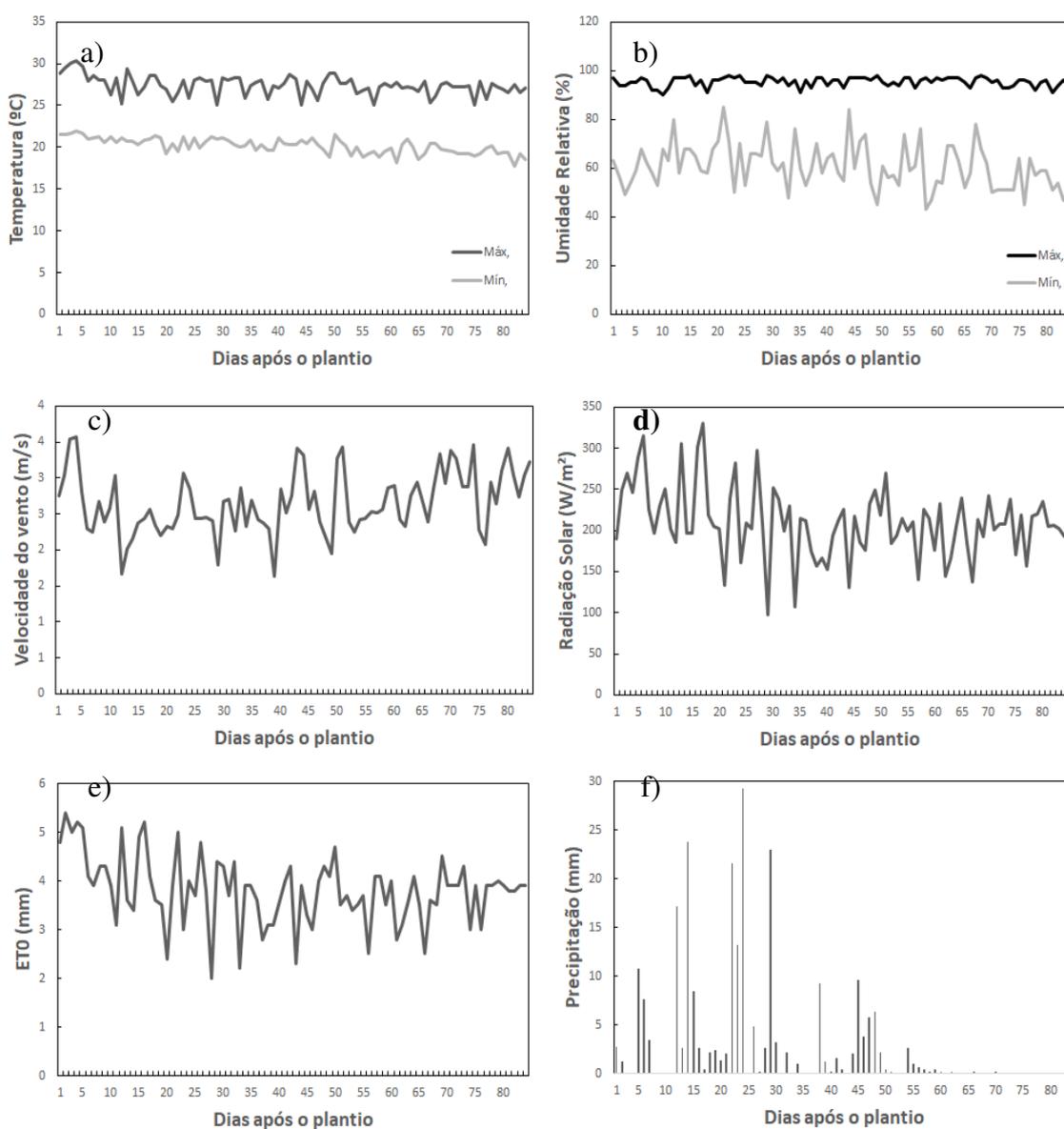


Figura 5. Dados meteorológicos: a) temperaturas do ar ($^{\circ}\text{C}$) máxima e mínima, b) umidades relativas do ar (%) máxima e mínima, c) velocidade do vento (m/s), d) radiação solar (W/m^2), e) evapotranspiração de referência (mm/dia) e f) precipitação pluvial (mm/dia), ocorridos durante a execução do primeiro experimento do feijoeiro.

Na Figura 5a, percebe-se que as temperaturas mínimas e máximas apresentaram ao longo da série temporal comportamento ligeiramente decrescente, mas mantiveram o comportamento esperado para o período. As demais variáveis apresentaram as variações padrões, com a precipitação (Figura 5f) sendo intensa nos primeiros estágios da cultura e diminuindo a partir do DAP 70.

5.3.1. Demanda hídrica do feijão caupi para o período chuvoso.

Na Tabela 7 são apresentadas as lâminas de água aplicadas para atender à necessidade hídrica total do feijão caupi do início ao fim do cultivo para cada tratamento utilizado no estudo.

Neste período, a instabilidade das variáveis meteorológicas pode ter influenciado a produtividade em função da reposição em cada tratamento. A precipitação neste período foi de 236 mm e afetou diretamente na quantidade de água aplicada, em alguns dias não ocorreu a reposição devido a ocorrência de chuva.

Tabela 6. Total de água aplicada em cada tratamento durante o primeiro experimento.

| Condição de manejo | Água total aplicada (mm) | Necessidade Hidrica |
|---------------------|--------------------------|---------------------|
| Tratamento 1 (100%) | 991,9 | 130,4 |
| Tratamento 2 (80%) | 793,5 | 104,4 |
| Tratamento 3 (60%) | 595,1 | 78,3 |
| Tratamento 4 (40%) | 396,7 | 52,2 |
| Tratamento 5 (20%) | 198,4 | 26,1 |

5.3.2. Variáveis fenométricas do feijoeiro analisadas no primeiro experimento

A figura 6 exibe o comportamento dos valores médios da altura da planta (cm) e diâmetro do caule (mm), sendo possível observar que todos os tratamentos apresentaram comportamentos semelhantes. As alturas apresentaram os resultados esperados, porém, o diâmetro do caule no tratamento de 60% foi o maior no fim do experimento e o tratamento de 20% apresentou uma variação inesperada, ultrapassando o tratamento de 40% no primeiro mês.

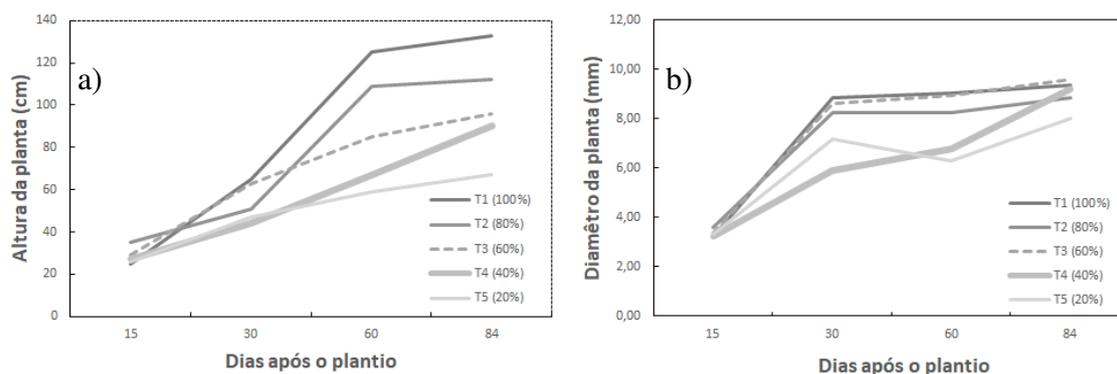


Figura 6. Médias dos valores das variáveis de crescimento: a) altura da planta (cm) e b) diâmetro do caule (mm) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do feijoeiro.

O tratamento que apresentou maior altura média do feijoeiro no período de coleta de dados foi o de 100% (87 cm) e a menor média para 20% (49,75 cm). Já o diâmetro do caule no tratamento de 60% superou o de 100%, com valor médio de 7,64 mm, mas isso foi atribuído a escolha aleatória das amostra para a medição. E como o esperado, o de 20% apresentou menor diâmetro médio (6,20 mm).

Na Figura 7 é apresentado o peso total da planta (caule, folhas e raiz), o peso da parte aérea seca (caule e folhas), o peso da raiz e o peso da raiz seca para os cinco tratamentos em diferentes estágios do desenvolvimento do feijoeiro.

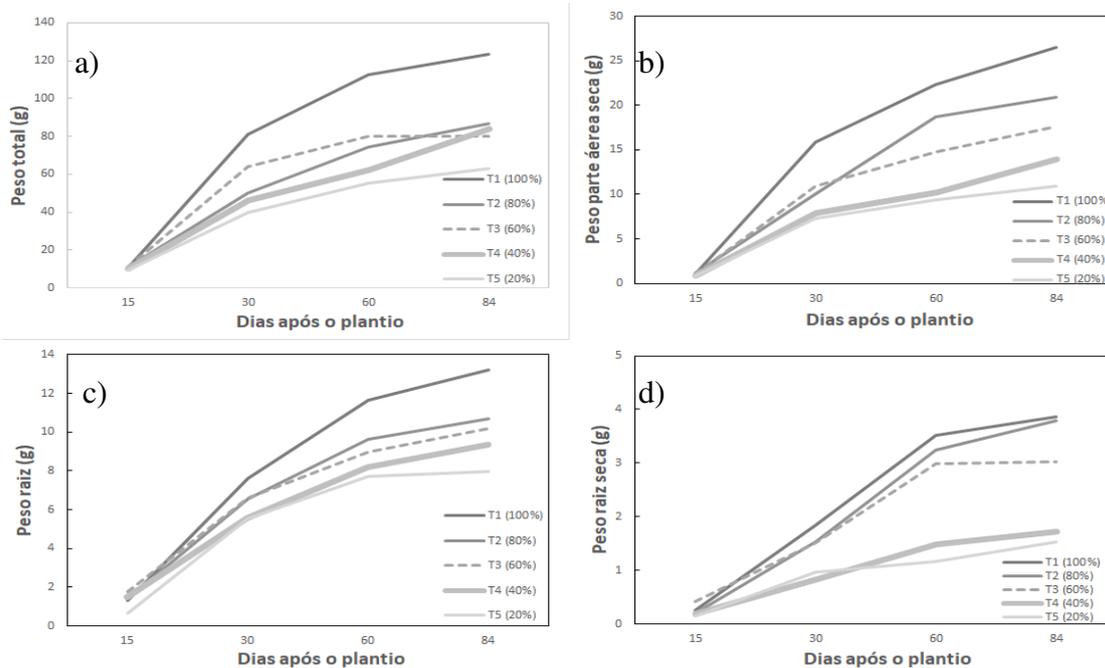


Figura 7. Médias dos valores das variáveis de crescimento: a) peso total (g); b) peso parte aérea seca (g); c) peso raiz (g) e d) peso raiz seca (g) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do feijoeiro.

Com base na análise da figura, percebe-se que o comportamento da cultura através dessas variáveis se manteve como o esperado, com o tratamento de 100% tendo os maiores valores e o tratamento de 20% os menores.

Além disso, pode-se notar que nos 30 primeiros dias do cultivo, todas as variáveis tiveram um crescimento linear e uniforme, tendo a partir disso diferenças como a clara diminuição no peso da raiz seca nos tratamentos de 40 e 20%.

5.3.3. Variáveis de produção para o período chuvoso

Na Figura 8 encontram-se o peso total (peso da vagem após a colheita) e o peso do grão para cada tratamento do estudo.

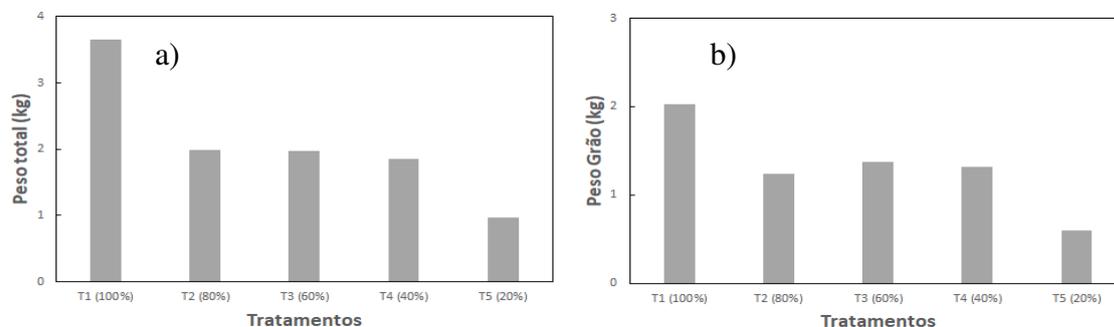


Figura 8. Valores das variáveis de produção: a) peso total (kg) e b) peso do grão (kg) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do feijoeiro.

Através desta figura é possível verificar novamente que o tratamento que mais se destacou foi o de 100%, com uma produção de 3,65 kg de vagens e 2 kg de grão, enquanto que o tratamento de 20% produziu somente 1/3 disso. Percebe-se também que houve pouca diferença na produção nos tratamentos de 80, 60 e 40%, provavelmente devido a ocorrência de chuvas que afetou diretamente na distribuição da irrigação.

5.3.4. Umidade média do solo

De acordo com a Figura 9, nas primeiras camadas não houve muita diferença entre os tratamentos, provavelmente devido a grande quantidade de chuvas no período do experimento. Já nas camadas mais inferiores o tratamento de 100% liderou a

quantidade de umidade e o tratamento de 80% se manteve abaixo dos demais na ultima camada durante os dois primeiros meses do cultivo.

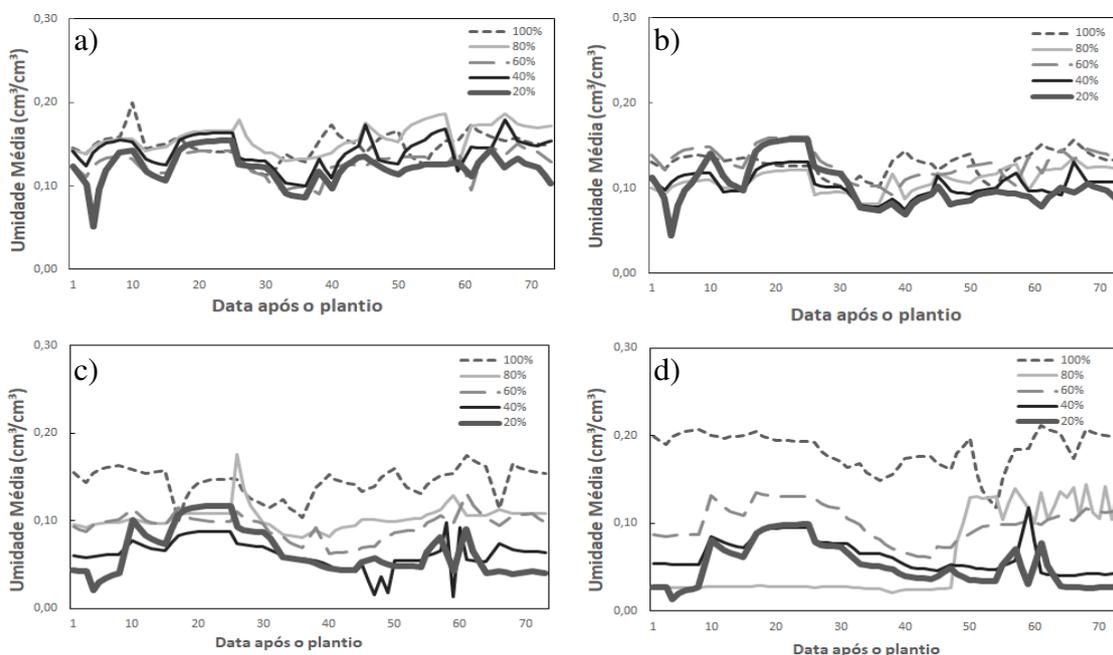


Figura 9. Umidade média do solo para os níveis: a) 10, b) 20, c) 30 e d) 40 cm de profundidade respectivamente, durante o experimento na área experimental.

5.4. Características climáticas do local durante o período seco.

A tabela 8 exibe os dados meteorológicos durante o segundo experimento, onde percebe-se que a precipitação total foi de apenas 6,8 mm e as temperaturas máximas e mínimas do ar apresentadas foram 30,6 °C e 20,6 °C, respectivamente. A umidade do ar variou de 93% a 41% e a velocidade média do vento foi de 4,2 ms⁻¹.

Tabela 7. Dados meteorológicos durante o segundo período experimental da região de Campina Grande, PB em 2018.

| Variáveis | PRP (mm) | V Vento (m/s) | T.máx (°C) | T.min (°C) | UR máx (%) | UR mín (%) | Rs (W/m ²) |
|-----------|----------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------------------|
| Total | 6,8 | - | | | | | |
| Média | - | 4,2 | 30,6 | 20,1 | 93 | 41 | 262 |
| Valor máx | 2,8 | 5,4 | 33,4 | 21,6 | 97 | 60 | 333 |
| Valor mín | 0,0 | 3,0 | 27,1 | 17,4 | 88 | 29 | 175 |

Na Figura 10 são apresentados os resultados do comportamento das variáveis meteorológicas do segundo experimento: temperaturas do ar (°C) máxima e mínima,

umidades relativas do ar (%) máxima e mínima, velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m^2), para o local no primeiro experimento de estudo.

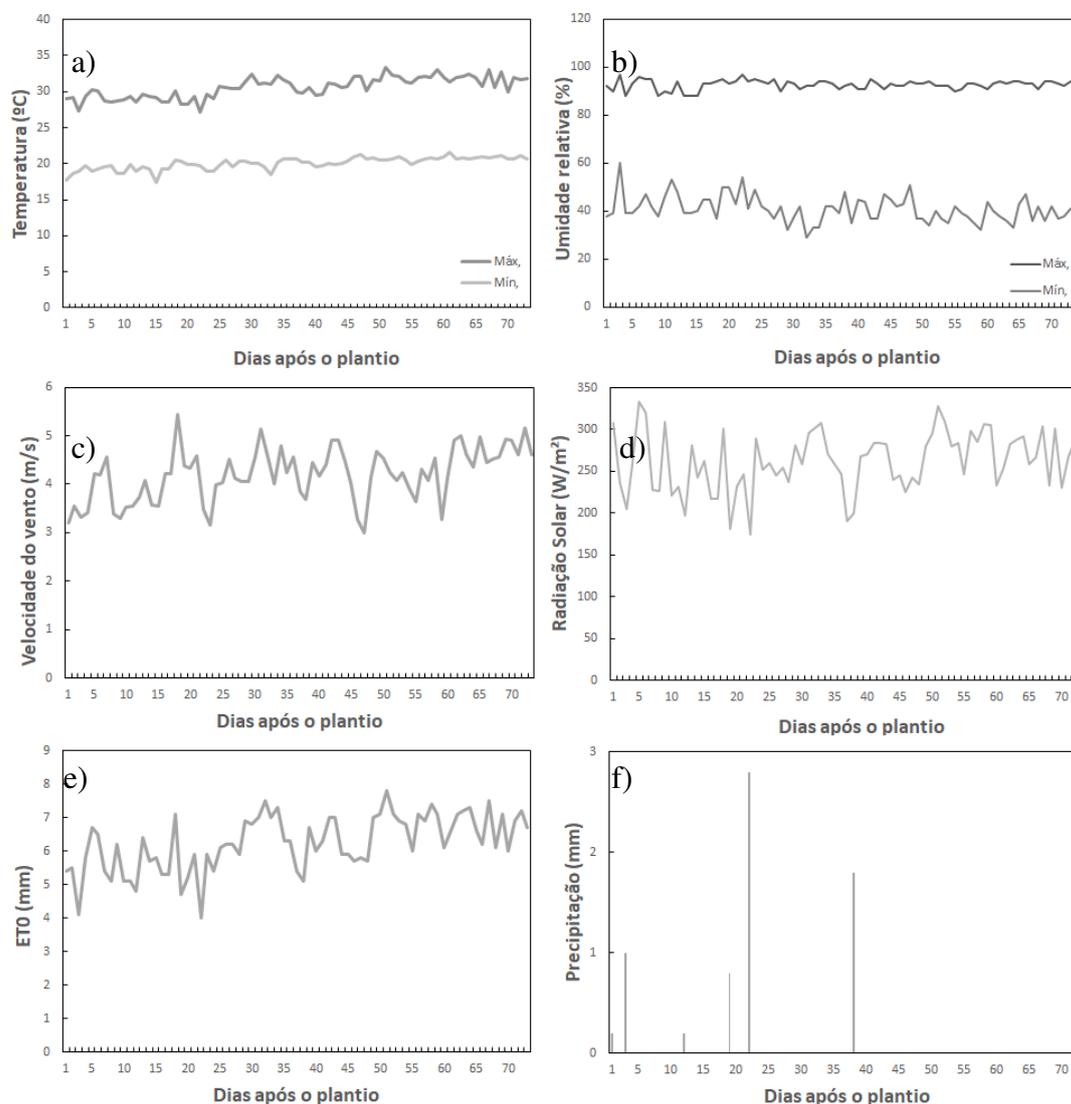


Figura 10. Dados meteorológicos: a) temperaturas do ar ($^{\circ}\text{C}$) máxima e mínima, b) umidades relativas do ar (%) máxima e mínima, c) velocidade do vento (m/s), d) radiação solar (W/m^2), e) evapotranspiração de referência (mm/dia) e f) precipitação pluvial (mm/dia), ocorridos durante a execução do segundo experimento do feijoeiro.

Na Figura 10a, percebe-se ligeiramente um aumento nas temperaturas ao longo do período, o oposto do que ocorreu no período chuvoso. Fora isso, as variáveis apresentaram os comportamentos esperados para o período, com as temperaturas elevadas e pouca precipitação, sendo uma característica da região estudada nesta época do ano.

5.5 Segundo experimento.

O segundo experimento foi realizado em condições de campo no período de setembro a novembro de 2018, período considerado seco. Não houve precipitação significativa neste período e os tratamentos receberam somente a reposição por irrigação, e devido isso, o tratamento de 20% não sobreviveu ao primeiro mês. As plantas brotaram, mas não resistiram a deficiência hídrica.

5.5.1. Demanda hídrica do feijão caupi no período seco.

As lâminas aplicadas para atender as necessidades hídricas no período seco estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 8. Total de água aplicada em cada tratamento durante o segundo experimento.

| Condição de manejo | Água total aplicada (mm) | Necessidade hídrica |
|---------------------|--------------------------|---------------------|
| Tratamento 1 (100%) | 4225,2 | 555,9 |
| Tratamento 2 (80%) | 3380,2 | 444,7 |
| Tratamento 3 (60%) | 2535,1 | 333,5 |
| Tratamento 4 (40%) | 1690,1 | 222,4 |

Como a precipitação total ocorrida neste período foi muito pequena (6,80 mm), não houve interferência da mesma no experimento e o manejo dos tratamentos foi contínuo em todo o desenvolvimento da cultura.

5.5.2. Variáveis fenométricas do feijoeiro analisadas no segundo experimento.

A Figura 11 apresenta os comportamentos dos valores médios das características da cultura: altura da planta (cm) e diâmetro do caule (mm) quando submetidos às diferentes aplicações de lâminas de água para o experimento realizado. Pode-se perceber que o comportamento da altura da planta (cm) no tempo exibiu uma tendência linear para os tratamentos de 100, 80 e 60%. Já o tratamento com reposição de apenas 40%, provocou na planta uma diminuição do seu crescimento a partir do DAP 64.

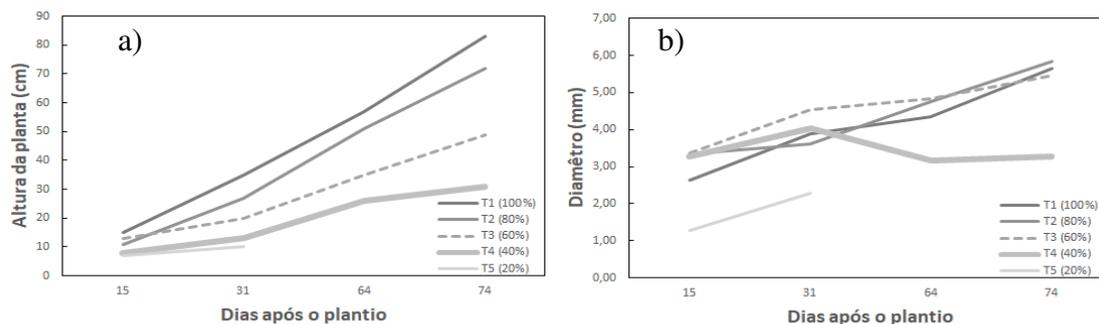


Figura 11. Médias dos valores das variáveis de crescimento: a) altura da planta (cm) e b) diâmetro do caule (mm) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do segundo experimento do feijoeiro.

De modo geral, o tratamento que resultou na maior altura média do feijoeiro foi o de 100% (47,5 cm), com os demais apresentando médias de 40,2; 29,2 e 19, cm para os tratamentos de 80, 60 e 40%, respectivamente. Para o diâmetro do caule (Figura 11b), o tratamento que mais se destacou foi o de 60%, com uma média de 4,55 cm, com os tratamentos de 100, 80 e 40% seguindo o mesmo com valores médios de 4,12; 4,39 e 3,43, respectivamente. Isso pode ter ocorrido devido a seleção aleatória das amostras retiradas para a medição.

A Figura 12 apresenta as variáveis de crescimento: peso total (caule, folhas e raiz), peso da parte aérea seca (caule e folhas), peso da raiz e peso da raiz seca.

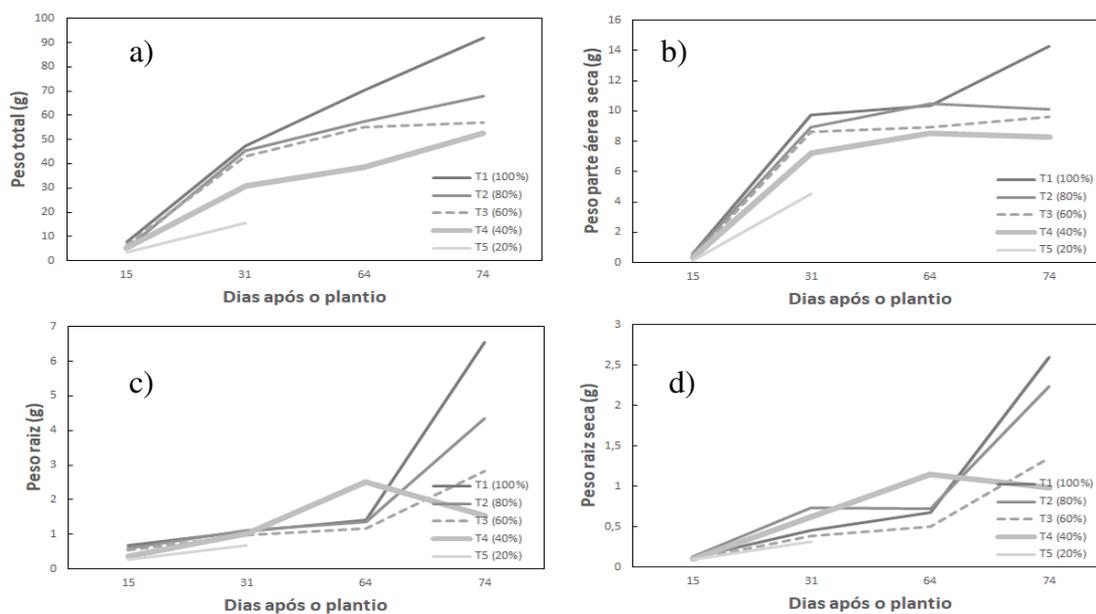


Figura 12. Médias dos valores das variáveis de crescimento: a) peso total (g); b) peso parte aérea seca (g); c) peso raiz (g) e d) peso raiz seca (g) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do segundo experimento do feijoeiro.

Em todos estas variáveis presentes na figura 12, percebe-se a superioridade dos resultados do tratamento de 100%, principalmente durante o estágio final de desenvolvimento. Com relação ao desenvolvimento da raiz, os resultados atestam um aumento no tratamento de 40% por volta do DAP 64, mas atribui-se o fato a escolha da amostra.

5.5.2.1. Variáveis de produção para o período seco.

Analisou-se os valores das variáveis de produção, como peso total (kg) e peso do grão (kg) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% cujos resultados encontram-se na Figura 13.

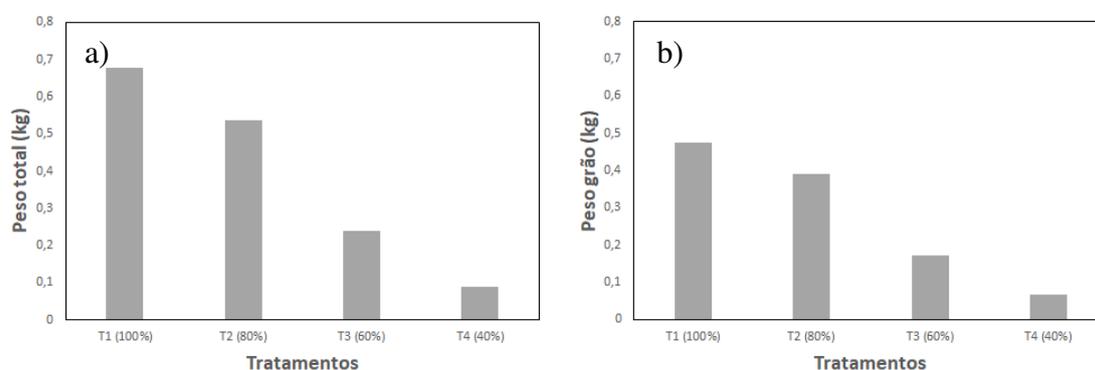


Figura 13. Valores das variáveis de produção: a) peso total (kg) e b) peso do grão (kg) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do segundo experimento do feijoeiro.

Esta figura evidencia que o resultado encontrado em relação ao peso total (vagem) foi maior (0,67 kg) para o tratamento de 100% e menor (0,09 kg) para o tratamento de 40%. De acordo com a Figura 13b o peso do grão colhido para o tratamento de 100% foi o que mais se destacou.

5.5.3. Umidade média do solo.

Na Figura 14 é exibido o curso diário da umidade média do solo para os níveis as profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm, obtida através da sonda de capacitância Diviner 2000.

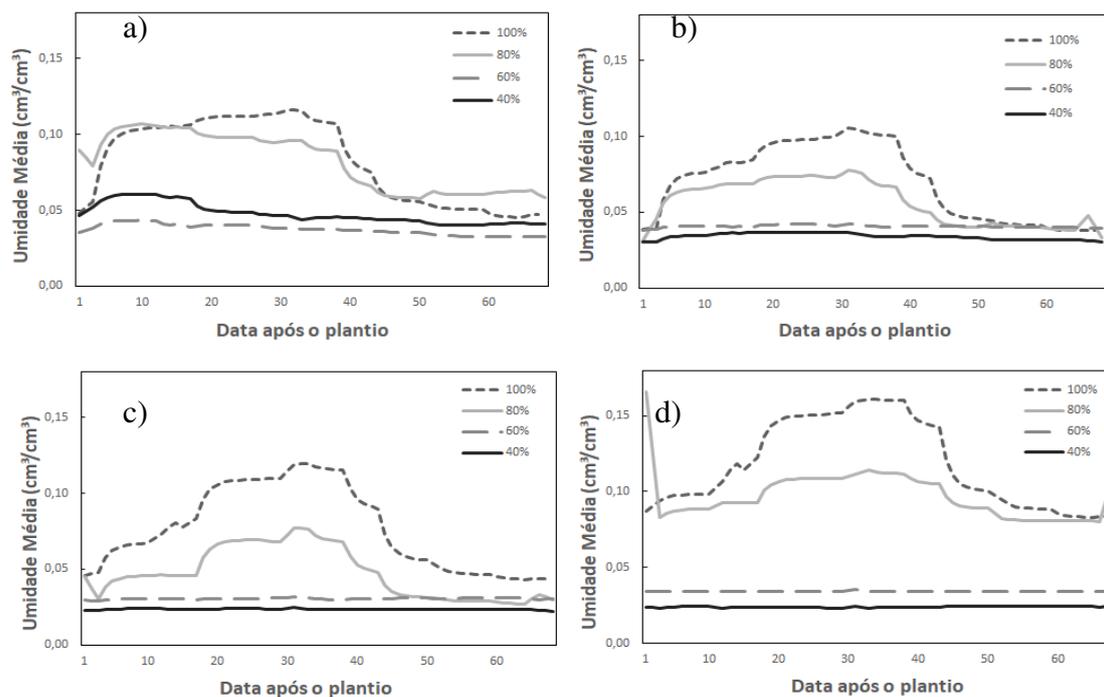


Figura 14. Umidade média do solo para os níveis: a) 10, b) 20, c) 30 e d) 40 cm de profundidade respectivamente, durante o experimento na área experimental.

De acordo com esta figura, o tratamento de 100% teve os maiores valores em todas as camadas, resultado da maior disponibilidade hídrica desta área provida da irrigação.

5.6. Determinação da evapotranspiração da cultura e o seu coeficiente de cultivo.

Através dos dados obtidos pelo balanço hídrico do solo no segundo experimento (2018), a Figura 15 exibe a evapotranspiração do feijoeiro, assim como seu coeficiente de cultivo (K_c), obtidos na região de estudo.

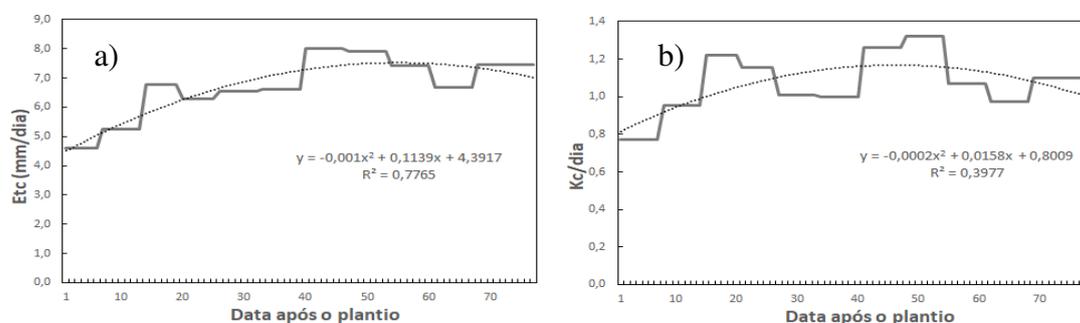


Figura 15. Comportamentos diários: a) evapotranspiração (mm) e b) coeficiente de cultura (K_c) do feijoeiro para a região de estudo determinados por meio do balanço hídrico do solo através da execução dos experimentos.

Através da Figura 15a, pode-se observar a ocorrência de um período em que os valores da evapotranspiração do feijoeiro foram superiores aos demais, correspondendo ao estágio reprodutivo desta cultura. A equação de ajuste resultou num modelo polinomial do 2º grau, apresentando coeficiente de determinação de aproximadamente 78%. Na Figura 15b, observa-se que o Kc seguiu o mesmo comportamento, com ajuste polinomial do 2º grau e coeficiente de determinação de aproximadamente 40%, com predominância de maiores valores para o estágio reprodutivo da cultura.

Tabela 9. Coeficiente de cultivo utilizado no experimento e o coeficiente médio encontrado no decorrer desta pesquisa.

| Estádios fenológicos | Kc | Kc experimental |
|----------------------|-----------|-----------------|
| I-Inicial | 0,8 | 0,85 |
| II-Crescimento | 0,8 a 1,2 | 1,1 |
| III-Reprodutivo | 1,2 a 1,4 | 1,2 |
| IV-Final | 1,4 a 0,3 | 1,0 |

Como pode-se verificar na tabela 10, os resultados determinados nesta pesquisa foram coerentes com os valores encontrados por Bastos et al (2008), que, na ocasião, determinaram o Kc do feijoeiro para a região de Gurguéia-Pi. No presente estudo, o estágio final apresentou um valor do Kc de 1 que, apesar de serem diferentes, de maneira geral foram próximos aos encontrados pelos autores anteriormente citados.

5.7 Calibração do modelo AquaCrop

A Figura 16 exhibe a comparação entre os resultados obtidos nos experimentos em campo com os simulados pelo AquaCrop para a biomassa total (B) e a produtividade (Y) para ambos os dois períodos.

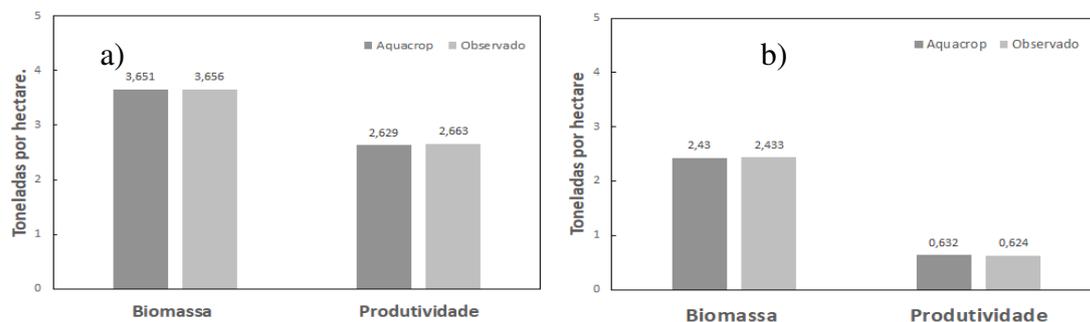


Figura 16. Comparação entre os valores observados e simulados pelo AquaCrop no processo final de calibração para a cultura do feijoeiro durante a execução do a) 1º e b) 2º experimento.

No processo de calibração, buscou-se ajustar os parâmetros teóricos presentes no modelo com os determinados em condições reais de campo de estudo para o tratamento de 100% (sem estresse hídrico), através de um ajuste que proporcionasse maior aproximação entre os resultados medidos e os simulados. Através deste ajuste, com uma ótima aproximação entre observado e calibrado, foi possível determinar os parâmetros locais de calibração do modelo, conforme Tabela 11.

Tabela 10. Comparação entre os valores contidos no AquaCrop e os valores calibrados para a cultura do feijoeiro no ano de 2018. * 1º / 2º experimento.

| Símbolos | Descrição | Valores | | Unidades |
|--------------------|---|---------|-----------|-------------|
| | | Padrão | Calibrado | |
| Desenvolvimento | | | | |
| n | Número de plantas por hectare | 500000 | 300000 | Plantas/hec |
| | Tempo da semente até emergência | 7 / 4* | 5 / 6 | Dias |
| Ccx | Máxima cobertura do dossel | 53 | 60 | % |
| | Tempo da semente/transplante até início da senescência | 70 | 45 / 39 | Dias |
| | Tempo da semente/transplante até a maturidade, ou seja, duração do experimento da cultura | 83 / 73 | 83 / 73 | Dias |
| Floração | | | | |
| | Tempo da semente/transplante até floração | 50 / 22 | 24 / 29 | Dias |
| | Duração do estágio da floração | 10 | 10 | Dias |
| Índice de Colheita | | | | |
| Hlo | Índice de colheita de referência | 60 / 50 | 72 / 26 | % |

De acordo com os resultados, percebe-se que os valores calibrados para condições de campo apresentaram significativa semelhança com os valores do default do modelo. Em ambos os experimentos há diferenças na duração dos estágios da planta medido em campo com aqueles do default do modelo, com o 2º experimento apresentando menores valores; essa diferença entre períodos está no fato de que a variedade analisada apresenta característica de ser de curta duração e ter seu desenvolvimento diretamente afetado a disponibilidade hídrica, o que contribuiu para uma aceleração (ou retardamento) de suas fases.

A figura 17 exibe os resultados gerados pelo modelo aquacrop após a calibração com os dados dos dois experimento.

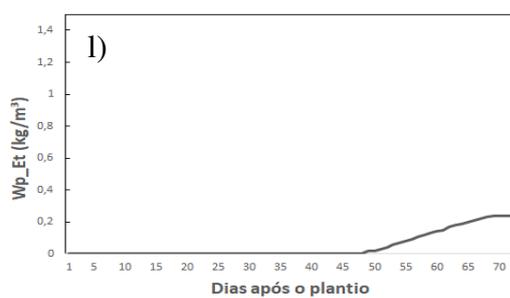
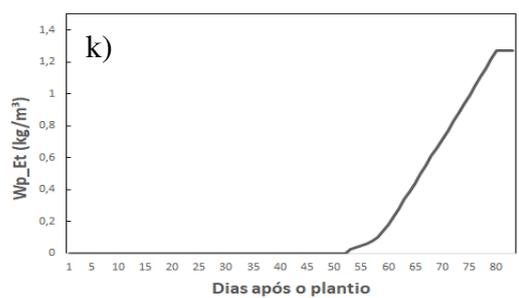
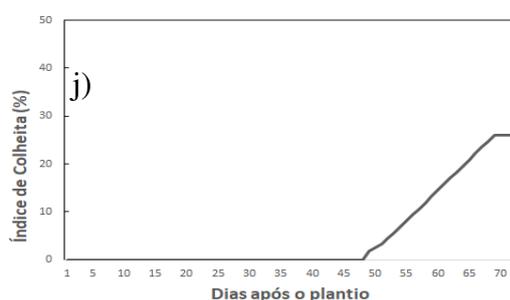
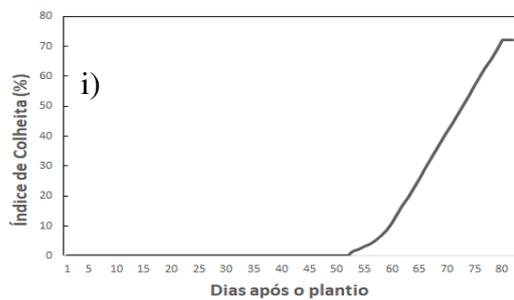
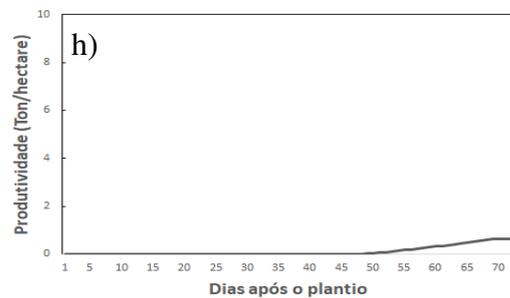
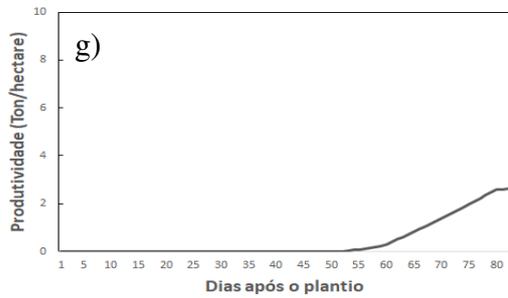
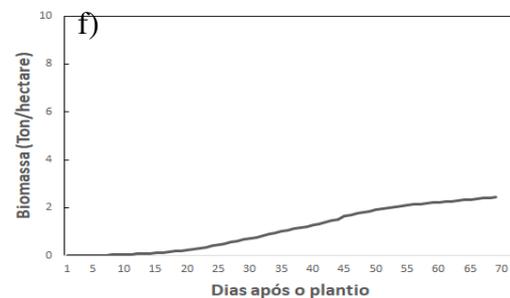
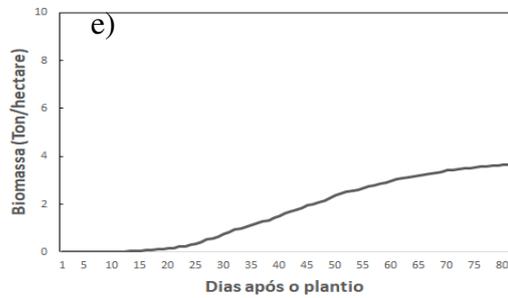
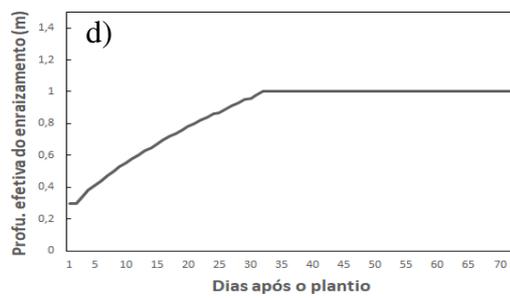
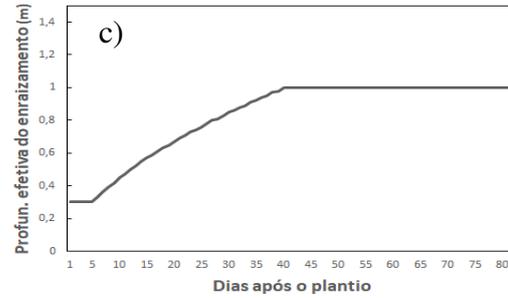
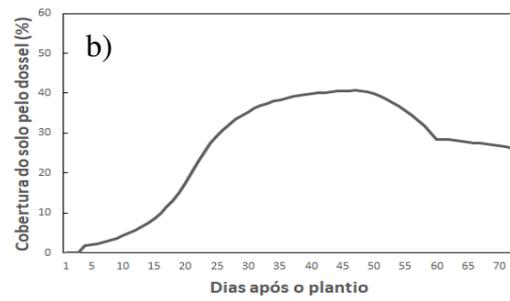
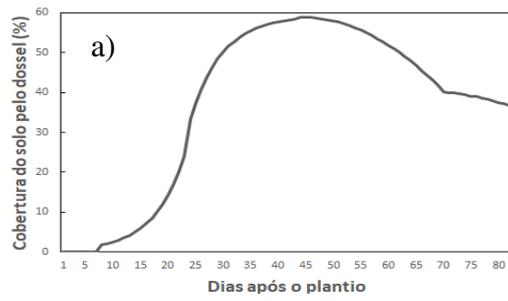


Figura 17. Resultados gerados pelo modelo AquaCrop após a calibração local do 1º experimento de cultivo para: a) cobertura do solo pelo dossel (%); c) profundidade da raiz (m); e) biomassa total produzida (ton/ha); g) produtividade simulada (ton/ha); i) processo de formação do índice de colheita (%) e k) produtividade em função da demanda de água evapotranspirada pela cultura (kg/m³). Resultados gerados pelo modelo AquaCrop após a calibração local do 2º experimento de cultivo para: b) cobertura do solo pelo dossel (%); d) profundidade da raiz (m); f) biomassa total produzida (ton/ha); h) produtividade simulada (ton/ha); j) processo de formação do índice de colheita (%) e l) produtividade em função da demanda de água evapotranspirada pela cultura (kg/m³).

Observa-se que no primeiro experimento a cobertura máxima do dossel foi atingida em torno do DAP 46 (Figura 17a), apresentando um decréscimo após esta DAPa; a profundidade efetiva máxima da raiz foi atingida em torno do 38 DAP (Figura 17c); a biomassa total produzida foi superior a 3,6 ton/ha, iniciando sua formação a partir do DAP 22 (Figura 17e); a produtividade da cultura foi superior a 2,6 ton/ha, iniciando sua formação a partir do DAP 57 (Figura 17g); o índice de colheita teve início a partir do DAP 53 (Figura 17i); e a produtividade em função da demanda de água evapotranspirada pela cultura apresentou valor de 1,27 kg/m³, também iniciando a partir do 53 DAP (Figura 17k).

No segundo experimento a cobertura máxima do dossel foi atingida em torno do DAP 49 (Figura 17b), também apresentando um decréscimo após isso; a profundidade efetiva máxima da raiz foi atingida em torno do 33 DAP (Figura 17d); a biomassa total produzida foi superior a 2,4 ton/ha, iniciando sua formação a partir do DAP 16 (Figura 17f); a produtividade da cultura foi 0,6 ton/ha, iniciando sua formação a partir do DAP 52 (Figura 17h); o índice de colheita teve início a partir do DAP 49 (Figura 17j); e a produtividade em função da demanda de água evapotranspirada pela cultura apresentou valor de 0,24 kg/m³ (Figura 17l), comprovando a precocidade desta variedade e sua evidente dependência das condições climáticas da região para um bom desenvolvimento.

5.7.1. Validação do AquaCrop

A validação do modelo AquaCrop foi realizada através da comparação entre os valores observados em condições de campo com os simulados pelo modelo para a cultura. A Figura 19 exibe a comparação dos resultados finais encontrados para os tratamentos de 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura, com os valores simulados para as mesmas reposições.

Foram comparadas a biomassa total (ton/ha) e produtividade da cultura (ton/ha), conforme os resultados encontram-se na Figura 19. Verifica-se que o ajuste apresentou um comportamento muito bom para todos os tratamentos, em ambos os experimentos, para a biomassa total (ton/ha) (Figuras 19a e 19c). Quanto a produtividade, o modelo apresentou variações que indicam uma má estimativa nos tratamentos de 40% no 1º experimento e de 60% no 2º experimento (Figuras 19b e 19d).

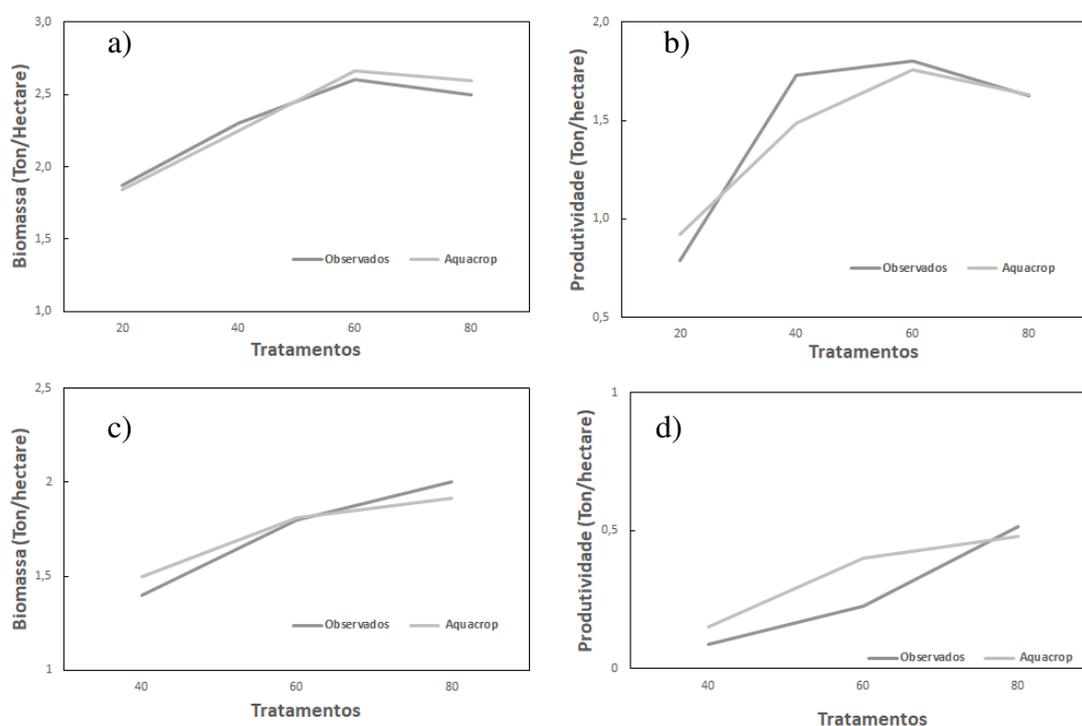


Figura 18. Comparação dos valores observados em condições de campo com os simulados pelo modelo AquaCrop no processo de validação para os tratamentos de 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura: a) comportamento das biomassas totais (ton/ha) observada e simulada para os tratamentos durante o 1º experimento; b) comportamento das produtividades (ton/ha) observada e simulada para os tratamentos durante o 1º experimento; c) comportamento das biomassas totais (ton/ha) observada e simulada para os tratamentos durante o 2º experimento e d) comportamento das produtividades (ton/ha) observada e simulada para os tratamentos durante o 2º experimento.

Na Tabela 12 encontram-se os valores de biomassa e produtividade observados e simulados pelo modelo, onde se pode perceber a grande capacidade do modelo em simular condições de campo. A biomassa total apresentou mínimas diferenças, enquanto que a produtividade apresentou uma maior diferença no segundo experimento e no tratamento de 20% do primeiro experimento. Assim, foi considerado um bom ajuste para a validação do feijoeiro cultivado sob irrigação em condições climáticas semiáridas.

As estatísticas utilizadas na validação do modelo AquaCrop para biomassa total e produtividade do feijoeiro durante o 1º experimento e 2º experimento são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 11 Comparação entre os valores observados e simulados pelo AquaCrop para os tratamentos de 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura.

| Primeiro Experimento | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|----------|------------------------------------|----------|
| Tratamento (%) | Biomassa total (Ton/Hectare) | | Produtividade (Ton/hectare) | |
| | Observado | Simulado | Observado | Simulado |
| 80 | 2,500 | 2,593 | 1,626 | 1,633 |
| 60 | 2,598 | 2,661 | 1,805 | 1,756 |
| 40 | 2,291 | 2,251 | 1,739 | 1,486 |
| 20 | 1,874 | 1,842 | 0,789 | 0,921 |

| Segundo Experimento | | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|----------|------------------------------------|----------|
| | Biomassa total (Ton/Hectare) | | Produtividade (Ton/hectare) | |
| | Observado | Simulado | Observado | Simulado |
| 80 | 1,968 | 1,916 | 0,513 | 0,479 |
| 60 | 1,813 | 1,812 | 0,226 | 0,399 |
| 40 | 1,424 | 1,496 | 0,089 | 0,150 |

Tabela 12. Estatísticas utilizadas na validação do modelo AquaCrop para biomassa total (ton/ha) e produtividade (ton/ha) do feijão. 1º experimento / 2º experimento.

| Indicadores | Biomassa Total | Produtividade |
|--------------------|-----------------------|----------------------|
| Pe | 3,372 / 2,642 | 2,254 / 3,369 |
| E | 0,978 / 0,942 | 0,889 / 0,900 |
| NRMSE (%) | 3,654 / 4,459 | 5,568 / 6,981 |
| MAE | 0,232 / 0,651 | 0,301 / 0,468 |
| d | 0,991 / 0,985 | 0,954 / 0,912 |

De acordo com os cálculos, o erro de previsão (Pe) é considerado bom tanto para a biomassa quanto para a produtividade do feijão, pois ambos os resultados se aproximaram de zero.

O índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (E) também foi considerado satisfatório para a biomassa e a produtividade, principalmente para a biomassa. Já o

índice de Willmont (d) resultou em valores próximos de 1, considerado também uma ótima relação de ajuste dos dados simulados e observados nesta pesquisa.

A raiz do erro quadrado médio normalizado (NRMSE-%) apresentou valor menor do que 10%, sendo considerado excelente. Finalmente, o erro médio absoluto (MAE) foi considerado também excelente tanto para a biomassa quanto para a produtividade, pois os mesmos se aproximaram de zero, o que indica desempenho positivo do modelo. Tudo isso comprova a grande eficiência do modelo AquaCrop em prever o rendimento do feijoeiro cultivado nas condições climáticas do semiárido brasileiro.

6 CONCLUSÕES

- a) A lâmina recomendada para obtenção de maior produtividade da cultura do feijão na região de estudo é de 100% da necessidade hídrica. Por outro lado, a lâmina de 20% de reposição, durante o período seco da região, não é suficiente para a sobrevivência da cultura nas condições climáticas do semiárido brasileiro;
- b) Os valores do coeficiente da cultura (K_c) obtidos para o feijoeiro foram 0,85; 1,1; 1,2 e 1,0 para os estágios inicial, crescimento, reprodutivo e final, respectivamente;
- c) As variáveis fenométricas do feijoeiro apresentaram diferenças significativas para as reposições de água de 100, 80, 60, 40 e 20% da necessidade hídrica da cultura nos dois experimentos realizados;
- d) A calibração e validação do modelo AquaCrop para o feijoeiro determinou parâmetros e resultados excelentes que poderão ser utilizados no modelo em futuras simulações de biomassa total e produtividade para as regiões com condições climáticas similares ao semiárido brasileiro.

7 REFERÊNCIAS

- AHMED, F. E.; HALL, A. E.; MADORE, M. A. Interactive effects of high temperature and elevated carbon dioxide concentration on cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]. **Plant, Cell & Environment**, v. 16, n. 7, p. 835-842, 1993.
- ALLEN, Richard G. et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- AMARO, Geovani B. et al. Recomendações técnicas para o cultivo de hortaliças em agricultura familiar. **Embrapa Hortaliças-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2007.
- AMIRI, E. Calibration and testing of the aquacrop model for rice under water and nitrogen management. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 47, 387–403, 2016
- AMIRI, E., Araj, H.A., Wayayok, A., Mojtaba, R. Simulation of Rice Yield Under Water and Salinity Stress in Rasht Area Using Aquacrop Model, vol. 76, 2015.
- ANDRADE JÚNIOR, Aderson et al. Zoneamento de risco climático para a cultura do feijão-caupi no Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 1, 2007.
- ASSAD, Eduardo Delgado. **Eficiência do uso da água no Brasil: análise do impacto da irrigação na agricultura brasileira e potencial de produção de alimentos face ao aquecimento global (relatório completo)**. 2016.
- BASTOS, Edson Alves et al. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do feijão-caupi no Vale do Guruguéia, Piauí. **Irriga**, v. 13, n. 2, p. 182-190, 2018.
- CABRAL JÚNIOR, J. B.; Almeida, H. A. de; Silva, C. M. S. e. Análise Comparativa da Temperatura do Ar em Campina Grande, PB, Obtida Pelo Método Dos Extremos e Pelo Padrão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 888-902, 2013.
- CARLESSO, Reimar et al. Efeito da lâmina de irrigação na senescência foliar do feijoeiro. **Irriga**, v. 12, n. 04, p. 545-556, 2007.
- CARNEIRO, J. E. S.; PAULA JÚNIOR, TJ de; BORÉM, A. Feijão: do plantio à colheita. **Viçosa: Ed. UFV**, 2015.
- CARVALHO, M.; LINO-NETO, T.; ROSA, E; CARNIDE, V. Cowpea: a legume crop for a challenging environment. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. v. 97, p. 4273–4284. 2017. doi10.1002/jsfa.8250
- CINTRA, Fernando Luis Dultra; LIBARDI, Paulo Leonel; SAAD, Antonio Melhem. Balanço hídrico no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro

- costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 23-28, 2000.
- CHANG, J. **Climate and agriculture**. Aldine Publishing Company. 2 ed. Chicago, 1971. 296 p.
- CRUZ, F. J. R.; ALMEIDA, H. J.; SANTOS, D. M. M. Growth, nutritional status and nitrogen metabolism in *Vigna unguiculata* (L.) Walp is affected by aluminium. **Australian Journal of Crop Science**, 8(7), 1132-1139. 2014
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. UFPB, 306p. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33. 1994.
- EHLERS, J. D.; HALL, A. E. Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.). **Field crops research**, v. 53, n. 1-3, p. 187-204, 1997.
- FARAHANI, Hamid J.; IZZI, Gabriella; OWEIS, Theib Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. **Agronomy journal**, v. 101, n. 3, p. 469-476, 2009.
- FERNANDES, Edemo João; TURCO, José Eduardo Pitelli. Evapotranspiração de referência para manejo da irrigação em cultura de soja. **Irriga**, v. 8, n. 2, p. 132-141, 2018.
- FERREIRA, Alcileide Moura Muniz; BERNARDO, Alynne Pontes; BEZERRA, Ivanhoé Soares. Avaliação das medidas de requalificação ambiental do açude de Bodocongó em Campina Grande/PB. **Revista Ambiental**, v. 1, n. 3, p. 46-55, 2016.
- FREIRE FILHO, Francisco Rodrigues. Feijão-caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios. **Embrapa Meio-Norte-Livro científico (ALICE)**, 2011.
- FREITAS, Joherlan Campos de et al. Calibração do modelo aquacrop e necessidades hídricas da cultura do tomateiro cultivada em condições tropicais. 2018.
- GEERTS, Sam; RAES, Dirk. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural water management**, v. 96, n. 9, p. 1275-1284, 2009.
- HSIAO, Theodore C. et al. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 448-459, 2009.
- JIN, Xiu-liang et al. Assessment of the AquaCrop model for use in simulation of irrigated winter wheat canopy cover, biomass, and grain yield in the North China Plain. **PLoS one**, v. 9, n. 1, p. e86938, 2014.

- KATERJI, Nader; CAMPI, Pasquale; MASTRORILLI, Marcello. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. **Agricultural Water Management**, v. 130, p. 14-26, 2013.
- LIBARDI, Paulo Leonel. **Dinâmica da Água no Solo Vol. 61**. Edusp, 2005.
- LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, Raquel Scalia Alves; CHRISTOFIDIS, Demetrios. O uso da irrigação no Brasil. **O estado das águas no Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica. CD-ROM**, 1999.
- LIMA, José R. de S. et al. Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 1, n. 1, p. 89-95, 2006.
- LIN, L., Zhang, B., Xiong, L.H., 2012. Evaluating yield response of paddy rice to irrigation and soil management with application of the aquacrop model. *Trans. ASABE* 55 (3), 839–848.
- MEDEIROS, Gerson Araujo; ARRUDA, Flavio Bussmeyer; SAKAI, Emílio. Relações entre o coeficiente de cultura e cobertura vegetal do feijoeiro: erros envolvidos e análises para diferentes intervalos de tempo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 26, n. 4, p. 513-519, 2004.
- MONTEITH, John L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 5, p. 695-697, 1996.
- NIELSEN, S. S.; OHLER, T. A.; MITCHELL, C. A. Cowpea leaves for human consumption: production, utilization, and nutrient composition. **Advances in cowpea research**, p. 326-332, 1997.
- OLIVEIRA, Sandra Maria Sousa de. Determinação da acurácia de instrumentos de medidas para obter a evapotranspiração de referência com erros fixados. 2011.
- OLIVEIRA, André Bezerra. Consumo hídrico e calibração/validação do modelo AquaCrop para a cultura do coentro submetido à irrigação localizada / André Bezerra Oliveira. - Campina Grande, 2018.
- OGUNTUNDE, Philip Gbenro. **Evapotranspiration and complementarity relations in the water balance of the Volta Basin: Field measurements and GIS-based regional estimates**. Cuvillier, 2004.
- PENMAN, Howard Latimer. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proc. R. Soc. Lond. A**, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948.

- PEREIRA, Leandro Barradas et al. Manejo da adubação na cultura do feijão em sistema de produção orgânico. *Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)*, 2015.
- RAES, Dirk et al. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. ***Agronomy Journal***, v. 101, n. 3, p. 438-447, 2009.
- SAMMIS, T.W., MAPEL, C.L.; LUGG, D.G. et al. Evapotranspiration crop coefficients predicted using growing-degree-days. New Mexico, State Univ., Las Cruces, 1985. p. 73-780, 1985.
- SEBETHA, E. T; MODI, A. T; OWOEYE, L. G. J. Cowpea crude protein as affected by cropping system, site and nitrogen fertilization. ***Journal of Agricultural Science***; v. 7, n. 1. p. 224-234. 2015
- SEDIYAMA, C. G.; RIBEIRO, A.; LEAL, B. G. Relações clima-água-plantas. In: ***Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola***. 1998. p. 46-85.
- SEDIYAMA, G.C. ***Necessidade de água para os cultivos***. Brasília, ABEAS, 1987. 134 p.
- SILVA, Cláudio Ricardo et al. Variação sazonal na evapotranspiração de plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’. ***Irriga***, v. 11, n. 1, p. 26-35, 2018.
- SILVA, Valdiney José et al. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária em Uberlândia, MG. ***Bioscience Journal***, v. 27, n. 1, 2011.
- STEDUTO, Pasquale et al. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. ***Agronomy Journal***, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009.
- TEIXEIRA, AH de C. et al. Consumo hídrico e coeficiente de cultura da videira na região de Petrolina, PE. ***Embrapa Semiárido-Artigo em periódico indexado (ALICE)***, 1999.
- TEIXEIRA, Ney Jefferson Pereira et al. Produção, componentes de produção e suas inter-relações em genótipos de feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] de porte ereto. *Ceres*, v. 54, n. 314, 2015.
- TODOROVIC, Mladen et al. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. ***Agronomy Journal***, v. 101, n. 3, p. 509-521, 2009.

- VANUYTRECHT, Eline et al. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 351-360, 2014.
- WHISLER, F. D. et al. Crop simulation models in agronomic systems. **Adv. Agron**, v. 40, n. 1, p. 41-208, 1986.
- ZHANG, Lu; WALKER, Glen Russell; DAWES, Warrick. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. 1999.
- ZHANG, Lu; DAWES, W. R.; WALKER, G. R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. **Water resources research**, v. 37, n. 3, p. 701-708, 2001.
- ZIMMERMANN, M. J.; ROCHA, M.; YOLANDA, T. Bean Crop: Factors Affecting Productivity. **Brazilian Association for the Presence of Potash and Phosphate, Piracicaba, Brazil**, p. 317-3, 1988.