



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS -UFAL
CAMPUS DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CECA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA



JOSÉ WANDERSON SILVA DOS SANTOS

**CALIBRAÇÃO DO AQUACROP E AVALIAÇÃO DE ÉPOCAS DE SEMEADURA
DE CULTIVARES DE SOJA PARA OS TABULEIROS COSTEIROS DE ALAGOAS**

Rio Largo, AL
2023

JOSÉ WANDERSON SILVA DOS SANTOS

**CALIBRAÇÃO DO AQUACROP E AVALIAÇÃO DE ÉPOCAS DE SEMEADURA
DE CULTIVARES DE SOJA PARA OS TABULEIROS COSTEIROS DE ALAGOAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Alexsandro Claudio dos Santos Almeida

Coorientador: Prof. Dr. Adolpho Emanuel Quintela da Rocha

Rio Largo, AL
2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

S237c Santos, José Wanderson Silva dos.

Calibração do aquacrop e avaliação de épocas de semeadura de cultivares de soja para os tabuleiros costeiros de Alagoas. / José Wanderson Silva dos Santos. – 2023.

73f.: il.

Orientador: Alexsandro Claudio dos Santos Almeida.

Coorientador: Adolpho Emanuel Quintela da Rocha

Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Programa de Pós - Graduação em Agronomia, Área de concentração em Produção Vegetal, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2023.

Inclui bibliografia

1. Modelagem agrometeorológica. 2. Sojicultura. 3. Planejamento agrícola. I. Título.

CDU: 633.34

TERMO DE APROVAÇÃO

JOSÉ WANDERSON SILVA DOS SANTOS
(Matrícula 2022101738)

“CALIBRAÇÃO DO AQUACROP E AVALIAÇÃO DE ÉPOCAS DE SEMEADURA DE CULTIVARES DE SOJA PARA OS TABULEIROS COSTEIROS DE ALAGOAS”

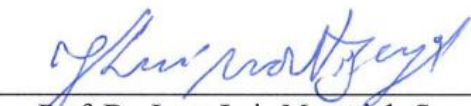
Dissertação apresentada e avaliada pela banca examinadora em 28 de fevereiro de 2023, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração em Irrigação e Drenagem do Programa de Pós-Graduação em Agronomia “Produção Vegetal” do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS.

Documento assinado digitalmente
 ALEXSANDRO CLAUDIO DOS SANTOS ALME
Data: 02/03/2023 13:52:39-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

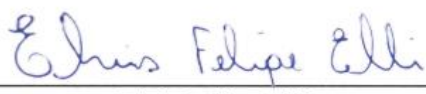
Prof. Dr. Alexsandro Claudio dos Santos Almeida
Presidente

Documento assinado digitalmente
 IVOMBERG DOURADO MAGALHAES
Data: 02/03/2023 14:36:41-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Dr. Ivomberg Dourado Magalhães
UFAL



Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza
UFPR



Elvis Felipe Elli
Iowa State University

DEDICATÓRIA

A Deus, que me presenteia todos os dias com a energia da vida, que me dá forças e coragem para atingir os meus objetivos;

Aos meus amados pais, José Alves dos Santos e Maria Josefa Silva dos Santos, exemplos de honestidade e humildade, pelo apoio em todo meu processo de formação e toda educação com carinho e paciência.

Ao meu irmão José Tarciso, Tatiana e Tatielle, pelo apoio e companheirismo.

A todos que contribuíram com minha formação, amigos, colegas e orientadores.

AGRADECIMENTO

Aos meus pais e irmãos, por todo amor e carinho durante minha trajetória de vida e educação;

Aos meus orientadores, professor Dr. Alessandro Claudio dos Santos Almeida e Prof. Dr. Adolpho Emanuel Quintela da Rocha, por todos os ensinamentos, conselhos, confiança e amizade durante a pós-graduação;

Aos membros da banca pelas sugestões e correções para enriquecimento deste trabalho;

Aos amigos em especial pela ajuda e tempo dedicado para a elaboração dessa dissertação: Iêdo Peroba, Julianna Catonio, Naely de Lima, Tiago Amaral, Larisse Araújo, Analy de Lima e José Tarciso.

Aos amigos de laboratório: Constantino Cavalcante, Manoel Alpiano, Jair Quintela, Marcos Antonio, Rilbson Santos, Saniel Carlos, Thiago Cirilo, Wemerson Saulo, Jonathan Tenório, José Antonio, Jailton Aciole, Marcelo Tertuliano, Danilo Santos, Laysa Ramalho, Marcos Feitosa, Artur Santos pela boa convivência, ajuda e amizade;

Aos professores do LIA: Iêdo Teodoro, Guilherme Lyra, Marcos Alex, Gustavo Lyra, Ivomberg Magalhaes, Ricardo Araújo pelas orientações e incentivos;

Ao professor Dr. Mauro Wagner de Oliveira, pela amizade e ensinamentos compartilhados;

A todos os Professores da Pós-Graduação do CECA/UFAL que contribuíram com seus conhecimentos;

Ao secretário do PPGA, Gustavo Nepomuceno, por toda competência e disponibilidade em ajudar;

A todos servidores do Campus de Engenharia e Ciências Agrárias – CECA, agradeço a prestabilidade e disponibilidade da estrutura física do Campus;

A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho e acreditaram no meu empenho.

MUITO OBRIGADO!

EPÍGRAFE

“Querer ser bem-sucedido sem trabalhar duro é como querer colher sem plantar”.

(David Bly)

CALIBRAÇÃO DO AQUACROP E AVALIAÇÃO DE ÉPOCAS DE SEMEADURA DE CULTIVARES DE SOJA PARA OS TABULEIROS COSTEIROS DE ALAGOAS

RESUMO

O cultivo de grãos nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas se expande em áreas anteriormente cultivadas com cana-de-açúcar. O cultivo da soja é recente nessa região, com isso, informações e tecnologias para o seu cultivo sustentável são escassas. Desta forma, o teve-se por objetivo no presente trabalho definir as melhores épocas de semeadura para cultivares de soja nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. Para tanto, utilizou-se o modelo AquaCrop para simular o crescimento e o rendimento da cultura em doze épocas de semeio, sendo oito épocas (abril a julho) compreendidas no período recomendado no zoneamento climático e duas fora do período recomendado. Para realizar as simulações, o modelo foi calibrado com dados experimentais de dois experimentos conduzidos na região. Os dados meteorológicos utilizados nas simulações foram de uma normal climatológica de quarenta e nove anos (1973-2022), provenientes de uma estação meteorológicas automática. A precipitação média anual (considerando os 49 anos de dados diários) foi 1.756,24 mm, em que as precipitações do período de semeio simulado (de março a agosto) representam 76,94% do total (1.351,32 mm). A precipitação média quinzenal foi de 73 mm, próximo dos valores de evapotranspiração de referência de 60 mm. As variações térmicas entre 20 e 30 °C durante os ciclos simulados foram favoráveis para o crescimento e desenvolvimento da cultura da soja. A eficiência da modelagem, erro médio, raiz quadrada média do erro e raiz quadrada média do erro normalizado indicaram que o modelo, devidamente parametrizado, apresenta desempenho satisfatório. As datas de semeadura afetaram a produtividade das cultivares. As maiores produtividades simuladas são alcançadas quando a semeadura ocorre entre 16 de abril a 1 de julho. Deve-se evitar a semeadura antecipada para março e a atrasada após 16 de julho.

Palavras-chave: modelagem agrometeorológica, sojicultura, planejamento agrícola.

AQUACROP CALIBRATION AND EVALUATION OF SEEDING TIMES OF SOYBEAN CULTIVARS FOR THE COASTAL PLAYERS OF ALAGOAS

ABSTRACT

The cultivation of grains in the Coastal Tablelands of Alagoas expands in areas formerly cultivated with sugarcane. The cultivation of soy is recent in this region, therefore, information and technologies for its sustainable cultivation are scarce. In this way, the objective of this work was to define the best sowing times for soybean cultivars in the Coastal Tablelands of Alagoas. For this purpose, the AquaCrop model was used to simulate the growth and yield of the crop in twelve sowing periods, eight of which (April to July) included in the period recommended in the climatic zoning and two outside the recommended period. To perform the simulations, the model was calibrated with experimental data from two experiments conducted in the region. The meteorological data used in the simulations were from a climatological normal of forty-six years (1973-2018), obtained from an automatic weather station. The average annual precipitation (considering the 46 years of daily data) was 1.600 mm, in which the precipitations of the simulated sowing period (from March to August) represent 77% of the total (1.236 mm). The average fortnightly precipitation was 66 mm, close to the reference evapotranspiration values of 62 mm. The thermal variations between 20 and 30 °C during the simulated cycles were favorable for the growth and development of the soybean crop. The modeling efficiency, mean error, mean square root of the error and mean square root of the normalized error indicated that the model, duly parameterized, presents satisfactory performance. The sowing dates affected the productivity of the cultivars. The highest simulated yields are achieved when sowing occurs between April 16 and July 1. Early sowing before March and delayed sowing after July 16 should be avoided.

Keywords: agrometeorological modeling, soy culture, agricultural planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição dos grupos de maturidade relativa de cultivares de soja no Brasil, baseando-se na latitude.....	19
Figura 2. Esquema do fluxo de funcionamento do AquaCrop, as setas pontilhadas indicam os processos afetados pelo estresse hídrico.....	26
Figura 3. Representação esquemática do desenvolvimento do dossel durante o crescimento exponencial e as fases de decaimento exponencial. CCo e CCx são a cobertura do dossel inicial e máxima, respectivamente.....	27
Figura 4. Variação da cobertura verde do dossel completamente em um ciclo da cultura sob condições não estressantes. CCo e CCx são a cobertura inicial e máxima, respectivamente. .	28
Figura 5. Representação esquemática do enraizamento profundo ao longo do tempo.	29
Figura 6. Localização da área experimental no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (CECA/UFAL), em Rio Largo, Tabuleiros Costeiros, no estado de Alagoas.	33
Figura 7. Variação nos dados meteorológicos diários para dias após a semeadura (DAS).....	35
Figura 8. Curva de cobertura do dossel (CC) simulada e observado (as barras de erro referem-se ao desvio padrão das observações da CC) para diferentes cultivares de soja, em condição de sequeiro.....	45
Figura 9. Água total disponível no solo (SWC, mm). A linha sólida verde corresponde ao SWC na capacidade de campo até a zona radicular (TAW, mm), e a linha tracejada vermelha corresponde à água prontamente disponível (RAW, mm).	47
Figura 10. Biomassa acumulada simulada e observado (as barras de erro referem-se ao desvio padrão das observações em campo) para diferentes cultivares de soja, em condição de sequeiro, no ano de 2019.....	50
Figura 11. Médias da evapotranspiração de referência (ET_0), precipitação (P), temperatura do ar mínima (T_n) e máxima (T_x), para a normal meteorológica de quarenta e seis anos (1973 a 2018), em Rio Largo, AL.	54
Figura 12. Variabilidade interanual do rendimento de grãos em diferentes épocas de semeadura para cultivares de soja, simulados em 49 anos (1973 - 2022), nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. As barras de erros apresentam a variação do conjunto de dados para cada data de semeadura. Letras e cores diferentes para mesma cultivar representam estatisticamente diferença significativa (Tukey, $P < 0,05$).	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos físico-hídricos do solo da área experimental do CECA/UFAL, em Rio Largo, Tabuleiros Costeiros, no estado de Alagoas.	33
Tabela 2. Datas de semeadura e colheitas das cultivares de soja.	34
Tabela 3. Datas dos estágios de desenvolvimento da cultura da soja e graus-dia de crescimento cumulativos (GDD).	36
Tabela 4. Épocas de semeadura e datas de semeio para a cultura da soja, utilizadas nas simulações.	43
Tabela 5. Indicadores estatísticos (eficiência da modelagem - EF, erro médio - E, raiz quadrada média do erro - RMSE e raiz quadrada média do erro normalizado - NRMSE) obtidos da associação entre respectivos valores estimados (com parâmetros calibrados e não calibrados) e observados da cobertura do dossel, para as cultivares de soja analisados.....	45
Tabela 6. Indicadores estatísticos (eficiência da modelagem - EF, erro médio - E, raiz quadrada média do erro - RMSE e raiz quadrada média do erro normalizado - NRMSE) relativos à água no solo, observada e estimada com os parâmetros não calibrados e calibrados.....	47
Tabela 7. Evapotranspiração da cultura total para os anos estudados com valores observados e simulados (não calibrado e calibrado).	49
Tabela 8. Indicadores estatísticos (eficiência da modelagem - EF, erro médio - E, raiz quadrada média do erro - RMSE e raiz quadrada média do erro normalizado - NRMSE) relativos à curva de biomassa ao longo do ciclo observada e estimadas com parâmetros não calibrados e calibrados.....	51
Tabela 9. Diferença absoluta e relativo entre o rendimento de grãos observado para os anos analisados com valores observados e simulados (Não calibrado e calibrado).	52
Tabela 10. Diferença absoluta e relativo entre a Biomassa final para cultivares estudadas com valores observados e simulados (Não calibrado e calibrado).....	53
Tabela 11. Percentual de redução na produtividade de grãos nas épocas de semeadura de soja, no período entre 1973 - 2018 (46 anos), nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF – Área foliar;
AL – Alagoas;
B – Biomassa;
CC – Cobertura do dossel;
CC₀ – Cobertura do solo pelo dossel com 90% de emergência;
CC_x – Cobertura máxima do dossel;
CDC – Coeficiente de declínio do dossel;
CECA – *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias;
CGC – Coeficiente de crescimento do dossel;
CO₂ – Dióxido de carbono;
DAS – Dias após a semeadura;
E – Erro médio;
EF – Eficiência da modelagem;
ENOS – El Niño oscilação sul;
E_s – Evaporação do solo;
ET₀ – Evapotranspiração de referência;
ET_c – Evapotranspiração da cultura;
FC – Capacidade de Campo;
GDD – Graus-dia;
HI – Índice de colheita;
IAF – Índice de área foliar;
k – Coeficiente de extinção luminosa (k) ;
K_c – Coeficiente da cultura;
K_cT_r – coeficiente de transpiração;
K_cT_r – Coeficiente de transpiração;
K_cT_{rx} – Coeficiente de transpiração máxima da cultura;
K_{ex} – Coeficiente máximo de evaporação do solo;
K_r – Coeficiente de redução da evaporação;
LIA – Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia;
NRMSE – Raiz quadrada do erro médio normalizada;
ō – Média dos valores observados;
Oi – Valor observado;

PMP – Ponto de murcha permanente;
RAW – Água prontamente disponível;
Rg – Irradiância solar global;
RMSE – Raiz quadrada do erro médio;
SAT – Conteúdo de Água na Saturação;
Si – Valor simulado;
SWC – Conteúdo de água no solo;
TAW – Capacidade de campo na zona radicular;
T_n – Temperatura mínima do ar;
T_r – Transpiração da cultura;
T_x – Temperatura máxima do ar;
u – Velocidade do vento;
UFAL – Universidade Federal de Alagoas;
UR – Umidade relativa do ar;
VIB – Velocidade de infiltração básica de água;
WP – Produtividade de água;
WP* – Produtividade de água normalizada;
Y – Rendimentos de grãos;
Z – Profundidade efetiva do sistema radicular;
Z_x – Profundidade máxima efetiva de enraizamento;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO	15
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1. CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DA REGIÃO DO SEALBA	16
2.2. SISTEMAS ATMOSFERICOS QUE INFLUECIAM AS CHUVAS REGIONAIS	16
2.3. DEMANDA HÍDRICA, EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS	19
2.4. MODELO AQUACROP.....	20
2.4.1. DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO AQUACROP	22
2.5. ÉPOCAS DE SEMEADURA	30
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1. EXPERIMENTOS DE CAMPO	32
3.1.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	32
3.1.2 ARRANJO EXPERIMENTAL	33
3.1.2. MEDIDAS	34
3.2. SIMULAÇÕES DAS PRODUTIVIDADES DA SOJA NAS ÉPOCAS DE CULTIVO	37
3.2.1. PARAMETRIZAÇÃO DO AQUACROP VERSÃO 6.1	37
3.2.3. CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO AQUACROP	41
3.2.4 SIMULAÇÕES DAS PRODUTIVIDADES DAS CULTIVARES PARA AS ÉPOCAS DE SEMEADURA	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. PARAMETRIZAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	44
4.2.1 COBERTURA DO DOSSEL	44
4.1.2. ÁGUA NO SOLO.....	46
4.1.3. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA	48
4.1.4. BIOMASSA ACUMULATIVA NO CICLO	50
4.1.5 RENDIMENTO DE GRÃOS E BIOMASSA NA COLHEITA	51
4.2. SIMULAÇÕES DAS PRODUTIVIDADES NAS ÉPOCAS DE SEMEADURA	53
5. CONCLUSÃO.....	58
RECOMENDAÇÕES FUTURAS.....	59
REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

O acelerado crescimento populacional implica em maior demanda de alimentos. Desta forma, o setor agrícola e os órgãos governamentais devem atuar para aumentar a oferta de alimentos e suprir a necessidade da população (FAO, 2017). No entanto, as limitações de expansão de área de cultivo e as consequências do aquecimento global tornam imprescindível o desenvolvimento de tecnologias e estratégias que possibilitem o incremento de produtividade em regiões com limitações para abertura de novas áreas agrícolas e irregularidade na precipitação (RAY et al., 2019).

A avanço da agricultura no estado de Alagoas depende fortemente da adoção de tecnologias para garantir a produção de alimentos, uma vez que a região não dispõe de terras para expansão. Na última década, tem-se fomentado o cultivo de grãos na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, sobretudo, em áreas anteriormente cultivadas com cana-de-açúcar. A região apresenta potencialidade para a produção de grãos devido às suas condições edafoclimáticas (SILVA et al., 2015; COSTA et al., 2018). No entanto, a irregularidade na distribuição espacial e temporal da chuva é uma das características marcantes da região, e pode provocar perdas de produtividade (PEREIRA et al., 2017; SILVA et al., 2017).

A soja é uma das culturas em expansão nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. Todavia, embora a cultura da soja tenha ampla adaptação aos mais diversos ambientes (HACKENHAAR et al., 2019), informações e tecnologias para o seu cultivo nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas ainda são escassas, sendo necessário avaliar as respostas da cultura à variabilidade da precipitação da região e definir as melhores épocas de semeadura. A escolha da época de semeio adequada é uma das etapas mais críticas do cultivo da soja (DIAS et al. 2020; NOIA JUNIOR et al, 2020), pois, pode atenuar ou acentuar a exposição de cultivos à variação das condições ambientais. O semeio fora da janela de plantio indicada pode afetar o crescimento, o ciclo e o rendimento da cultura (MORAES et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2018). Assim, a definição de épocas de semeadura com menor probabilidade de restrição hídrica nas fases mais sensíveis minimiza perdas de produtividade (CARNEIRO et al., 2017; DE OLIVEIRA et al., 2021).

Para minimizar perdas de produtividade deve-se definir as épocas de semeadura com menor probabilidade de restrições hídricas nas fases mais sensíveis, principalmente para o incipiente cultivo da soja. Mesmo a soja (*Glycine max* (L.) Merr.) sendo considerada uma cultura de clima tropical com ampla adaptação aos mais diversos ambientes, é fundamental conhecer os principais fatores da região que influenciam a cultura com vista a obtenção de altas produtividades (LECERF et al., 2019).

O período de cultivo da soja ocorre entre os meses de setembro a março na maioria das regiões brasileiras. Vários estudos indicam que o rendimento da cultura pode sofrer perdas de até 50% quando as semeaduras são realizadas tardiamente (FERREIRA et al., 2015; DE OLIVEIRA et al., 2021; NOIA JUNIOR et al., 2020). Nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, o período de cultivo ocorre entre os meses de abril e julho, que coincide com a estação chuvosa da região. O zoneamento climático da soja em Alagoas foi realizado baseando-se na análise da disponibilidade hídrica calculada por balanços hídricos climatológicos. No entanto, é imprescindível a análise de épocas de semeadura levando em consideração as repostas produtivas dos cultivos em diferentes condições.

Nesse contexto, os modelos agrometeorológicos baseados em processos calibrados/validados localmente são úteis para gerar informações de respostas produtivas das culturas em diferentes cenários climáticos (HE et al., 2017). O modelo agrometeorológico AquaCrop é uma ferramenta com potencial para auxiliar na definição das épocas de semeadura da soja em Alagoas, pois permite simulações eficazes com menor requerimento de dados de entrada. O AquaCrop é caracterizado pela simplicidade, precisão e robustez, e dá atenção especial aos processos fundamentais envolvidos na produtividade das culturas baseando-se na perspectiva fisiológica e agrônômica (HSIAO et al., 2009). Além disso, o AquaCrop apresenta facilidade para calibração em comparação com outros modelos (MABHAUDHI et al., 2014; SOLTANI ET AL et al., 2016; TAHERI ET et al., 2018).

O modelo AquaCrop foi utilizado em simulações de diferentes culturas no Brasil e apresentou resultados eficientes para soja, cebola, tomate, alface, no qual a calibração e validação proporcionaram resultados satisfatórios para os ciclos avaliados (OLIVEIRA, 2018; FREITAS, 2018; SILVA, 2018; MATSUNAGA, 2019). O modelo também apresentou resultados satisfatórios quando utilizado no estado de Alagoas para a cultura do feijão (MAGALHAES et al., 2019). O AquaCrop também foi aplicado com sucesso para avaliar o impacto das datas de semeadura (PAREDES e TORRES, 2016; RAJA et al., 2018; NUNES et al., 2021).

2. OBJETIVO

Definir as melhores épocas de semeadura para cultivares de soja em condição de sequeiro para Alagoas, utilizando o modelo AquaCrop.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Calibrar e avaliar o modelo AquaCrop para cultura da soja nas condições climáticas do estado de Alagoas;
- 2) Identificar as melhores janelas de cultivo e condições de manejo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DA REGIÃO DO SEALBA

O estado de Alagoas, inserido na macrorregião agrícola 5, correspondente ao SEALBA, mais especificamente na região edafoclimática 501. A nova fronteira agrícola apresenta o período chuvoso entre os meses de abril a setembro, com precipitação pluvial entre 450 e 1.400 mm, temperatura do ar entre 22 °C e 29 °C, com diferentes tipos de solos, como Argissolos vermelho amarelo, Cambissolos, Neossolo litólicos, Latossolo amarelo e Espodossolo Ferrocárbico (PROCÓPIO et al., 2018; CONTE et al., 2018).

Em Alagoas, a soja é cultivada predominante no período chuvoso, entre os meses de maio a setembro, janela que permite condições de disponibilidade hídrica (PROCÓPIO et al., 2018). De acordo com Souza et al. (2004), a precipitação média anual na região é de 1.800 mm. No entanto, 70% das chuvas anuais na região dos Tabuleiros Costeiro alagoano, no período de 1972 a 2001, acontecem entre a primeira quinzena de abril e a segunda quinzena de agosto, evidenciando a grande variação interanual das chuvas no estado. Carvalho et al. (2013), entre 1973 a 2008, para a estação chuvosa da mesma região verificaram probabilidade de ocorrência entre 0 a 45% para períodos secos maiores que 7 dias e entre 0 a 5% para 10 dias.

A temperatura do ar é uma condicionante importante para a cultura da soja, por possuir influência nos processos de germinação, da absorção de água e nutrientes, reações químicas, fotossíntese, crescimento, floração, frutificação, tendo participação direta no rendimento final da cultura (SEDIYAMA et al., 2015). A região dos Tabuleiros Costeiros apresenta características para a melhor adaptação da soja, em que as temperaturas oscilem entre 20 e 30 °C.

Além das exigências térmicas, a adaptação das diferentes cultivares de soja depende também da exigência fotoperiódica (FARIAS et al., 2009). O fotoperíodo é entendido como o número de horas de luz por dia, e é o elemento climático com maior importância para se determinar a proporção relativa entre as fases vegetativas e reprodutivas da soja, afetando diretamente o crescimento, número de ramificações, número de vagens por planta, maturação entre outros (SEDIYAMA et al., 2015).

2.2. SISTEMAS ATMOSFERICOS QUE INFLUECIAM AS CHUVAS REGIONAIS

As chuvas no Nordeste brasileiro sofrem alterações da complexa ação de alguns sistemas, como a zona de convergência intertropical, que ocorre em baixos níveis, próximo à superfície,

na região de fronteira entre os hemisférios Sul e Norte. Outro importante sistema são as frentes frias, formadas quando ocorre o encontro entre uma massa de ar fria que fica por baixo de uma massa de ar quente, provocando a subida do ar quente e úmido, o que provoca a formação de nuvens e, conseqüentemente, de chuvas.

As ondas de leste são geradas nas áreas de influência dos ventos alísios e ocorrem em locais próximos a linha do Equador, onde localiza-se a zona de convergência intertropical, deslocando-se de oeste para leste, desde a costa da África em direção ao litoral leste do Brasil. Os sistemas de brisa (marítimas e terrestre) podem ser caracterizadas como ventos que ocorrem próximos a superfície do mar. A brisa marítima acontece no período diurno, porque a terra é aquecida mais rápido do que água, enquanto a brisa terrestre ocorre a noite por causa da maior capacidade da terra de perder calor em comparação com água.

O El Niño – oscilação sul (ENOS) é um dos principais modos de variabilidade climática no nordeste do Brasil e está relacionado à ocorrência de chuvas. O ENOS é um fenômeno de interação entre oceano e atmosfera, que ocorre no Oceano Pacífico Tropical, com anomalias no padrão de pressão atmosférica do norte da Austrália e do Taiti, sendo considerado a principal causa da variabilidade climática em diversas regiões do mundo. O fenômeno ENOS possui a fase quente (El Niño) e fase fria (La Niña). Na fase quente ocorre a elevação da temperatura da superfície do mar, das águas da região oriental do Oceano Pacífico Tropical, acima da média para a região, associado com a ocorrência de pressões atmosféricas abaixo da normal na região do Taiti e acima na região da Austrália. Na fase fria ocorre a tendência das componentes oceânicas e atmosféricas é inversa (FONTANA e BERLATO, 1997).

A ocorrência de eventos de El Niño em Alagoas (Nordeste do Brasil) provoca o aumento significativo na temperatura do ar, provocando a possibilidade de maiores ocorrências de períodos secos. Em contrapartida, os eventos de La Niña ocasionam a diminuição da temperatura do ar, com maiores possibilidades de ocorrência de precipitação. As previsões de ENOS podem auxiliar no planejamento agrícola, sobretudo na escolha das épocas de plantio para aproveitar as janelas climáticas favoráveis. Com isso, são reduzidos os custos com uso de irrigação, manejo do solo e controle de pragas e doenças nas lavouras.

2.3 SELEÇÃO DE CULTIVARES DE SOJA

A soja possui características agrônômicas interessantes, como a capacidade de adaptação a diferentes tipos de solos e climas, e a habilidade em fixar nitrogênio da atmosfera, em simbiose com bactérias. Tais características, tornam a soja opção de rotação com outras

143 culturas que necessitam de altas concentrações de nitrogênio, como o milho, cana-de-açúcar e
144 arroz (BORRMAN et al., 2009). A realização do semeio da mesma cultivar de soja em latitudes
145 diferentes da recomendada, ou em épocas de semeadura distintas nas latitudes recomendadas,
146 pode afetar a planta e modificar seu crescimento e desenvolvimento.

147 A seleção de cultivares de soja é importante para o estabelecimento de cultivos de alto
148 rendimento, visto que o material genético representa até 50% do rendimento potencial da
149 lavoura comercial (SEDIYAMA, 2015). O melhoramento genético possibilitou o cultivo da
150 soja em latitudes menores que 20° e, com isso, avançou em diversas áreas de cultivo no país,
151 chegando a ser cultivada atualmente em latitudes próximas a linha do Equador.

152 Nas últimas décadas ocorreram grandes mudanças nas cultivares de soja no Brasil,
153 destacando-se a introdução da tecnologia transgênica, inicialmente com resistência ao herbicida
154 glifosato e, posteriormente, com resistência à algumas espécies de insetos e outros mecanismos
155 de ação aos herbicidas.

157 2.3.1 HÁBITO DE CRESCIMENTO

159 As cultivares de soja podem apresentar hábitos de crescimento denominados
160 determinado, semideterminado ou indeterminado. A classificação do tipo de crescimento é
161 realizada conforme a presença e a posição da inflorescência racemosa (TIAN et al. 2010).

162 As plantas de crescimento determinado completam seu ciclo vegetativo pouco antes da
163 floração, assim pode-se ter uma colheita mais uniforme em relação à maturidade fisiológica dos
164 grãos.

165 As cultivares de crescimento indeterminado, continuam a desenvolver novas folhas
166 mesmo após a indução floral até que a demanda de fotossintatos pelas sementes em
167 desenvolvimento cause interrupção na produção de matéria seca vegetativa, o que pode
168 dificultar a colheita por consequência da irregularidade das plantas, mas torna-se viável diante
169 de condições climáticas rigorosas, devido à perduração da produção vegetativa nestes tipos de
170 cultivar, o que poderia possibilitar a recuperação da produção (TIAN et al., 2010).

171 Outra característica marcante da maturação, é que as plantas com crescimento
172 indeterminado maturam de baixo para cima, diferentemente das demais, que ocorre de cima
173 para baixo. No entanto, as cultivares de crescimento determinados de maturação tardia param
174 a atividade vegetativa logo após a indução floral induzida pelo fotoperíodo. Por causa disso,
175 geralmente, copa é mais folheada, com comprimento de tronco principal mais longo.

2.3.2 GRUPO DE MATURAÇÃO RELATIVA

A classificação da soja em ciclos (precoce, médio e tardio) descrevia de forma adequada apenas a maturidade da planta em determinado local, não sendo precisa para descrever a sua maturidade relativa sobre ambientes e latitudes que ocorrem nas áreas produtoras da cultura no Brasil (ALLIPRANDINI et al., 2009). A interpretação dos ciclos de soja caiu em desuso devido a introdução de novas cultivares, com a taxonomia atualizada baseando-se em evidências traçadas por estudos desenvolvidos nos Estados Unidos (POEHLMAN, 1987).

A nova estratégia de classificação, conhecida por maturidade relativa, baseia-se em 12 grupos, os quais contemplam genótipos considerando o tempo em dias que se passa entre a semeadura e a maturação fisiológica (Figura 1). A definição baseou-se no comportamento das plantas em diferentes latitudes e condições ambientais no território nacional (ALLIPRANDINI et al., 2009; CAVASSIM et al., 2013).



Fonte: Adaptado de ALLIPRANDINI et al. (2009).

Figura 1. Distribuição dos grupos de maturidade relativa de cultivares de soja no Brasil, baseando-se na latitude.

2.3. DEMANDA HÍDRICA, EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS

O entendimento da demanda hídrica é fundamental para o manejo de culturas agrícolas, contribuindo para a estimativa do volume de água necessário para suprir a evapotranspiração das plantas, sobretudo em períodos que ocorrem escassez de água (veranicos). As informações servem auxiliam na tomada de decisão e busca por alternativas que evitem as perdas de rendimento agrícola (CARVALHO et al., 2019; SILVA et al., 2020).

A soja requer entre 450 e 800 mm de água, durante todo o seu ciclo, para atingir seu pleno desenvolvimento e alto potencial produtivo (NEUMAIER et al., 2020). As janelas de produção nas regiões produtoras brasileiras ocorrem normalmente no período chuvoso. Entretanto, períodos sem chuvas (veranicos) podem proporcionar severos prejuízos nas lavouras (SILVA et al., 2015).

O cultivo da soja requer a disponibilidade hídrica durante todo o ciclo (MONTROYA et al., 2017). O déficit de água na fase reprodutiva pode influenciar na quantidade e tamanho de vagens e na qualidade dos grãos, além de induzir a senescência foliar, encurtar o ciclo das plantas e, conseqüentemente, diminuir a produtividade agrícola (MANAVALAN et al., 2009).

O aumento da produtividade hídrica requer o desenvolvimento de conhecimentos e habilidades dos gestores agrícolas. Com isso, o uso de modelo de simulação de culturas permite o processamento de dados e a simulação de padrões testados em campo. Os modelos de simulação de produtividade agrícola são muito úteis, e podem aumentar a produtividade da cultura, mediante informações obtidos sobre os processos de balanço hídrico do solo, estresse hídrico da planta e produtividade de grãos.

As altas produtividades de soja no Brasil foram impulsionadas com a introdução de cultivares adaptadas aos ambientes de cada região. Ao analisar a adaptabilidade de genótipos de soja às condições de cultivo, o pré-requisito mais importante consiste em otimizar a produtividade da cultura para que seus principais períodos fenológicos coincidam com as condições ambientais mais favoráveis e minimize a ocorrência de períodos de adversidade nas fases mais vulneráveis (KANTOLIC, 2007; DIAS, 2018).

A baixa produtividade da soja é causada por fatores ligados ao manejo inadequado da cultura. Porém, o déficit hídrico é a maior causa de redução do rendimento agrícola, por proporcionar a diminuição da fotossíntese e acúmulo de biomassa. Muitos autores também consideram a água como o recurso ambiental mais importante para garantir o rendimento de grãos da soja (SENTELHAS, et al., 2015; BATISTTI, et al., 2018).

2.4. MODELO AQUACROP

O uso da modelagem é utilizado por diversos pesquisadores no mundo, para analisarem o comportamento das culturas agrícolas. O AquaCrop vem se destacando entre os modelos mais usados pela sua precisão e simplicidade, aspectos interessantes para a sua parametrização, calibração e validação para diferentes condições de manejo, locais e culturas.

O AquaCrop (STEDUTO et al., 2012; RAES et al., 2012) foi desenvolvido em 2009, pela Divisão de Terra e Água da FAO, para auxiliar o manejo e a produção agrícola em relação ao efeito da água no rendimento de cultivos agrícolas. O seu desenvolvimento foi baseado no modelo de Doorebons & Kassam (1979), que calcula a biomassa em função da quantidade de água evapotranspirada, considerando a relação entre o consumo de água e a produtividade da cultura.

Os modelos agrometeorológicos utilizam combinações dos fatores que influenciam a produtividade das culturas para gerar cenários de previsão de safras, desenvolvimento e risco climático atuais e em condições de mudanças climáticas. No entanto, quando utilizados em locais distintos aos quais foram desenvolvidos, os modelos requerem calibração e validação. Utilizados dados específicos do local de interesse, o processo pode assegurar adequada avaliação de rendimento em escala regional.

A modelagem agrometeorológica utiliza modelos de culturas que podem ser úteis para diversas finalidades, principalmente para a previsão de safra, manejo hídrico, escolhas de épocas de plantio entre outros. Os modelos simulam o ciclo de cultivo, para a cultura de interesse, em diversas condições ambientais e de manejo, e pode levar em consideração vários fatores limitantes. Além disso, os modelos agrometeorológicos são ferramentas para estimar a variabilidade temporal e espacial do comportamento da cultura em grandes áreas, reduzindo a necessidade de longos e caros ensaios de campo (RESOP et al., 2012).

O AquaCrop foi calibrado e validado por Montoya et al. (2016), que descreveram os processos para as simulações do crescimento e desenvolvimento da cultura da batata irrigada com sistema de pivô central. Os experimentos de campo foram realizados durante 2011 para calibração e 2012 para validação no sudeste da Espanha, em região semiárida. As batatas foram irrigadas com 120, 100, 80 e 60% da necessidade de água e ajustado para a simulação do crescimento e desenvolvimento da batata nas condições climáticas da área de estudo. A cobertura de dossel, a biomassa seca total, a biomassa seca dos tubérculos e a evapotranspiração foram as principais variáveis analisadas.

Mirsafi et al. (2016) calibraram o modelo AquaCrop para o rendimento do açafrão e avaliaram o desempenho na simulação do crescimento da cultura com seis anos de dados experimentais na área semiárida do Irã. Os dados consistiram em combinações de manejos de

irrigação total, deficitária e sem irrigação). Os resultados indicaram que o AquaCrop pode ser utilizado para simular culturas perenes satisfatoriamente, desde que parametrizado e calibrado para as condições específicas.

Akumaga et al. (2017) avaliaram a aptidão do AquaCrop para simular a produtividade cumulativa de grãos de milho de sequeiro, no norte da Nigéria, região de Savana da Guiana. Os sete anos (2007-2013) de dados experimentais do milho foram obtidos em condições de sequeiro e utilizados para calibrar (2007) e validar (2008-2013) o modelo. O desempenho do AquaCrop, em associações lineares entre “produção de milho simulada e a observada”, foi verificado por meio do coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância de Willmott (d), dentre outras medidas estatísticas. Os resultados indicaram R^2 variando entre 0,82 e 0,99 e d variando entre 0,6 e 0,88.

A qualidade do AquaCrop para simular a produtividade de culturas agrícolas já foi analisada em diversos ambientes no mundo. Resultados positivos foram obtidos para as culturas: algodão (*Gossypium hirsutum* L.) na macedônia (LINKER e IOSLOVICH, 2017); milho (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* L.) e ervilha (*Pisum sativum* L.) em Portugal (PAREDES et al., 2014; PAREDES et al., 2015); e, soja no Líbano (ABI SAAB et al., 2015) e China (PAREDES et al., 2015).

2.4.1. DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO AQUACROP

O AquaCrop apresenta características distintas que o tornam uma ferramenta eficiente para a avaliação da produtividade de culturas sob diferentes condições de déficit hídrico. Dentre as principais características do modelo, destaca-se a utilização da escala de tempo diária para a medição das variáveis, permitindo uma melhor aproximação da resposta da cultura ao estresse hídrico. Além disso, não há a separação da biomassa entre os órgãos da planta, sendo o desenvolvimento foliar da cultura expresso pela cobertura do dossel.

Outra característica importante do AquaCrop é a padronização da produção de biomassa pelo uso da água, considerando a concentração de CO_2 e a transpiração da planta nas condições atmosféricas. Esse modelo foi estruturado para simular a produção potencial e sua produtividade final em quatro etapas: desenvolvimento do dossel, transpiração da cultura, acúmulo de biomassa e produtividade final (STEDUTO et al., 2009). Com essas características, o AquaCrop torna-se uma ferramenta útil para avaliação da produtividade de culturas sob diferentes cenários de déficit hídrico, auxiliando no manejo eficiente dos recursos hídricos e no planejamento agrícola.

O modelo é composto por quatro módulos em sua sub-rotina: Clima, Cultura, Solo e Manejo. O módulo de clima do AquaCrop é responsável por fornecer os dados meteorológicos necessários para a simulação da produção de culturas. Os dados de entrada incluem temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax), umidade relativa mínima (URmin), umidade relativa máxima (URmax), precipitação (P), radiação solar (Rs) e concentração de dióxido de carbono (CO₂). A estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) pelo AquaCrop é baseada no método de Penman-Monteith-FAO, que é um método padrão recomendado pela FAO para estimar a evapotranspiração de referência (ET₀).

A evapotranspiração da cultura (ET_c) é particionada entre transpiração (Tr) e evaporação (Es) usando as seguintes equações:

$$T_r = (K_s K_{sTr} K_{cTr}) ET_0 \quad (4)$$

$$E_s = K_r [(1 - CC^*) K_{ex}] ET_0 \quad (5)$$

Em que: Tr é a transpiração (mm); ET₀ é a evapotranspiração de referência (mm); Es é a evaporação do solo (mm); Kr é o coeficiente de redução da evaporação (0-1); CC* é a fração de cobertura do dossel (%) ajustada para efeitos microadjetivos; K_{ex} é o coeficiente máximo de evaporação do solo (adimensional); K_{sTr} é o coeficiente de estresse por frio para a transpiração da cultura; K_{cTr} é o coeficiente de transpiração da cultura.

O módulo Cultura inclui informações sobre a cultura, como o tipo de planta, a densidade de semeadura, a data de plantio e as características do crescimento da cultura. O módulo de solo utiliza dados de entrada, como a textura do solo, a capacidade de água disponível do solo, o nível de nutrientes no solo e a curva de retenção de água do solo, para simular a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas. A qualidade desses dados de entrada é crítica para a precisão da simulação do AquaCrop da produção de culturas.

O AquaCrop simula o armazenamento na zona radicular (SWC) baseando-se na abordagem do balanço hídrico, o que facilita o entendimento das estratégias de manejo da água (TAVAKOLI et al., 2015). O uso da água é simulado pelo modelo com base em quatro fatores de estresse (K_s): expansão do dossel, fechamento estomático, senescência precoce do dossel e estresse de aeração (MABHAUDHI et al., 2014; VANUYTRECHT et al., 2014). Os detalhes dos conceitos subjacentes, princípios e estrutura conceitual do modelo AquaCrop são descritos por Hsiao et al. (2009); Raes et al. (2009); Steduto et al. (2009); Vanuytrecht et al. (2014) e Foster et al. (2017).

O crescimento, desenvolvimento e senescência da cultura foram simulados com base na cobertura do dossel (CC). A CC é utilizada com a ET_0 e coeficiente de transpiração ($K_c T_r$) para calcular a transpiração da cultura. Da mesma forma, o coeficiente de evaporação do solo é usado com CC e ET_0 para calcular a evaporação do solo. O tempo diário ou graus-dia é considerado para calcular a ET_c com base na transpiração da cultura (T_r , mm d^{-1}) (Equação 4) e evaporação do solo (E_s , mm d^{-1}) (Equação 5) separadamente. No entanto, essa separação é diferente da abordagem proposta no boletim FAO 56 e foi amplamente discutida por Pereira et al. (2015):

O rendimento de grãos é simulado em função do HI, (Equação 6) e da biomassa final (Equação 7). O AquaCrop considera que a produtividade de água normalizada (WP^*) (Equação 8) é um parâmetro conservador, aplicável às condições ambientais e climáticas (TAVAKOLI et al., 2018; AGRAWAL et al., 2019; FERNANDES et al., 2019; ZHANG et al., 2020).

$$HI = Y / B \quad (6)$$

$$Y = B HI \quad (7)$$

$$B = WP^* \times \sum (T_r / ET_0) \quad (8)$$

Em que: Y é o rendimento (t ha^{-1}); B é a biomassa (t ha^{-1}); HI é o índice de colheita (%). WP^* é a produtividade de água normalizada (g m^{-2});

O AquaCrop possibilita a simulação da produtividade com ou sem irrigação (baseando-se na seleção do manejo de água da cultura) e permite variar método (aspersão, localizada ou superfície) e frequência da irrigação. Assim, o modelo pode representar melhor a dinâmica da água no solo, evaporação, transpiração da cultura e temperatura do ar. A precisão do modelo ocorre com o refinamento das simulações do crescimento do dossel, os efeitos do estresse hídrico separados sobre: crescimento do dossel; condutância estomática; senescência das folhas; polinização; e, outros aspectos sobre índice de colheita.

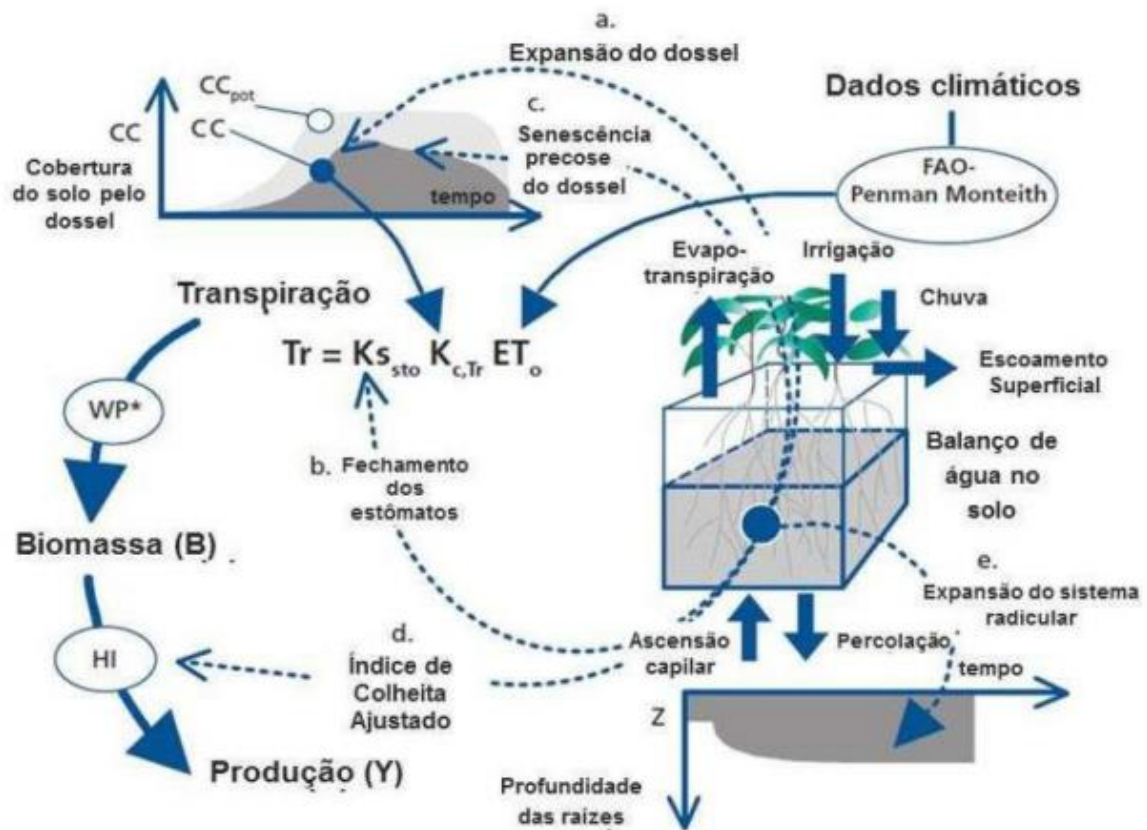
AquaCrop considera no balanço de água no solo o crescimento, desenvolvimento e processos de produção da planta. Na atmosfera, são considerados os fatores que afetam o crescimento, como o regime térmico, chuvas, evapotranspiração e concentração de dióxido de carbono (CO_2). No manejo da cultura, o modelo possibilita a realização de irrigações, bem com controlar a fertilidade do solo, principalmente nitrogênio, e os aspectos relacionados à água, como disponibilidade hídrica e presença de cobertura morta.

A estrutura do AquaCrop permite simular o crescimento e desenvolvimento de cultivares de uma mesma cultura, utilizando parâmetros conservativos. Alguns parâmetros são

de simples obtenção, sendo relacionados ao manejo da cultura. Com isso, o usuário precisa ajustar apenas alguns os dados referentes à quantidade de plantas por hectare, fenologia, cobertura do dossel, profundidade do sistema radicular entre outros aspectos.

No Modulo Clima do AquaCrop são estimados os efeitos das variáveis climáticas nas simulações da cultura (Figura 1). Os componentes meteorológicos necessários são as médias diárias de temperatura mínima e máxima do ar, precipitação, evapotranspiração de referência e a concentração de CO₂. As variáveis climáticas são obtidas de estações meteorológicas, enquanto a concentração de CO₂ proveniente de registros da concentração média de CO₂ na atmosfera medido no observatório de Mauna Loa no Havaí ou para diferentes cenários de mudanças climáticas. No modelo, a temperatura do ar afeta o ciclo da cultura (fenologia, acúmulo de biomassa e polinização), a chuva e evapotranspiração de referência são entradas para o balanço hídrico na zona radicular do solo, e a concentração de CO₂ da atmosfera interfere na taxa de crescimento do dossel e produtividade da água na cultura. O AquaCrop usa o tempo térmico em graus-dias ou dias no calendário como possibilidades para iniciar as simulações.

O Modulo Cultura necessita de parâmetros de entrada referentes à fenologia da cultura, cobertura do dossel (CC), profundidade efetiva do sistema radicular, produção de biomassa e produção alcançável com os principais fatores de parametrização. A cultura cresce e se desenvolve nos estágios de expansão, manutenção e senescência do dossel, com o crescimento do sistema radicular acompanhando o processo, crescendo e acumulando biomassa. O estresse hídrico pode representar impacto no rendimento de grãos, dependendo do tempo, gravidade e duração. Desta forma, o AquaCrop distingue quatro efeitos do estresse hídrico: sobre o crescimento foliar; condutância estomática; senescência do dossel; e, índice de colheita - HI (Figura 2).



FONTE: Raes et al. (2009).

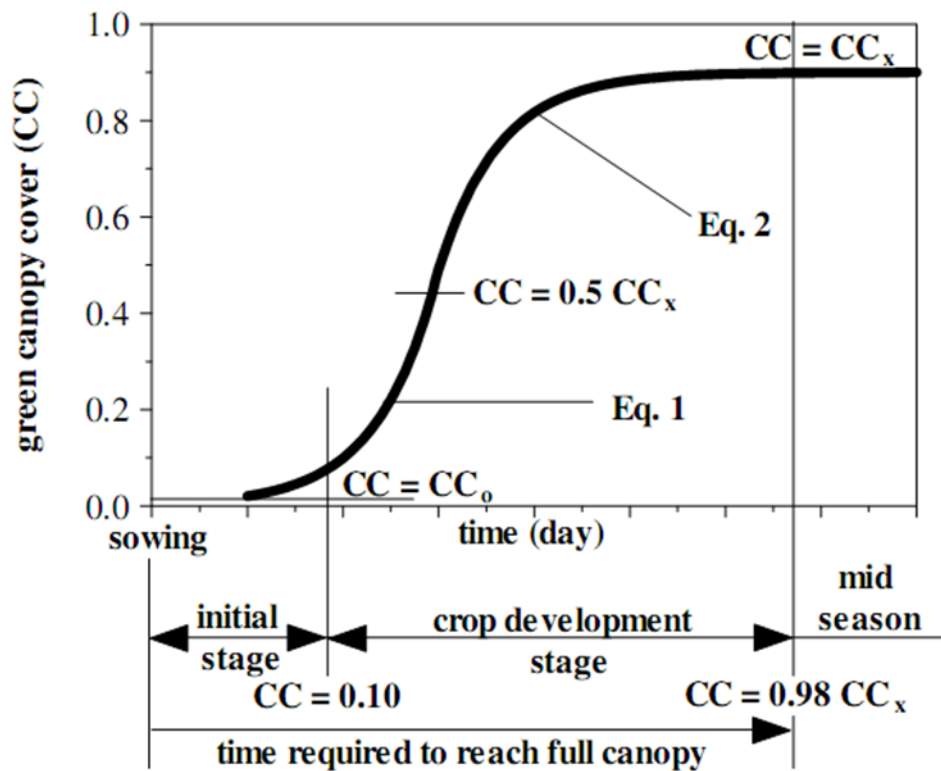
Figura 2. Esquema do fluxo de funcionamento do AquaCrop, as setas pontilhadas indicam os processos afetados pelo estresse hídrico.

O K_s é o parâmetro modificador do alvo do modelo, acima do limite superior do conteúdo de água no solo, o estresse hídrico não é considerado, então, K_s é igual a 1 e abaixo do limite inferior, o efeito do estresse é pleno e o valor de K_s é igual a 0. Os limites superior e inferior são expressos como a fração da quantidade total de água no solo disponível (SWC) entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (STEDUTO et al., 2009).

O AquaCrop possui uma das principais características é a expressão de superfície de cultivo para transpiração (portanto, para a produção de biomassa) que utiliza a fração da cobertura do solo pelo dossel verde (CC) e não o índice de área foliar (IAF), essa característica o distingue dos demais modelos existentes. Quando a CC é escassa, o crescimento do dossel é dependente do tamanho do dossel existente para a fotossíntese, e segue uma curva cinética de primeira ordem.

O valor da cobertura do dossel inicial (CC_0), é importante na simulação porque é necessário para o início do processo de crescimento do dossel. Este parâmetro é obtido pela densidade de plantas multiplicada pela área foliar de uma plântula, quando acontece a

411 emergência de 90% das plântulas. A expansão do dossel, da emergência até o desenvolvimento
 412 integral da cultura, segue uma curva do tipo sigmóide construída com função exponencial até
 413 metade da CC e como função de decaimento exponencial para a outra metade da curva (Figura
 414 3).



415

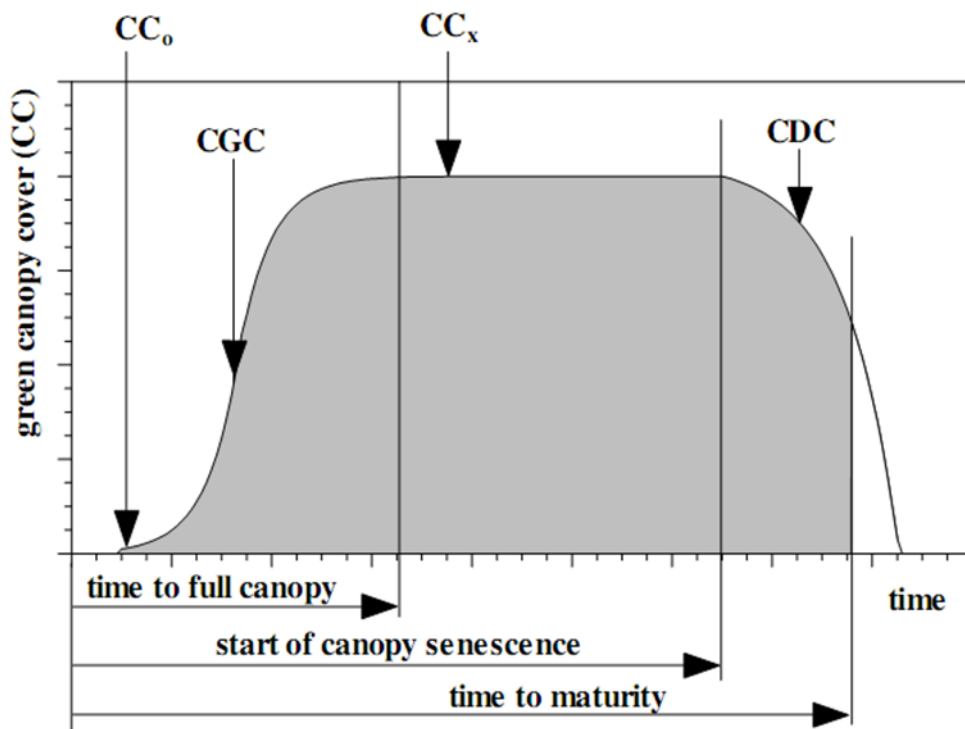
416 Fonte: Steduto et al. (2009).

417 Figura 3. Representação esquemática do desenvolvimento do dossel durante o crescimento
 418 exponencial e as fases de decaimento exponencial. CC_0 e CC_x são a cobertura do dossel inicial
 419 e máxima, respectivamente.

420

421 O crescimento exponencial do dossel é iniciado após as plântulas tornam-se
 422 autotróficas, uma vez que a taxa de crescimento do dossel é proporcional ao tamanho do dossel
 423 existente. A segunda metade da curva de crescimento é iniciado quando as plantas começam a
 424 sombrear mais o solo, assim o crescimento do dossel já não é proporcional ao tamanho do dossel
 425 existente. No decorrer da fase de desenvolvimento, o crescimento do dossel pode ser modulado
 426 pelo estresse hídrico, já que o crescimento foliar é muito sensível ao estresse hídrico e pode ser
 427 retardado quando apenas pequena fração da água disponível está esgotada no solo. Após o seu
 428 pleno desenvolvimento, o dossel das plantas pode apresentar a duração variável antes de entrar

na fase de senescência, que inicia no final do estágio de maturação, ou seja, entra na fase de declínio (figura 4).



431

432 Fonte: Steduto et al. (2009).

433 Figura 4. Variação da cobertura verde do dossel completamente em um ciclo da cultura sob
434 condições não estressantes. CC_0 e CC_x são a cobertura inicial e máxima, respectivamente.

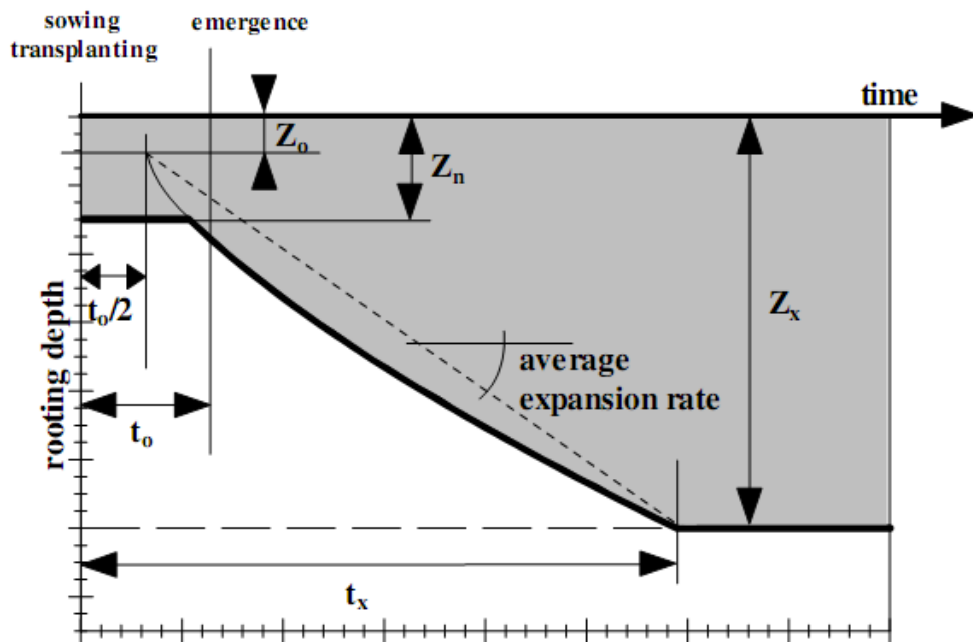
435

436 O tempo entre a cobertura máxima do dossel e antes do início da senescência, ocorre o
437 processo em que o dossel envelhece de forma lenta e progressiva e sofre pequena redução na
438 transpiração e na capacidade fotossintética. Este processo é simulado com base da aplicação de
439 um fator de ajuste (fage) que reduz o coeficiente de transpiração máxima da cultura ($K_c T_{rx}$), por
440 uma fração constante, assim resulta uma diminuição no valor do coeficiente de cultura ajustado
441 ($K_c T_{rx}$).

442

443 A dinâmica do sistema radicular no AquaCrop é simulada por meio da profundidade
444 máxima de enraizamento e o padrão de extração de água do solo (Figura 5). A profundidade
445 máxima de enraizamento é definida como a profundidade em que a absorção de água pelas
446 raízes acontece, apesar de que, algumas culturas podem ter algumas raízes além dessa
447 profundidade. O modelo realiza o balanço de água no solo diariamente e mantém o controle
dos fluxos de entrada e saída de água nos limites da zona radicular e da água retida, os processos

de infiltração, escoamento superficial, drenagem dentro da zona radicular, percolação profunda, absorção pelas plantas, capilaridade, evaporação e transpiração.



Fonte: Steduto et al. (2009).

Figura 5. Representação esquemática do enraizamento profundo ao longo do tempo.

O módulo de manejo tem duas principais categorias: uma sobre o manejo no campo, de forma mais geral e o manejo da água. No componente campo, pode-se selecionar ou definir um nível de fertilidade do solo, restos de cultura sobre a superfície, responsável por diminuir a evaporação do solo, e o uso de práticas conservação do solo para controle do escoamento superficial. O AquaCrop não realiza o balanço de nutrientes, em vez disso, a parametrização é feita para vários níveis de fertilidade, tais como: sem restrição, média e alta restrição da fertilidade. Estes níveis de fertilidade influenciam o coeficiente de crescimento do dossel, a CC, o início da senescência e a taxa de declínio da cobertura do solo pelo dossel e a produtividade da água normalizada.

O modelo AquaCrop, desenvolvido pela Divisão de Terra e Água da FAO em 2009, é uma ferramenta importante para auxiliar no manejo e na produção agrícola em relação ao efeito da água no rendimento das culturas. Ele simula o crescimento de diversas culturas, como milho, trigo, arroz, sorgo, feijão, soja, algodão, beterraba, entre outras, em função da cobertura do dossel (CC) (Steduto et al., 2012; Raes et al., 2012).

O índice de cobertura do dossel (CC) estabelecido pelo AquaCrop tem se mostrado uma técnica robusta, precisa e de fácil aplicação, amplamente testado para diversas culturas. Por exemplo, foi utilizado para avaliar o rendimento de milho em diferentes regiões do mundo (Ahmed et al., 2018), para estudar o impacto do déficit hídrico no rendimento do arroz irrigado (Zhou et al., 2018) e para simular o crescimento e produção de sorgo em condições de estresse hídrico (Ahmed et al., 2016). Além disso, é possível realizar a parametrização do modelo para novas culturas, como a cana-de-açúcar, o que auxilia no planejamento do plantio e na análise de cenários futuros (Khan et al., 2016).

2.5. ÉPOCAS DE SEMEADURA

O rendimento de grãos sofre interferência direta de fatores ambientais como a radiação solar, temperatura do ar, precipitação, umidade do ar, fotoperíodos, dentre outros. Os fatores ambientais são muito importantes para a escolha da janela de cultivo para a semeadura da soja (JIANG et al., 2011). Na maioria das regiões sojicultoras brasileiras, outubro a março consiste no período de cultivo com as melhores condições climáticas para o crescimento e desenvolvimento da cultura. Contudo, o norte e nordeste são exceção, pois o período de cultivo ocorre entre os meses de abril a julho, principalmente regiões do estado de Alagoas.

A época de semeadura interfere diretamente no crescimento e desenvolvimento das plantas de soja, afetando o rendimento de grãos (Zhang et al., 2010). Épocas de semeio tardias podem provocar perdas entre 30 e 50% na produtividade final de grãos, enquanto na safrinha a redução pode ser de até 70%, quando comparadas as lavouras semeadas no período recomendado (RODRIGUES et al., 2008).

Cruz et al. (2010) verificaram que o semeio tardio interferiu negativamente nos componentes de rendimento, como o número de vagens/grãos por planta e massa de mil grãos. Em ensaio realizado no estado do Paraná, Stülp et al., (2009) constataram que a semeadura no início da janela de cultivo recomendada contribuiu para o aumento no rendimento final de grãos.

A época de plantio da cultura é um dos fatores que mais interferem na produtividade de grãos, pois influencia diretamente na arquitetura da planta. Pode também, atenuar ou acentuar a exposição de cultivos à variação dos fatores climáticos. Assim, semeio fora da janela de plantio indicada podem afetar o tamanho, ciclo e rendimento das plantas, bem como aumentar as perdas ao final do ciclo (Freitas et al., 2010). A germinação e emergência das plântulas, fases importantes do ciclo da soja, precisa coincidir com o período do ano com maior probabilidade

de armazenada de água no solo, em quantidade suficiente para atender a demanda requerida, para garantir o melhor estabelecimento e rendimento da cultura em campo (CARMO et al., 2018).

A escolha da época de semeio adequada pode contornar adversidades climáticas, como a temperatura do ar, disponibilidade hídrica e luminosidade. As cultivares de soja apresentam diferentes necessidades de mínimos de horas de luz (abaixo do qual o florescimento é induzido), e a adaptabilidade sua em cada região varia conforme a latitude do local e duração do ciclo da planta. Liu et al. (2010) e Dias et al. (2020) consideram que o plantio é uma das etapas mais críticas do cultivo da soja.

3. MATERIAL E MÉTODOS

As análises de simulação de produtividade e crescimento da soja foram realizadas para doze cenários de datas de semeadura (oito datas entre abril e julho, período de cultivo recomendado no zoneamento da cultura na região; duas datas antecipadas em março; duas datas atrasadas em agosto). Os doze cenários testaram datas de semeadura com intervalo de quinze dias, começando da primeira quinzena de março até a segunda quinzena de agosto. O modelo agrometeorológico AquaCrop, versão 6.1 desenvolvido pela FAO (RAES et al., 2009) foi utilizado para realizar as simulações. Os parâmetros de entrada do modelo foram calibrados com dados experimentais de cinco cultivares de soja, obtidos em dois experimentos conduzidos na região de estudo.

3.1. EXPERIMENTOS DE CAMPO

3.1.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados no *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, localizado em Rio Largo (09°28'02" S, 35°49'43" W e 127 m de altitude), estado de Alagoas (Figura 6). O local é situado na região dos Tabuleiros Costeiros e o clima é caracterizado como quente e úmido (B1), megatérmico (A'), com deficiência de água moderada no verão (s) e grande excesso de água no inverno (w2) (Thornthwaite e Mather, 1955). A temperatura do ar varia entre 19,3 °C (agosto) e 31,7 °C (janeiro), com média anual de 25,4 °C.

A precipitação média anual total é de 1.800 mm, com mínima mensal em dezembro (41 mm) e máxima em julho (394 mm), com período chuvoso entre a primeira quinzena de abril e a segunda quinzena de agosto, quando ocorre 70% da precipitação total anual (SOUZA et al., 2004; FERREIRA JÚNIOR, 2014). O solo da área experimental é classificado como Latossolo Amarelo Coeso Argissólico, de textura média/argilosa. Apresenta declividade média de 2% e velocidade de infiltração básica de água (VIB) de 52 mm h⁻¹. Os demais atributos físico-hídricos do solo encontram-se na Tabela 1 (CARVALHO et al, 2003).

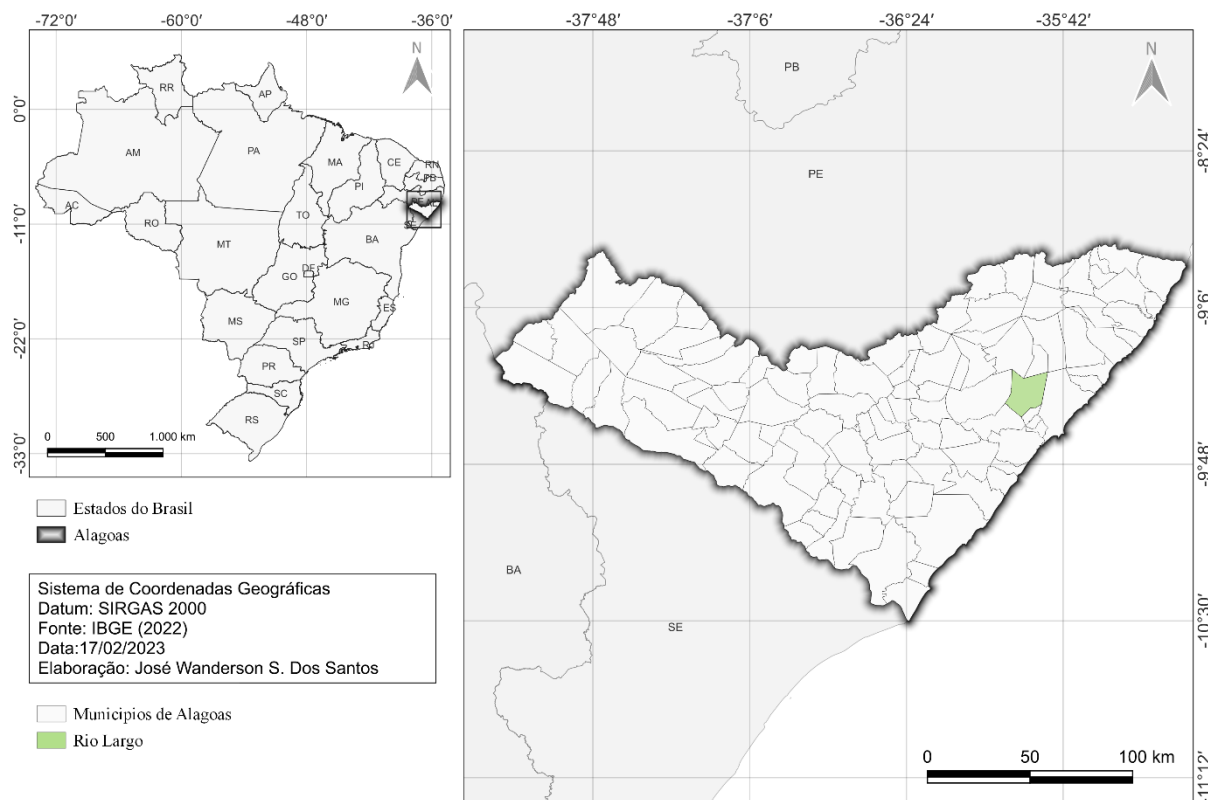


Figura 6. Localização da área experimental no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (CECA/UFAL), em Rio Largo, Tabuleiros Costeiros, no estado de Alagoas.

Tabela 1. Atributos físico-hídricos do solo da área experimental do CECA/UFAL, em Rio Largo, Tabuleiros Costeiros, no estado de Alagoas.

Textura do solo	Camadas (m)	Densidade (kg m^{-3})	Conteúdo volumétrico de água no solo ⁽¹⁾ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		
			PMP	FC	SAT
Médio argilosa	0 - 0,10	1360	0,12	0,20	0,40
	0,10 - 0,20	1440	0,13	0,22	0,43
	0,20 - 0,30	1520	0,14	0,24	0,43

⁽¹⁾ PMP – Ponto de Murcha Permanente; FC – Capacidade de Campo; SAT – Conteúdo de Água na Saturação.

3.1.2 ARRANJO EXPERIMENTAL

Os dados experimentais foram obtidos do experimento conduzido, por Barbosa et al. (2021) e Barbosa et al. (2022). Foram avaliadas cinco cultivares de soja (AS3730, BMX-POTÊNCIA, BRS9383, M6210 e M6410) semeados com densidade populacional de 350.000

plantas ha^{-1} , a tabela 2 apresenta as datas de semeadura e colheita das cultivares. A área experimental foi de 1.155 m^2 ($35,0 \text{ m} \times 33,0 \text{ m}$), em blocos ao acaso, com cinco repetições, em cada bloco foram fixadas seis parcelas composta por 10 linhas com $5,0 \text{ m}$ de comprimento ($25,0 \text{ m}^2$), espaçadas à $0,5 \text{ m}$.

Tabela 2. Datas de semeadura e colheitas das cultivares de soja.

	AS3730	BMX-POTÊNCIA	BRS9383	M6210	M6410
Semeadura	20/06/2019	20/06/2019	20/06/2019	20/06/2019	20/06/2019
Colheita	19/09/2019	18/09/2019	04/10/2019	12/09/2019	19/09/2019

O experimento foi conduzido na estação chuvosa (junho a outubro de 2019). De acordo com Souza et al. (2004), a precipitação média (1972-2001) acumulada entre junho e outubro é de $787,2 \text{ mm}$ e ET_0 em torno de $5,6 \text{ mm/dia}$, com déficit hídrico de aproximadamente $158,2 \text{ mm}$. Para essa época, o experimento foi conduzido em regime de sequeiro tendo em vista a disponibilidade hídrica durante essa estação.

3.1.2. MEDIDAS

As observações e medições a campo incluíram: dados meteorológicos, datas dos estágios de crescimento da cultura, cobertura do dossel, biomassa aérea, rendimento de grãos, índice de colheita e armazenamento de água no solo.

3.1.2.1 DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos foram coletados em uma estação meteorológica automática (Micrologger – CR 1000, Campbell Scientific, Logan, Utah) instalada a 300 m do experimento.

A temperatura mínima ($T_{\min}$, $^{\circ}\text{C}$), média (T_{med} , $^{\circ}\text{C}$) e máxima do ar ($T_{\max}$, $^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar mínima ($UR_{\min}$, %), média (UR_{med} , %) e máxima ($UR_{\max}$, %), foram medidas por um termohigrômetro (HMP45C, Campbell Scientific) instalado a $2,0 \text{ m}$ de altura. A precipitação (P , mm) foi monitorada por um pluviômetro (TB3, Hydrological Services PTY. LTD) instalado a $1,5 \text{ m}$ de altura. A irradiância solar global (R_g , W m^{-2}) foi obtida por um piranômetro (Eppley, modelo 848). A velocidade do vento a 2 m de altura (u , m s^{-1}) foi obtida por um anemômetro (Modelo RM Young, Campbell Scientific). O saldo de radiação (R_n , $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) diário foi considerado fração da irradiação solar global diária (H_g , $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) em que

os valores de Hg foram obtidos por meio de integrações de Rg. Esta relação é oriunda de medições sobre a grama (*Paspalum notatum* Flüggé) em condições padrões (Allen et al., 1998) realizadas entre janeiro a setembro de 2006, sendo utilizados apenas os dias sem precipitação (n = 158) pelo Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia (LIA – CECA/UFAL).

A evapotranspiração de referência (ET_0 , mm d⁻¹) foi estimada pelo método de Penman–Monteith-FAO. As temperaturas máximas e mínimas diárias, radiação solar, umidade relativa mínima, precipitação e ET_0 para cada temporada de crescimento são mostrados na Figura 7.

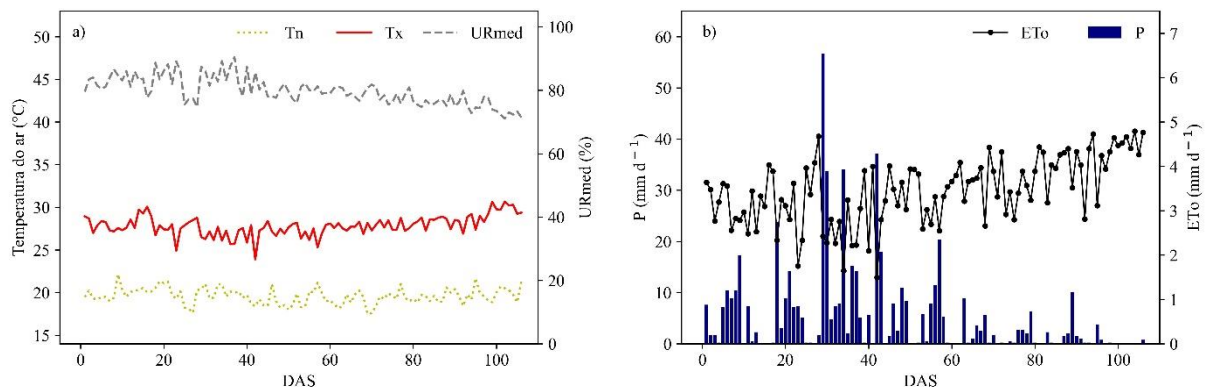


Figura 7. Variação nos dados meteorológicos diários para dias após a semeadura (DAS).

3.1.2.2 DATAS DO ESTÁGIOS

O comprimento dos estágios de crescimento (I – Inicial; II – Desenvolvimento; III – Florescimento; IV – Final) de cada cultivar foi realizado diariamente, desde a emergência até o final do ciclo de cultivo, com o intuito de identificar as alterações visuais, na qual foram utilizadas seis plantas por parcela para monitoramento. Os dias corridos foram convertidos em tempo térmico (Equação 1), conforme McMaster e Wilhelm (1997):

$$GDD = \sum[(T_x + T_n)/2 - T_{base}] \quad (1)$$

Em que: GDD é graus-dia acumulados (°C); T_x e T_n são as temperaturas máxima e mínima do ar, respectivamente (°C); T_{base} é a temperatura basal da cultura (5 °C para temperatura para crescer e 30 °C). Se $T_x < T_{base}$, então $T_x = T_{base}$, e se $T_n < T_{base}$, então $T_n = T_{base}$ (MABHAUDHI et al., 2014). As datas de cada estágio de desenvolvimento da cultura estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 3. Datas dos estágios de desenvolvimento da cultura da soja e graus-dia de crescimento cumulativos (GDD).

Estágios (1)		AS3730	BMX- POTÊNCIA	BRS9383	M6210	M6410
I	Data	21/06 25/06	21/06 25/06	21/06 25/06	21/06 25/06	21/06 25/06
	GDD (°C)	69,1	69,1	69,1	69,1	69,1
II	Data	26/06 24/07	26/06 23/07	26/06 05/08	26/06 24/07	26/06 27/07
	GDD (°C)	471,4	457,8	628,9	471,4	510,6
III	Data	25/07 02/08	24/07 02/08	06/08 16/08	25/07 02/08	28/07 02/08
	GDD (°C)	588,3	588,3	772,8	588,3	588,3
IV	Data	03/08 19/09	03/08 18/09	17/08 30/09	03/08 12/09	03/08 19/09
	GDD (°C)	1236,7	1222,7	1395	1138,1	1236,7

⁽¹⁾ I – Inicial; II – Desenvolvimento; III – Florescimento; IV – Final.

3.1.2.3 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

O IAF foi obtido pela relação entre a área foliar (AF; m²) e a área de solo ocupada pelas plantas (m²). AF foi determinada em uma amostra de 0,5 m² (1,0 m x 0,5 m), somando a área de folhas individuais, mensurada pelo comprimento e largura de um folíolo e depois multiplicado por 3, em seguida multiplicado pelo número de folhas de cada planta para estimar a área foliar. A área foliar foi obtida pelo produto entre o comprimento, largura e fator de forma da folha (0,7) (GASSEN, 2001).

3.1.2.4 BIOMASSA AÉREA, PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO

A biomassa aérea foi obtida ao longo do ciclo de cultivo, a partir do vigésimo dia após a emergência até a colheita em intervalo de dez dias. Foram colhidas amostras na área de 0,5 m² nas fileiras intermediária em cada parcela. As amostras foram pesadas em balança de precisão (±0,001 g) após a colheita e secagem em estufa a 65 °C por 72 h. A biomassa aérea (t ha⁻¹) foi estimada a partir da biomassa das cinco plantas e densidade de plantas (350.000 plantas ha⁻¹).

O rendimento de grãos (Y , $t\ ha^{-1}$) foi estimado pelo produto 2500 x massa de grãos de uma amostra em cada parcela. A massa de grãos da amostra foi determinada pela colheita de todas as plantas de uma área útil de $4,0\ m^2$. As plantas foram colhidas e trilhadas manualmente. Foi determinada a umidade dos grãos em estufa para correção da massa de grãos por área (13% de umidade). O índice de colheita (HI; %) foi determinado pela relação entre o rendimento de grãos e biomassa aérea.

O armazenamento da água do solo na zona radicular (W , mm) foi calculado com dados de umidade obtidos a cada trinta minutos, obtidos indiretamente por sensores que utiliza a técnica da Reflectometria de Domínio de Tempo (TDR, CS616, *Campbell Scientific*, Logan, Utah), ligados no sistema de aquisição de dados CR1000. As hastes foram posicionadas horizontalmente no solo, com duas repetições, nas profundidades de 0,05; 0,10 e 0,40 m, nas fileiras centrais do cultivo.

3.2. SIMULAÇÕES DAS PRODUTIVIDADES DA SOJA NAS ÉPOCAS DE CULTIVO

3.2.1. PARAMETRIZAÇÃO DO AQUACROP VERSÃO 6.1

Na parametrização do modelo, foram criados arquivos com os respectivos parâmetros observados de clima, solo, cultura e manejo para cada cultivar de soja, e irrigação, em suas respectivas safras de estudo, como previsto na interface do *software* e exposta na Figura 4.

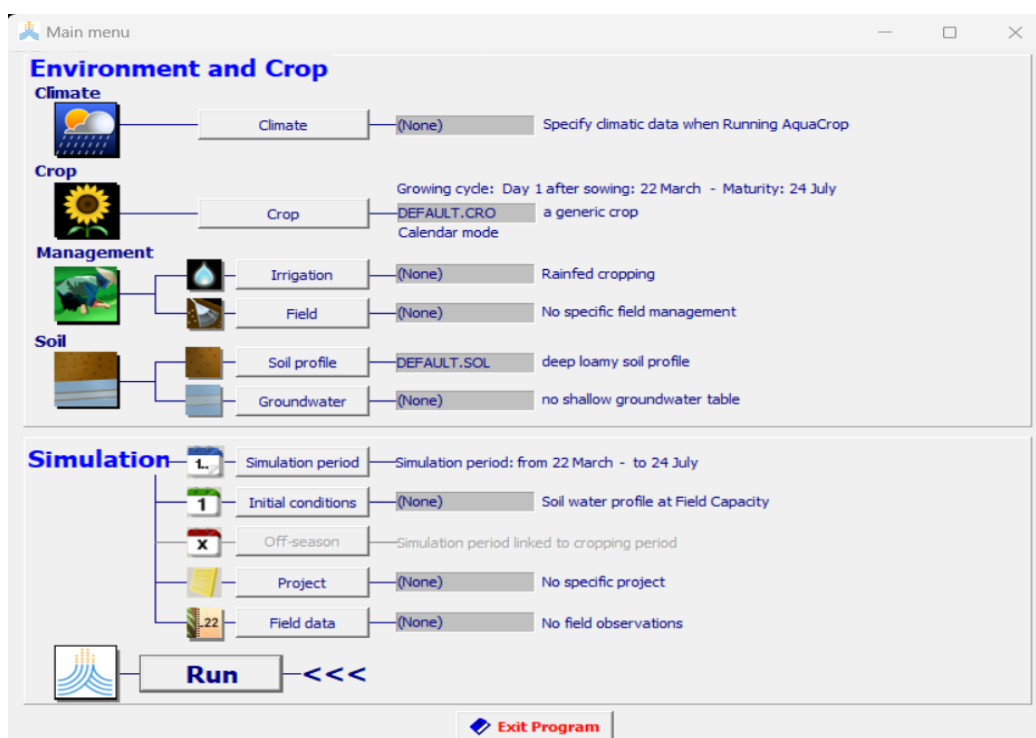


Figura 4 - Interface do *modelo AquaCrop*

3.2.1.1 PARÂMETROS DE CLIMA

Os dados meteorológicos diários utilizados na criação do arquivo referente ao clima foram: temperatura mínima e máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$), precipitação (mm), evapotranspiração de referência (ET_0 , mm), com suas metodologias descritas neste trabalho no subitem 3.1.2.1. A concentração média anual de dióxido de carbono na atmosfera (CO_2) foi considerada a obtida pelo observatório de Mauna Loa no Havaí, contida no modelo *AquaCrop*, para o ano de 2000 ($369,47 \text{ ppm} = 716,0 \text{ mg m}^{-3}$), e ajustado pelo modelo para os anos simulados, para todos os experimentos, conforme descrito em Raes et al. (2009).

3.2.1.2 PARÂMETROS DE SOLO

Em relação ao perfil do solo, o modelo *AquaCrop* permite estudar até cinco camadas com suas respectivas características físicas. Porém, neste estudo foram observadas três camadas, que correspondem a $0 - 0,10$; $0,10 - 0,20$; e $0,20 - 0,30 \text{ m}$. Os dados utilizados na caracterização de cada camada foram: umidade em capacidade de campo, umidade em ponto de murcha permanente umidade de saturação e condutividade hidráulica saturada. A Tabela 1 apresenta o resumo das características do solo para as duas áreas de estudo, utilizadas como dados de entrada de solo no modelo *AquaCrop*.

3.2.1.3 PARÂMETROS DE CULTURA

Em relação aos parâmetros de cultura, o *AquaCrop* considera cinco elementos que compreendem: fenologia, cobertura do dossel, profundidade de enraizamento, produção de biomassa e produtividade, e que se dividem em conservativos e não-conservativos. A tabela 6 apresenta os parâmetros de cultura utilizados na parametrização do modelo.

693 Tabela 6. Parâmetros conservativos e não-conservativos da cultura da soja, para os diferentes
 694 tratamentos de irrigação, utilizados da calibração e validação do modelo *AquaCrop*

Parâmetros conservativos	Valores		Unidade		
Temperatura basal	5	(°C)			
Temperatura limite	30	(°C)			
Cobertura da copa por plântula com 90% de emergência – CC ₀	5	(cm ² /planta)			
Coeficiente de cultura quando o dossel está completo, mas antes de senescência	1,1	Transpiração total do dossel em relação a ET ₀			
Declínio do coeficiente de cultura CC _x	0,30%	Declínio por dia devido ao envelhecimento da folha			
Coeficiente de declínio do dossel na senescência (CDC)		Diminuição em CC em relação a CC por GDD			
Produtividade de água da cultura normalizada para a ET ₀ e CO ₂	15	g m ⁻² (Biomassa)			
Limite da depleção da água no solo para a expansão do dossel - Superior	0,15	Fração de TAW, acima deste crescimento foliar é inibido			
Limite da depleção da água no solo para a expansão do dossel - inferior	0,65	O crescimento das folhas para completamente neste valor			
Formato da curva do coeficiente de estresse do crescimento foliar	3,00	Forma moderadamente convexa			
Limite da depleção da água no solo para controle estomático- superior	0,5	Acima destes estômatos começam a fechar			
Forma da curva do coeficiente de estresse dos estômatos	3,00	Curva altamente convexa			
Limite da depleção da água no solo para a senescência do dossel -superior	0,7	Acima desta senescência inicial do dossel começa			
Coeficiente que descreve o impacto positivo do crescimento vegetativo restrito durante a formação do rendimento em HI	None	HI reduzido pela inibição dos estômatos na antese			
Coeficiente que descreve o impacto negativo do crescimento vegetativo restrito durante a formação do rendimento em HI	Forte	HI aumentado pela inibição do crescimento da folha			
Aumento máximo permitido (%) do HI específico	10				
Parâmetros não-conservativos	C1	C2	C3	C4	C5
Coeficiente de crescimento do dossel - CGC (% dia ⁻¹)	13,7	10,8	11,7	11,7	15,1
Coeficiente de declínio do dossel na senescência (CDC)	7,5	8,5	7,5	9,5	6,8
Produtividade de água da cultura normalizada para a ET ₀ e CO ₂ (g/m ²)	21	17	22	18	21
Índice de colheita - HI	35	41	23	36	42
Tempo até o CC _x (dias)	50	54	61	50	47
Tempo do semeio até o início da senescência (dias)	55	57	88	55	49
Tempo da semeadura até maturação (dias)	91	90	102	85	91
Tempo da semeadura até a atingir a profundidade máxima das raízes (dias)	53	53	53	53	53
Tempo até a floração	34	33	46	34	37
Duração da floração	9	10	11	9	6
Duração da construção do HI (dias)	48	42	47	42	60
Números de plantas por hectare		350.000			
Profundidade efetiva mínima das raízes (m)		0,1			

Profundidade efetiva máxima das raízes (m)

0,3

*C1 – AS3730; C2 – BMX-POTÊNCIA; C3 – BRS9383; C4 – M6210; C5 – M6410.

Nos parâmetros conservativos, a temperatura mínima ($T_{b\text{mín}}$) e máxima ($T_{b\text{máx}}$) basal, produtividade de água da cultura normalizada para ET_0 e CO_2 (WP^*) e produtividade de água durante a formação do grão (WP), foram utilizados os valores propostos por Hsiao et al. (2009) para a cultura do milho. Para Steduto et al. (2009), a produtividade de água da cultura normalizada para ET_0 e CO_2 , pode ser considerada constante para uma determinada cultura sem limitação à nutrientes minerais, e independentemente de condições de estresse hídrico, exceto os extremamente severos.

O desenvolvimento do dossel em condições ótimas, é descrito pelos parâmetros da cultura como: cobertura inicial do dossel (CCo), quando 90% das plantas estão emergidas; cobertura máxima do dossel (CCx), quando o dossel está totalmente desenvolvido; coeficiente de crescimento do dossel (CGC), que descreve a expansão do dossel entre a emergência e o desenvolvimento completo; e coeficiente de declínio do dossel (CDC), que descreve a fase de declínio do dossel em função da senescência das folhas e a maturidade fisiológica. As variáveis de CCo , CCx e densidade de semeadura foram contabilizadas aquelas observadas nos experimentos. Enquanto as variáveis de CGC e CDC , foram ajustadas pelo modelo.

Para expressar o desenvolvimento foliar da cultura, o índice de área foliar, obtido experimentalmente, foi convertido em cobertura do dossel, através da Equação 01, proposta por Heng et al. (2009).

$$CC = 1 - \text{EXP}(-k * IAF) \times 100 \quad (01)$$

em que: CC - cobertura do dossel ($m^2 m^{-2}$); IAF - índice de área foliar ($m^2 m^{-2}$); k é o coeficiente de extinção de luz, considerado igual a 0,72 (SCHOFFEL e VOLPE, 2001; PEREIRA, 2002).

Na definição dos parâmetros não-conservativos, a distinção das fases da cultura que compreenderam os tempos de semeadura à emergência (TSE); semeadura à floração (TSF); semeadura à senescência (TSS); semeadura à maturação (TSM); semeadura à profundidade máxima das raízes ($TPMR$); e comprimento da floração (TCF), deu-se pela observação do início da ocorrência e duração da mesma. A profundidade efetiva mínima ($PR_{\text{mín}}$) e máxima ($PR_{\text{máx}}$) da raiz e o fator de forma de expansão da mesma ($F_{\text{exp. raiz}}$), foram considerados de acordo com Hsiao et al. (2009) para a cultura do milho. O índice de colheita de referência foi considerado o obtido para cada situação analisada, conforme a Tabela 6.

A sensibilidade da cultura à umidade do solo, que relaciona o limite inferior de depleção de água no solo para expansão do dossel ($L_{exp\ dossel}$) com os limites superiores de depleção de água no solo para expansão do dossel ($L_{Sexp\ dossel}$), controle estomático ($L_{Sest.}$), e senescência do dossel ($L_{Ssen.}$), e seus respectivos fatores de forma de estresse hídrico: $F_{exp\ dossel}$, F_{est} e F_{sen} , foram ajustados para cada cultivar.

3.2.1.4 PARÂMETROS DE MANEJO

No parâmetro manejo, o AquaCrop apresenta duas categorias, que são: manejo de campo e manejo da água (SILVA et al., 2018). O manejo de campo consiste em definir condições de fertilidade, salinidade e práticas conservacionistas, como a porcentagem de cobertura do solo na semeadura, que para este caso considerou-se que não havia cobertura vegetal. Enquanto a fertilidade do solo foi considerada ideal e igual para todos os tratamentos, e a salinidade foi desconsiderada neste estudo. No manejo da água é possível definir o método de irrigação, turno de rega e lâmina de irrigação aplicada em cada tratamento, já detalhadas no subitem 3.1.2.

3.2.3. CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO AQUACROP

Inicialmente, houve uma simulação para cada ano de cultivo sem qualquer modificação dos parâmetros do arquivo padrão para a cultura da soja, os resultados foram comparados com os dados experimentais (ADDISCOTT et al., 1995; NAIN e KERSEBAUM, 2007; SALAZAR et al., 2009). Assim, os parâmetros padrões do AquaCrop foram alterados a fim de obter resultados simulados que correspondessem aos dados experimentais observados em campo.

Além dos parâmetros conservadores, alguns parâmetros da cultura são específicos para cada cultivar, dependem do manejo e condições ambientais. São parâmetros que não podem ser amplamente utilizados e requerem modificações definidas pelos usuários. Na Tabela 3 encontra-se listados os valores atribuídos a parâmetros específicos para simular as respostas das cultivares de soja as diferentes condições de cultivo (RAES et al., 2012). O AquaCrop foi calibrado por meio de um processo iterativo (tentativa e erro) de ajuste dos parâmetros, realizado até que os resultados da simulação se aproximassem dos valores observados em campo (SANDOVAL-SOLIS et al., 2020).

A qualidade das associações entre dados simulados no AquaCrop e obtidos em campo foram avaliadas baseando-se em indicadores estatísticos, como: eficiência da modelagem (EF),

erro médio (E), raiz quadrada média do erro (RMSE) e raiz quadrada média do erro normalizada (NRMSE).

A EF determina a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variância das observações, indicando como os dados observados versus simulados se ajustam à linha 1:1 (Nash e Sutcliffe, 1970; Moriasi et al., 2007; Equação 2). A EF varia de menos infinito a 1, em que 1 indica correspondência perfeita entre o modelo e os dados medidos em campo. O E mede se o modelo simulado (S) tende a superestimar ($E > 0$) ou subestimar ($E < 0$) os dados observados (O) (Equação 2).

$$EF = 1 - \frac{\sum(O_i - S_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$E = \frac{\sum(S_i - O_i)}{n} \quad (3)$$

Em que: n é o número de observações; S é o valor simulado e O é valor observado.

A raiz quadrada média do erro (RMSE; Equação 4) é utilizado para mensurar a performance geral do modelo e sintetiza a diferença média entre os valores observados e estimados no modelo avaliado. A unidade da RMSE é a mesma utilizada para a variável analisada, o modelo é melhor ajustado quando o valor aproxima-se de zero. A Equação 5 mostra a normalização do RMSE, a simulação é considerada excelente quando $NRMSE < 10\%$, boa para $10\% \leq NRMSE < 20\%$, aceitável para $20\% \leq NRMSE < 30\%$ e ruim se $NRMSE > 30\%$ (JAMIESON et al., 1991).

$$RMSE = \sqrt{\sum(S_i - O_i)^2 / n} \quad (4)$$

$$NRMSE = RMSE / \bar{O} \times 100 \quad (5)$$

As previsões de rendimento de grãos e biomassa seca final foram avaliadas baseando-se nas diferenças brutas (DB; t ha⁻¹; Equação 6) e relativas (DR; %; Equação 7). Quanto mais próximo de zero o valor de DB e DR, melhor a concordância entre os valores observados e simulados (ARAYA et al., 2016). O conjunto de dados simulados é aceitável se DR não exceder 15%, sendo a faixa de erro de tolerância para estudo agrônomo de campo (BRISSEON et al., 2002).

$$DB = (Si - Oi) \quad (6)$$

$$DR = (Si - Oi) / Oi \quad (7)$$

796

797 3.2.4 SIMULAÇÕES DAS PRODUTIVIDADES DAS CULTIVARES PARA AS ÉPOCAS

798 DE SEMEADURA

799

800 Com o AquaCrop parametrizado e calibrado avaliou-se a influência das condições
 801 climáticas sobre o rendimento de grãos de soja, nas épocas de semeadura para Rio Largo. Nas
 802 simulações, foram utilizados as séries de dados meteorológicos de treze anos (2006 a 2018),
 803 coletados na estação automática do CECA/UFAL, e os arquivos .CROP (referentes as
 804 cultivares) para simular os efeitos das condições climáticas em cada época de semeadura, sobre
 805 o rendimento produtivo. Na Tabela 4 encontra-se as dozes épocas de semeadura e datas de
 806 plantio dos treze anos analisados.

807

808 Tabela 4. Épocas de semeadura e datas de semeio para a cultura da soja, utilizadas nas
 809 simulações.

Épocas de Semeadura	Data de semeio	Épocas de Semeadura	Data de semeio
1 ^a	01/mar	7 ^a	01/jun
2 ^a	16/mar	8 ^a	16/jun
3 ^a	01/abr	9 ^a	01/jul
4 ^a	16/abr	10 ^a	16/jul
5 ^a	01/mai	11 ^a	01/ago
6 ^a	16/mai	12 ^a	16/ago

810

811 Os dados de produtividade de grãos simulados foram submetidos à análise de variância
 812 (ANOVA) e, quando significativos ao teste F(P <0,05), os valores médios foram comparados
 813 com o teste de Tukey (P < 0,05), para análise da resposta da produtividade da soja às épocas
 814 de semeadura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. PARAMETRIZAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO

A calibração do modelo foi realizada com dados de duas safras (2018/19 e 2019), com intuito de reduzir as diferenças entre a cobertura do dossel mensurada e simulada (CC, %), água disponível no solo (SWC, mm), biomassa seca (B, t ha⁻¹) e rendimento de grãos (Y, t ha⁻¹). Devido à interdependência dos parâmetros para calibração do modelo, o foco principal foram a estimativa de Y. Na Tabela 3 encontram-se os valores padrão (RAES et al., 2012) dos principais parâmetros usados para iniciar simulações com o AquaCrop. Os valores dos parâmetros calibrados no presente estudo encontram-se na Tabela 5.

4.2.1 COBERTURA DO DOSSEL

Durante a safra 2019, a curva de cobertura do dossel (CC) máxima simulada foi inferior à da safra anterior, correspondendo a 66,8% (AS3730), 83,8% (BMX-POTÊNCIA), 97,7% (BRS9383), 82,0% (M6210) e 80,9% (M6410) dos valores observados. Essa redução da CC máxima pode estar relacionada com o número de graus-dia de desenvolvimento (GDD) necessários para cada estágio de crescimento da cultura, como mostrado na Tabela 2. Além disso, foi observado que a calibração dos parâmetros do modelo resultou em valores estimados mais próximos dos valores observados do que os valores obtidos ao utilizar os parâmetros padrão, não calibrados (SANTOS et al., 2019; WEN et al., 2019; YAO et al., 2020).

A redução da CC e a diminuição do ciclo da cultura entre cultivares podem ser explicadas pela sensibilidade da soja ao fotoperíodo e à deficiência hídrica em condições de sequeiro, que afeta o ciclo e acelera a senescência das plantas (ZANON, 2015). Além disso, os resultados indicaram que as curvas CC ajustadas com parâmetros calibrados do AquaCrop foram mais precisas na previsão da cobertura do dossel do que as curvas CC ajustadas com parâmetros padrão (não calibrados), conforme apresentado na Figura 7. A CC simulada com valores padrão (não calibrados) fornecidos pelo AquaCrop (RAES et al., 2012) obteve baixo desempenho (Tabela 6).

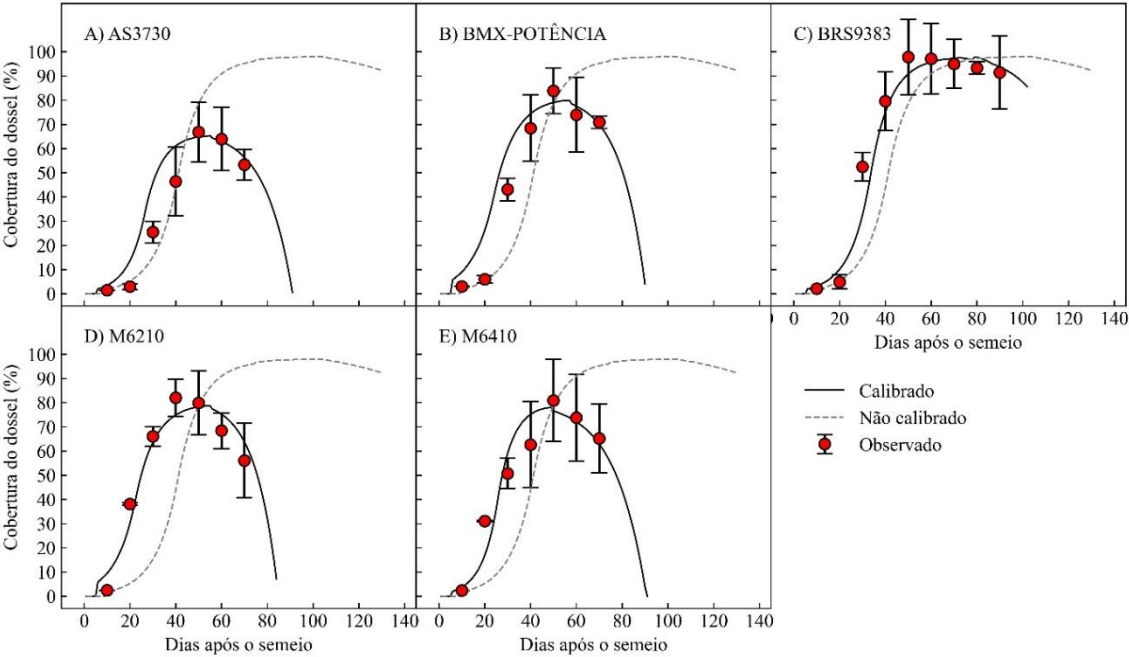


Figura 8. Curva de cobertura do dossel (CC) simulada e observado (as barras de erro referem-se ao desvio padrão das observações da CC) para diferentes cultivares de soja, em condição de sequeiro.

Tabela 5. Indicadores estatísticos (eficiência da modelagem - EF, erro médio - E, raiz quadrada média do erro - RMSE e raiz quadrada média do erro normalizado - NRMSE) obtidos da associação entre respectivos valores estimados (com parâmetros calibrados e não calibrados) e observados da cobertura do dossel, para as cultivares de soja analisados.

Parâmetros	Cultivares	RMSE	NRMSE	E	EF
		%	%		
não calibrados	AS3730	19,77	30,02	10,04	0,40
	BMX-POTÊNCIA	18,12	24,91	-2,65	0,66
	BRS9383	18,68	27,40	-9,78	0,75
	M6210	32,01	57,02	-8,90	-0,53
	M6410	22,31	42,59	-5,14	0,23
Calibrados	AS3730	10,43	28,04	6,81	0,83
	BMX-POTÊNCIA	10,73	21,51	6,69	0,88
	BRS9383	7,68	11,26	-1,96	0,96
	M6210	6,31	11,24	0,30	0,94
	M6410	8,07	15,41	-0,05	0,90

O AquaCrop simulou satisfatoriamente a CC para as cultivares de soja avaliadas após a calibração (Tabela 6). De forma geral, os indicadores estatísticos apresentaram resultados consistentes, evidenciando a necessidade de calibração da CC padrão em relação à cultura específica do local nas condições de solo, clima e condições de manejo, com EF entre 0,83 a

0,96. A CC não calibrada foi subestimada (entre -8,90 a -2,65%), exceto para a cultivar AS3730 com superestimativa de 10,04. Os resultados encontrados estão em concordância com outros estudos que também apontam a importância da calibração dos parâmetros do modelo AquaCrop para obter estimativas mais precisas da CC (MIRSAFI et al., 2016; GARCIA et al., 2017; FERNANDES et al., 2018). Além disso, a subestimação da CC não calibrada é um problema recorrente em simulações agronômicas com o AquaCrop (KARUNARATNE et al., 2011; MONTOYA et al., 2016; ADEBOYE et al., 2017).

A superestimação da CC para a cultivar AS3730 pode estar relacionada às particularidades dessa cultivar, pode apresentar maior capacidade de interceptação de luz do que as demais cultivares avaliadas (FERNANDES et al., 2018). Essa hipótese é corroborada por outros estudos que também verificaram diferenças na CC entre cultivares de soja (NUNES et al., 2015; BEZERRA et al., 2016).

As subestimativas decorreram da dificuldade do AquaCrop em estimar a taxa de aparecimento de folhas. A soja pode ter a taxa de aparecimento de folhas aumentado em resposta as condições ambientais favoráveis durante o período, o que não foi estimado no AquaCrop. Tendência similar foram verificadas para algodão (FAZIO et al., 2020), amendoim bambara (KARUNARATNE et al., 2011), batata (MONTOYA et al., 2016) e soja (WANG et al., 2021). A superestimativa da CC pode ocorrer também devido a rápida senescência foliar. Wijewardana et al. (2018) observaram senescência foliar acelerada e queda de folhas maduras sob estresse de umidade em duas cultivares de soja (Asgrow e Progeny).

4.1.2. ÁGUA NO SOLO

As simulações foram iniciadas com dados de entrada do solo padrões do AquaCrop, o que resultou em estimativas ruins de SWC conforme os indicadores RMSE, NRMSE, E e EF. Os valores foram superestimados em relação de dados medidos em campo (Figura 8). Os autores Paredes et al. (2014) e Ran et al. (2018) também encontraram diferenças na estimativa de SWC com a utilização dos dados padrões para cultura do milho. Sandhu; Irmak. (2019) consideram que o AquaCrop revisado em relação aos parâmetros de solo, pode melhorar o desempenho para simular a dinâmica da água no solo, em condições de estresse hídrico e não estressantes.

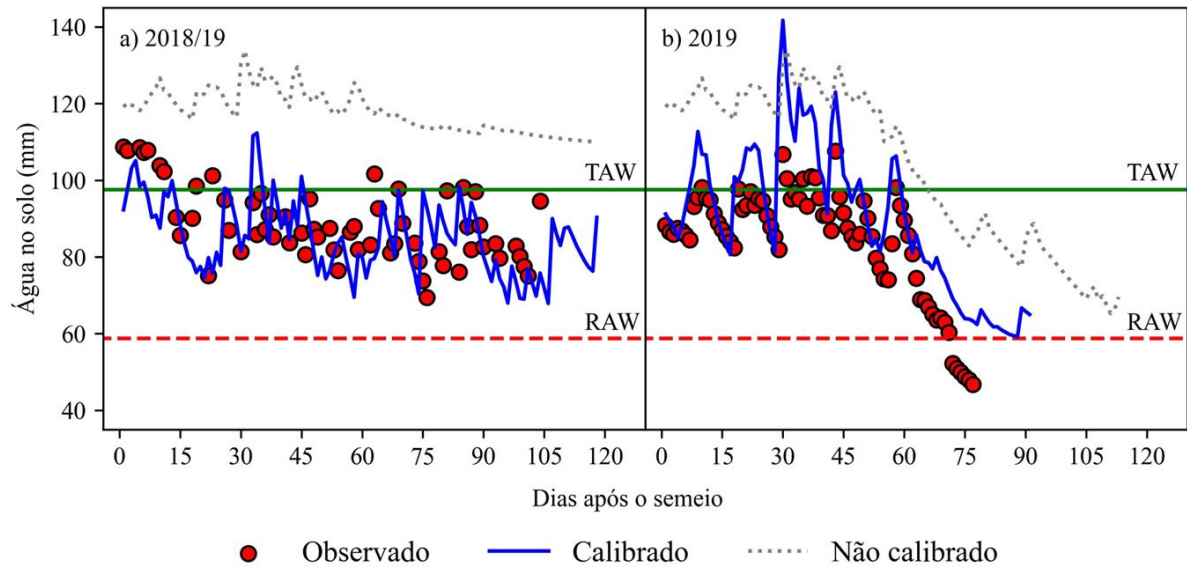


Figura 9. Água total disponível no solo (SWC, mm). A linha sólida verde corresponde ao SWC na capacidade de campo até a zona radicular (TAW, mm), e a linha tracejada vermelha corresponde à água prontamente disponível (RAW, mm).

Os erros de estimativas melhoraram utilizando os parâmetros calibrados, com valores indicando que a variabilidade das observações SWC, conforme indicado na tabela 7. Os baixos valores de RMSE (<14,01) e NRMSE (<16,60), são considerados bons. Esses resultados são consistentes com outros estudos que demonstram a importância da calibração de modelos de simulação para melhorar a precisão das estimativas de variáveis do solo e das culturas (MOLLAEI et al., 2019; ZHU et al., 2021). Além disso, a calibração do modelo pode ter fornecido informações valiosas sobre as relações entre os parâmetros do modelo e a precisão das estimativas. Por exemplo, a calibração pode ter mostrado que certos parâmetros do modelo estavam afetando negativamente a precisão das estimativas e, portanto, precisavam ser ajustados. Esse conhecimento pode ser útil para futuras simulações, permitindo ajustes mais precisos dos parâmetros do modelo para melhorar ainda mais a precisão das estimativas (MONTZKA et al., 2017).

Tabela 6. Indicadores estatísticos (eficiência da modelagem - EF, erro médio - E, raiz quadrada média do erro - RMSE e raiz quadrada média do erro normalizado - NRMSE) relativos à água no solo, observada e estimada com os parâmetros não calibrados e calibrados.

Parâmetros	RMSE	NRMSE	E	EF
	(mm)	%	(mm)	
Não calibrados	30,98	36,7	30,62	-3,68
Calibrados	14,01	16,6	10,64	0,04

O AquaCrop tem sido amplamente utilizado para simular a variação do conteúdo de água no solo em diversas culturas e condições climáticas em todo o mundo (RAJPUT et al., 2019; TAVAKOLI et al., 2020). No entanto, algumas limitações do modelo foram relatadas na literatura, incluindo a superestimação ou subestimação do SWC (SANCHEZ et al., 2021; XU et al., 2021). Em relação à superestimação do SWC, estudos anteriores também relataram achados semelhantes aos resultados obtidos neste estudo. Por exemplo, Paredes et al. (2014) e Toumi et al. (2016) relataram que o AquaCrop superestima o SWC durante o período de crescimento, o que pode ser devido à falta de consideração da evapotranspiração real na simulação do SWC. Além disso, a heterogeneidade do solo, como textura, estrutura e camadas de solo, pode afetar significativamente a precisão da estimativa do SWC pelo modelo (AHMADI et al., 2015).

Por outro lado, estudos relatam subestimação do SWC pelo AquaCrop. Araya et al. (2010) e Iqbal et al. (2014) descobriram que o AquaCrop geralmente estima SWC menor do que o observado, o que pode estar relacionado à inadequação do modelo em considerar o efeito das raízes na extração de água do solo e sua influência na evapotranspiração real (JANKOWSKI et al., 2019). Além disso, em um estudo de Liu et al. (2019), foi constatado que o AquaCrop tende a subestimar o SWC durante períodos de alta pluviosidade e superestimá-lo durante períodos de seca. Isso sugere que a precisão das estimativas de SWC do AquaCrop pode variar dependendo das condições climáticas da área de estudo.

4.1.3. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA

A comparação dos valores totais de ET_C observados e simulados (Não calibrado e calibrado) é apresentada na Tabela 8. O modelo teve um desempenho insatisfatório quando as simulações foram realizadas com parâmetros não calibrados, conforme indicado pelas altas diferenças absolutas e relativas (120 a 189 mm; 39,22% e 79,75%), respectivamente. Esses valores elevados encontrados na segunda safra podem ser explicados pelo encurtamento do ciclo de cultivo, pois a menor diferença entre os dados simulados e observados ocorreu na cultivar (BRS9383) com maior ciclo de cultivo (Tabela 5).

Tabela 7. Evapotranspiração da cultura total para os anos estudados com valores observados e simulados (não calibrado e calibrado).

Tratamentos	Observado (mm)	Parâmetros não calibrados			Parâmetros Calibrados		
		Simulado	Diferença		Simulado	Diferença	
		mm	mm	(%)	mm	mm	(%)
AS3730	261		165,00	63,22	270	9	3,45
BMX-POTÊNCIA	257		169,00	65,76	271	14	5,45
BRS9383	306	426,00	120,00	39,22	288	-18	-5,88
M6210	237		189,00	79,75	256	19	8,02
M6410	266		160,00	60,15	267	1	0,38

Os resultados indicaram um desempenho insatisfatório do modelo com os parâmetros não calibrados, visto que houve altas diferenças absolutas e relativas em as cultivares, o que pode ser atribuído às diferenças entre as condições locais e as condições padrão de cultivo do modelo. A necessidade de calibrar os parâmetros do modelo para cada local de cultivo é ressaltada na literatura (RAES et al., 2009; FERNÁNDEZ et al., 2011). Além disso, a diferença entre os dados simulados e observados foi menor na cultivar (BRS9383) com maior ciclo de cultivo. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que as cultivares com ciclos mais longos têm maior oportunidade de ajustar a taxa de crescimento em resposta às condições ambientais (ZHU et al., 2017), pode resultar em melhor estimativa da ET_C .

Outros estudos também destacam a importância da calibração dos parâmetros do AquaCrop para melhorar as estimativas de ET_C . Por exemplo, Almorox e De La Cruz (2016) relataram que a calibração do modelo melhorou significativamente as estimativas de ET_C para a cultura do tomate em uma região semiárida na Espanha. Além disso, Alemu et al. (2018) mostraram que a calibração do modelo melhorou significativamente as estimativas de ET_C para a cultura da cevada na Etiópia.

Os resultados encontrados nesta pesquisa são superiores aos relatados por Araya et al. (2017), que previram diferenças percentuais nos valores de ET_C entre 7% e 20% (45 a 148 mm) e sugeriram que esse baixo desempenho foi devido à correlação com entradas incompletas nas propriedades físicas do solo, medições limitadas de IAF e variação na densidade de plantio entre os tratamentos de irrigação. De acordo com Geerts et al. (2009), a evapotranspiração da cultura, quando estimada satisfatoriamente, influencia positivamente na calibração do modelo para o conteúdo de água no solo. Além disso, os resultados obtidos nesta pesquisa corroboram com outros estudos que relatam a necessidade de calibração do AquaCrop para obter estimativas mais precisas da ET_C em diferentes condições ambientais e para diferentes culturas (MIRZAEI et al., 2019).

4.1.4. BIOMASSA ACUMULATIVA NO CICLO

Durante a simulação com os valores padrões do modelo, os indicadores estatísticos, RMSE (0,77 a 7,70 t ha⁻¹) e NRMSE, apresentaram valores altos, indicando uma diferença significativa entre os valores simulados e observados (Figura 9). Além disso, os valores de EF foram baixos, indicando que o modelo não conseguiu explicar a variabilidade dos dados observados. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Chavas et al. (2018) e Bannayan et al. (2013), que observaram que os modelos de simulação de culturas apresentam desempenho insatisfatório na estimativa da biomassa, principalmente em regiões com condições climáticas variáveis.

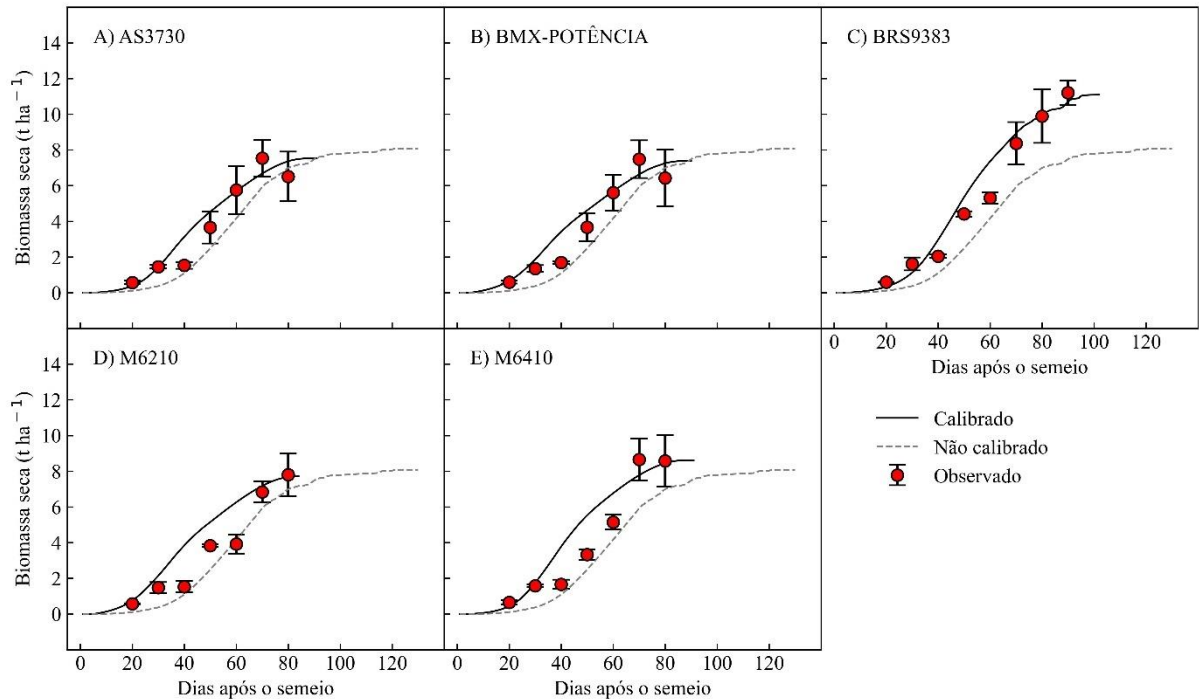


Figura 10. Biomassa acumulada simulada e observado (as barras de erro referem-se ao desvio padrão das observações em campo) para diferentes cultivares de soja, em condição de sequeiro, no ano de 2019.

A EF na simulação de biomassa com valores calibrados foi satisfatória para ambas as cultivares, resultando em valores superiores a 0,90. Os erros de estimativa foram aceitáveis para a segunda safra ($1,37 \text{ t ha}^{-1} < \text{RMSE} < 0,83 \text{ t ha}^{-1}$; $21,50\% < \text{NRMSE} < 36,93\%$; $0,05\% < E < 1,00\%$) para essas previsões, devido à alta EF do modelo na simulação de biomassa (Tabela 9). Os resultados discutidos acima indicam que valores não calibrados podem levar a grandes

imprecisões nos cálculos com acúmulo de biomassa, destacando a necessidade de uma revisão adequada.

Tabela 8. Indicadores estatísticos (eficiência da modelagem - EF, erro médio - E, raiz quadrada média do erro - RMSE e raiz quadrada média do erro normalizado - NRMSE) relativos à curva de biomassa ao longo do ciclo observada e estimadas com parâmetros não calibrados e calibrados.

Parâmetros	Tratamentos	RMSE (t ha ⁻¹)	NRMSE %	E (t ha ⁻¹)	EF
Não calibrados	AS3730	1,12	29,02	-0,72	0,81
	BMX-POTÊNCIA	1,10	28,80	-0,70	0,81
	BRS9383	1,73	31,86	-1,59	0,79
	M6210	0,77	20,75	-0,58	0,91
	M6410	1,30	30,81	-1,10	0,82
Calibrados	AS3730	0,83	21,50	0,31	0,90
	BMX-POTÊNCIA	0,89	23,30	0,47	0,88
	BRS9383	1,30	23,94	0,05	0,91
	M6210	1,37	36,93	1,00	0,72
	M6410	1,35	31,99	0,70	0,81

A subestimação da biomassa pode estar relacionada à subestimação da transpiração da cultura, que afeta diretamente a produção de biomassa. De acordo com Jana et al. (2018), a transpiração é um fator importante que afeta a produção de biomassa, uma vez que a água é essencial para a fotossíntese e, conseqüentemente, para a produção de biomassa. Além disso, a variabilidade no conteúdo de água do solo, que afeta diretamente a transpiração, também pode ter contribuído para as diferenças observadas entre os valores simulados e observados (JANA et al., 2018).

Os valores baixos de EF encontrados nas simulações sem calibração indicam que o modelo apresentou dificuldade em reproduzir a variação temporal da biomassa, especialmente em momentos críticos do ciclo da cultura, como no início da fase reprodutiva. Esses resultados estão de acordo com o estudo de Meza et al. (2018), que também encontraram baixos valores de EF na simulação de biomassa de milho com o modelo AquaCrop-OS no México. De acordo com os autores, a falta de calibração dos parâmetros do modelo para as condições locais foi um dos fatores que afetaram o desempenho do modelo.

4.1.5 RENDIMENTO DE GRÃOS E BIOMASSA NA COLHEITA

O rendimento de grãos (Y) observados, foram usadas para testar as previsões do AquaCrop. A maior produtividade foi obtida com a cultivar AS3730 (6,19 t ha⁻¹), enquanto a menor foi 2,33 t ha⁻¹, com a cultivar BRS9383. As diferenças no rendimento de grãos podem estar relacionadas às temperaturas diurnas e noturnas, conforme discutido por Tao et al. (2008), ou seja, altas temperaturas durante o estágio de crescimento reprodutivo, diferenças no manejo da cultura também podem ter contribuído para diferenças no rendimento. Além disso, as cultivares mais precoces, de grupo de maturação inferior a oito, podem apresentar florescimento precoce, o que reduz o tamanho das plantas, o acúmulo de biomassa seca e o rendimento de grãos (ZANON et al. 2015).

O rendimento de grãos simulado com os dados não calibrados em ambas as safras, apresentaram diferenças relativas elevadas variando de -45,92% (-1,66 t ha⁻¹) a -15,81% (-0,37 t ha⁻¹). Por outro lado, quando é utilizado os valores calibrados todos os tratamentos, apresentaram uma diminuição na diferença entre os rendimentos observados e simulados chegando a zero (Tabela 10).

Tabela 9. Diferença absoluta e relativo entre o rendimento de grãos observado para os anos analisados com valores observados e simulados (Não calibrado e calibrado).

Cultivares	Observado (t ha ⁻¹)	Parâmetros não calibrados			Parâmetros Calibrados		
		Simulado	Diferença		Simulado	Diferença	
		(t ha ⁻¹)	(t ha ⁻¹)	(%)	(t ha ⁻¹)	(t ha ⁻¹)	(%)
AS3730	2,63	1,96	-0,67	-25,52	2,63	0,00	0,10
BMX-POTÊNCIA	3,03	1,96	-1,07	-35,34	3,03	0,00	-0,04
BRS9383	2,33	1,96	-0,37	-15,81	2,32	-0,01	-0,30
M6210	2,77	1,96	-0,81	-29,16	2,78	0,01	0,45
M6410	3,62	1,96	-1,66	-45,92	3,62	0,00	-0,03

Os modelos podem superestimar as produtividades simuladas, visto que o modelo foi desenvolvido para simular a produtividade que pode ser obtida na teoria, sem considerar, pragas e doenças, e efeito do fotoperíodo no desenvolvimento da soja e, leva ao acréscimo ou redução na estimativa da produtividade para datas de plantio precoce e tardia (AKUMAGA et al., 2017; BATTISTI et al., 2017). No geral, os resultados mostram a adequação da parametrização adotada do AquaCrop para previsões de biomassa de soja e rendimento de grãos, portanto, uma boa capacidade de previsão do modelo; entretanto, a obtenção desses resultados exigiu uma parametrização adequada.

A simulação da biomassa aérea final colhida mostrou uma tendência de superestimativa, variando de 1,88% (0,21 t ha⁻¹) a 3,94% (52,74 t ha⁻¹) em relação ao final observado (Tabela 11). As simulações com dados calibrados, obtidos a partir de medidas de campo, apresentaram

uma diferença relativa próxima de zero, indicando uma melhor adequação do modelo à realidade. Esses resultados estão de acordo com estudos anteriores que mostram a importância da calibração de modelos para garantir uma boa precisão nas simulações (REICHL et al., 2019; ZADEH et al., 2020).

Tabela 10. Diferença absoluta e relativo entre a Biomassa final para cultivares estudadas com valores observados e simulados (Não calibrado e calibrado).

Ano	Cultivares	Observado (t ha ⁻¹)	Parâmetros não calibrados			Parâmetros Calibrados		
			Simulado (t ha ⁻¹)	Diferença		Simulado (t ha ⁻¹)	Diferença	
				(t ha ⁻¹)	(%)		(t ha ⁻¹)	(%)
2019	AS3730	7,53	11,41	3,88	51,53	7,53	0,00	0,00
	BMX-POTÊNCIA	7,47	11,41	3,94	52,74	7,39	-0,08	-1,07
	BRS9383	11,20	11,41	0,21	1,88	11,09	-0,11	-0,98
	M6210	7,79	11,41	3,62	46,47	7,71	-0,08	-1,03
	M6410	8,65	11,41	2,76	31,91	8,62	-0,03	-0,35

4.2. SIMULAÇÕES DAS PRODUTIVIDADES NAS ÉPOCAS DE SEMEADURA

A precipitação média anual total da normal meteorológica de quarenta e nove anos (1973 a 2022) foi 1.756,24 mm e o período de semeio entre os meses de março a agosto representaram 1.351,92 mm (76,94%) da chuva. A segunda quinzena de maio foi a mais chuvosa (158,02 mm; 9,0%), e a primeira quinzena de março foi a menos chuvosa (17,23 mm; 0,98%), com valor médio quinzenal anual de 66,58 mm (Figura 10).

A disponibilidade hídrica é um fator crucial para o desenvolvimento das culturas agrícolas, e a precipitação é uma das principais fontes de água no solo. No entanto, a variabilidade da precipitação ao longo do tempo e do espaço pode afetar significativamente a produção agrícola. De acordo com Leite et al. (2020), a variabilidade da precipitação pode levar a perdas significativas de produtividade em culturas como o milho e a soja. Portanto, o monitoramento contínuo da precipitação é importante para ajustar as estratégias de manejo das culturas e minimizar as perdas de produção.

A ET₀ média anual total foi 1.431,34 mm e os totais quinzenais variaram entre 40,93 mm (segunda quinzena de junho) a 79,35 mm (primeira quinzena de dezembro), com média anual de 62,26 mm. As condições térmicas foram favoráveis para o crescimento e desenvolvimento da cultura da soja, na faixa ideal entre 20 e 30 °C (BASTTISTI e SENTELHAS, 2014).

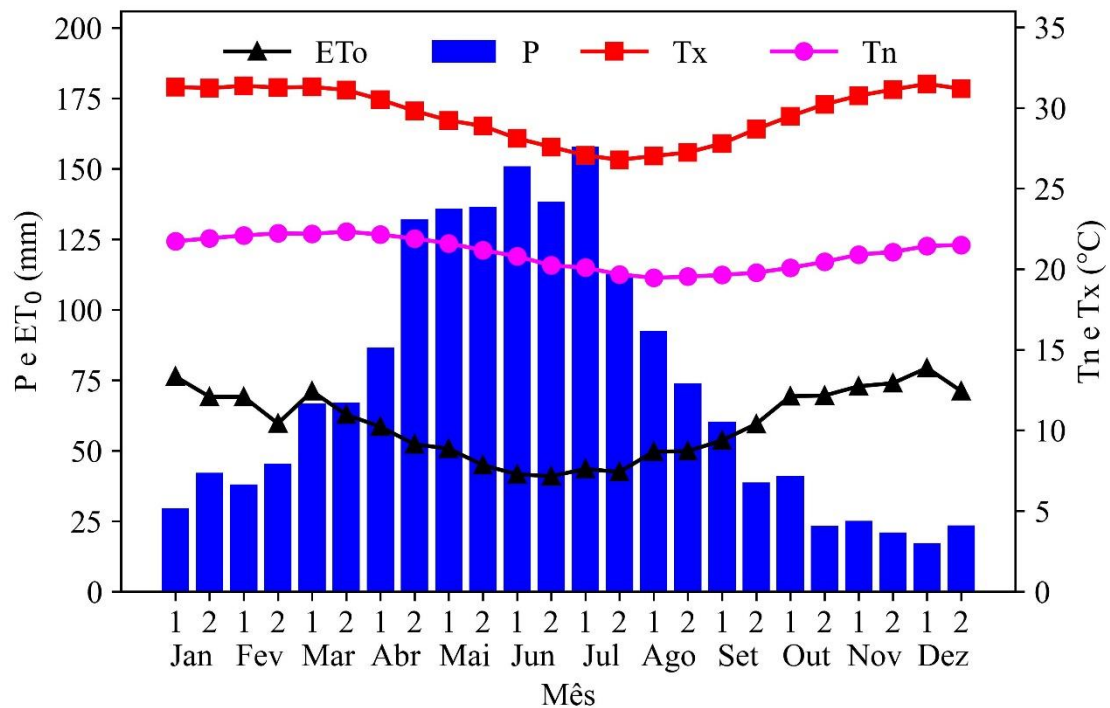


Figura 11. Médias da evapotranspiração de referência (ET_0), precipitação (P), temperatura do ar mínima (T_n) e máxima (T_x), para a normal meteorológica de quarenta e seis anos (1973 a 2018), em Rio Largo, AL.

A produtividade da cultura da soja é altamente influenciada pelas datas de semeadura, como demonstrado na Figura 11. A variabilidade interanual da produtividade da soja foi minimizada quando a semeadura ocorreu entre as épocas 4 e 8 (16 de abril a 1 de julho), coincidindo com as maiores produtividades simuladas. Por outro lado, a semeadura antecipada para março e atrasada após 16 de julho resultaram em perdas de rendimento. Estes resultados estão em concordância com outros estudos que também apontam a influência das datas de semeadura na produtividade da soja (FANCELLI e DOURADO-NETO, 2013; RABELO et al., 2019).

Diversos estudos têm evidenciado a importância da época de semeadura na produtividade da soja. De acordo com Almeida et al. (2019), o atraso na semeadura da soja pode resultar em diminuição da produtividade, em decorrência da redução no número de vagens por planta. Por outro lado, semeaduras muito precoces podem resultar em problemas de germinação e estande, além de aumentar a exposição da cultura a estresses abióticos (Farias et al., 2020).

Outro fator que deve ser considerado é a adaptação das cultivares à época de semeadura. De acordo com Nunes Júnior et al. (2018), a escolha da cultivar adequada à época de semeadura pode resultar em maior produtividade. Além disso, segundo Rosa et al. (2021), cultivares com

menor ciclo pode ser mais indicadas para semeaduras mais tardias, enquanto cultivares com maior ciclo podem ser mais adaptadas a semeaduras mais precoces.

Além disso, a utilização do modelo AquaCrop para simular a produtividade de culturas agrícolas tem sido amplamente explorada em diferentes regiões do mundo, incluindo o Brasil (NUNES et al., 2019; SILVA et al., 2020; SOUZA et al., 2021). Em um estudo realizado por Nunes et al. (2019), o AquaCrop foi utilizado para avaliar o risco climático e o desempenho do modelo na simulação da produtividade de feijão-caupi na região Nordeste do Brasil. Os resultados mostraram que o modelo é sensível à sazonalidade e consistente na previsão da produtividade, embora ainda precise ser validado em campo.

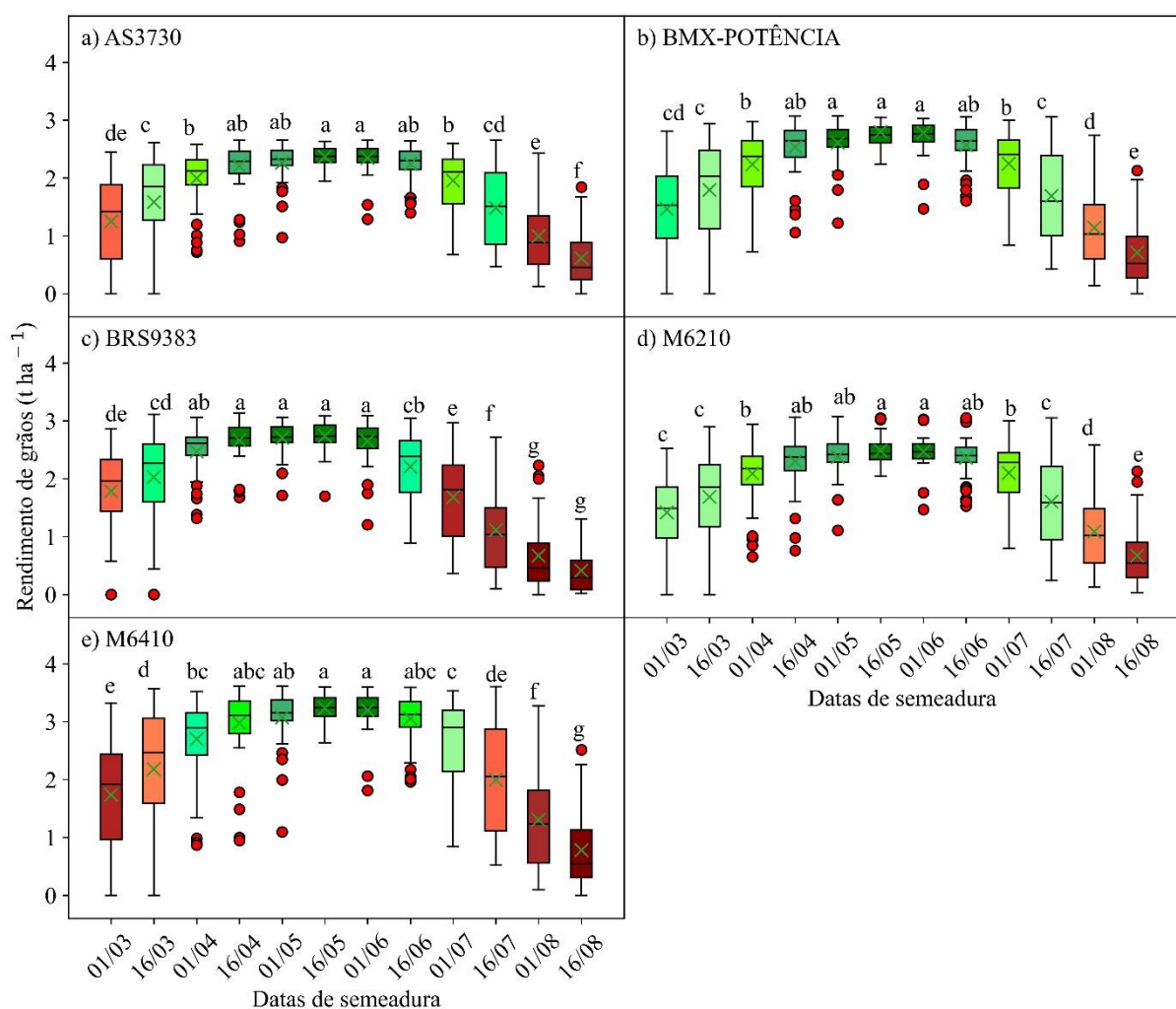


Figura 12. Variabilidade interanual do rendimento de grãos em diferentes épocas de semeadura para cultivares de soja, simulados em 49 anos (1973 - 2022), nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. As barras de erros apresentam a variação do conjunto de dados para cada data de semeadura. Letras e cores diferentes para mesma cultivar representam estatisticamente diferença significativa (Tukey, $P < 0,05$).

A Tabela 12 apresenta o percentual de redução na produtividade de grãos das cultivares de soja avaliadas, considerando a época de semeadura com a maior produtividade simulada como referência. Verifica-se que as cultivares AS3730, BMX-POTÊNCIA, M6210 e M6410, que possuem ciclos de cultivo mais curtos (Tabela 4), apresentaram resultados semelhantes em relação às épocas de semeadura, com maiores produtividades simuladas ocorrendo entre as épocas 4 e 8 (16 de abril a 1 de julho). Já a cultivar BRS9383, com ciclo de cultivo mais tardio, apresentou menores reduções no rendimento de grãos nas primeiras épocas de semeadura, tendo sua maior produtividade simulada ocorrido na 5ª época (1º de maio). No entanto, em semeaduras mais tardias, a BRS9383 sofreu maiores reduções na produtividade, sendo prejudicada por períodos mais longos de seca.

Tabela 11. Percentual de redução na produtividade de grãos nas épocas de semeadura de soja, no período entre 1973 - 2018 (46 anos), nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas.

EP*	AS3730			BMX-POTÊNCIA			BRS9383			M6210			M6410		
	Y		Diferença	Y		Diferença	Y		Diferença	Y		Diferença	Y		Diferença
	--(t ha ⁻¹)--		%	--(t ha ⁻¹)--		%	--(t ha ⁻¹)--		%	--(t ha ⁻¹)--		%	--(t ha ⁻¹)--		%
1	1,25	1,12	47,40	1,47	1,33	47,55	1,78	0,96	34,94	1,42	1,06	42,79	1,74	1,50	46,29
2	1,58	0,79	33,16	1,79	1,00	35,78	2,03	0,71	26,05	1,69	0,80	32,09	2,18	1,05	32,58
3	2,00	0,37	15,71	2,24	0,56	20,00	2,47	0,27	9,91	2,09	0,40	15,91	2,70	0,53	16,48
4	2,21	0,16	6,86	2,54	0,26	9,22	2,66	0,08	2,82	2,30	0,18	7,39	2,98	0,26	7,93
5	2,26	0,11	4,53	2,60	0,19	6,82	2,74	0,04	1,30	2,38	0,11	4,31	3,07	0,16	4,98
6	2,37	0,00	0,00	2,79	0,00	0,00	2,71	0,00	0,00	2,48	0,00	0,00	3,23	0,00	0,00
7	2,35	0,02	0,98	2,78	0,01	0,49	2,65	0,09	3,30	2,47	0,02	0,63	3,20	0,03	1,00
8	2,24	0,13	5,43	2,57	0,23	8,17	2,21	0,53	19,45	2,37	0,12	4,75	3,05	0,18	5,56
9	1,96	0,41	17,44	2,24	0,55	19,70	1,68	1,06	38,68	2,10	0,39	15,56	2,65	0,59	18,12
10	1,48	0,89	37,41	1,69	1,11	39,63	1,11	1,63	59,43	1,60	0,88	35,39	1,99	1,24	38,33
11	0,99	1,38	58,12	1,14	1,66	59,27	0,67	2,07	75,58	1,08	1,40	56,39	1,30	1,93	59,68
12	0,62	1,75	73,99	0,71	2,09	74,65	0,41	2,33	84,98	0,67	1,81	72,95	0,78	2,45	75,81

*EP – Época de semeadura; Y – Produtividade de grãos simulada; representa a maior produtividade simulada por cultivar; % - Percentual de redução na produtividade para cada cultivar.

O uso de modelos de simulação de culturas para avaliar o impacto de diferentes épocas de semeadura na produtividade da soja é uma prática comum na pesquisa agrônômica. Diversos estudos encontraram resultados semelhantes aos apresentados na Tabela 12, em que cultivares com ciclos mais curtos de cultivo tendem a apresentar maiores produtividades quando semeadas em épocas intermediárias (AMARAL et al., 2018; ANDRADE JUNIOR et al., 2020). Já para cultivares com ciclos mais longos, semeaduras mais precoces tendem a ser mais favoráveis, devido ao menor risco de estresse hídrico durante a fase reprodutiva (ROSOLEM et al., 2020).

Além disso, é importante considerar a interação entre época de semeadura e condições climáticas locais. Em regiões com chuvas bem distribuídas ao longo do ciclo da cultura, as diferenças de produtividade entre épocas de semeadura tendem a ser menores (PIRES et al., 2019). Já em regiões com sazonalidade mais marcada, as épocas de semeadura mais tardias podem ser prejudicadas por períodos mais longos de seca, como observado para a cultivar BRS9383 no estudo em questão.

Esses resultados corroboram com outros estudos que apontam a influência da época de semeadura na produtividade da soja. De acordo com Oliveira et al. (2018), a época de semeadura é um fator chave para o sucesso da cultura da soja, podendo afetar significativamente a produtividade. Além disso, Vieira et al. (2020) destacam que a escolha da cultivar adequada para cada época de semeadura é fundamental para obter altas produtividades. Nóia Junior et al. (2020) constataram em algumas localidades que a antecipação da semeadura da soja provocou perdas acima de $0,5 \text{ t ha}^{-1}$, e o plantio tardio causou perdas superiores a $1,5 \text{ t ha}^{-1}$. Paredes e Torres, (2016) avaliando com o AquaCrop o manejo da cultura da ervilha em várias épocas de semeadura, verificaram que os rendimentos diminuíram com a semeadura tardia devido à distribuição das chuvas e temperatura.

5. CONCLUSÃO

O modelo AquaCrop simula as variáveis de crescimento e produção das cinco cultivares de soja satisfatoriamente, quando realizada a parametrização e calibração para as condições edafoclimáticas locais. No entanto, o modelo para simulação da água no solo apresentou desempenho inferior à simulação da produtividade.

Considerando o período de março a agosto, as melhores épocas de semeadura da cultura da soja vão de abril a primeira quinzena de julho. As épocas de antecipadas para março (1^a e 2) e atrasadas para agosto (11^a e 12^a) proporcionam redução na produtividade.

1169 **RECOMENDAÇÕES FUTURAS**

1170

1171 Os resultados deste estudo indicam a eficiência do uso do modelo AquaCrop para a
1172 região nas condições testadas. No entanto, para aumentar a robustez do modelo e assim,
1173 aprimorar a ferramenta para uso no manejo agrícola nas propriedades rurais, recomenda-se para
1174 futuras pesquisas a aplicação do modelo para outras condições ambientais, cultivares,
1175 topografia, tipo de solo e manejo da cultura.

1176

REFERÊNCIAS

- ABI SAABA, M. T.; TODOROVICB, M.; ALBRIZIOC, R. Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes. Does calibration year influence the performance of crop growth models? **Agricultural Water Management**. v. 147, p. 21–33, 2015.
- ADDISCOTT, T.; SMITH, J.; BRADBURY, N. Critical evaluation of models and their parameters. **Journal of Environmental Quality**, v.24, p.803–807, 1995.
- ADEBOYE, O. B.; SCHULTZ, B.; ADEKALU, K. O.; PRASAD, K. C. Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max* L. merr) in Ile-Ife, Nigeria. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 1130-1146, 2019.
- ADEBOYE, O.B.; SCHULTZ, B.; ADEKALU, K.O.; PRASAD, K. Modelling of response of the growth and yield of soybean to full and deficit irrigation by using AquaCrop. **Irrig. Drain.** 66, 192–205, 2017.
- AGRAWAL, R.; GHOSH, S.; SAHA, U. K. Calibration and validation of AquaCrop model for maize crop under semi-arid region of Eastern India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(3), 1065-1080, 2019.
- AHMADI, S. H. et al. Evaluation of AquaCrop model for deficit irrigation management in a dry region: A case study. *Agricultural Water Management*, v. 158, p. 60-72, 2015.
- AHMADI, S. H.; MOSALLAEPOUR, E.; KAMGAR-HAGHIGHI, A. A.; SEPASKHAH, A. R. Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. **Water Resources Management**. v. 29, n. 8, p. 2837-2853, 2015.
- AKUMAGA, U.; TARHULE, A.; YUSUF, A. A. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 225-234, 2017.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., & SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, 1998.

- 1205 ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration**. Guidelines
1206 for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome,
1207 Italy, pp. 300, 1998.
- 1208 ALLIPRANDINI, L. F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P.F.; CAVASSIM, J. Understanding
1209 soybean maturity groups in Brazil: environment, cultivar classification, and stability. **Crop**
1210 **Science**, v.49, p.801-808, 2009.
- 1211 ALMEIDA, J. P.; FERREIRA, R. C.; SANTOS, L. S.; SANTOS, C. A. M. Alterações
1212 morfológicas em plantas de soja submetidas à semeadura tardia. Revista Brasileira de
1213 Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 23, n. 2, p. 105-110, 2019.
- 1214 AMARAL, J. F. T. et al. Melhor época de semeadura de soja em sucessão à aveia preta e azevém
1215 em sistema de plantio direto. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 22, n.
1216 8, p. 561-567, 2018.
- 1217 ANDRADE JUNIOR, A. S. et al. Adaptability and stability of soybean cultivars in a tropical
1218 environment. Ciência e Agrotecnologia, v. 44, p. 1-9, 2020.
- 1219 ARAYA, A. et al. Water productivity of maize under different tillage and water regimes in a
1220 semi-arid region. Agricultural Water Management, v. 97, n. 9, p. 1359-1366, 2010.
- 1221 ARAYA, A., KEESSTRA, S.D., STROOSNIJDER, L. Simulating yield response to water of
1222 Teff (*Eragrostis tef*) with FAO's AquaCrop model. **Field Crops Res.** 116 (1–2), 196–204,
1223 2010.
- 1224 ARAYA, A.; KISEKKA, I.; HOLMAN, J. Evaluating deficit irrigation management strategies
1225 for grain sorghum using AquaCrop. Irrig. Sci. 34, 465–481. [http://dx.doi.org/10.1007/s00271-](http://dx.doi.org/10.1007/s00271-016-15-7)
1226 016-15-7, 2016.
- 1227 ARAYA, A.; KISEKKA, I.; VARA PRASAD, P.V.; GOWDA, P.H. Evaluating optimum
1228 limited irrigation strategies for corn production in the Ogallala Aquifer region. J. Irrig. And
1229 Drain. Eng., ASCE. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001228](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001228). ISSN 0733-9437.,
1230 2017.
- 1231 ARAYA, A.; POBLETE, T.; ACEVEDO, E.; OYARZUN, R. Modelación del cultivo de la
1232 cebada (*Hordeum vulgare* L.) mediante el modelo AquaCrop. Idesia (Arica), 35(1), 17-27,
1233 2017.

- 1234 BANNAYAN, M., HOOGENBOOM, G., REDDY, V. R., & SINGH, U. Evaluation of CSM-
1235 CERES-Maize model for crop and soil management decisions. *European Journal of Agronomy*,
1236 50, 21-29, 2013.
- 1237 BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. New agroclimatic approach for soybean sowing dates
1238 recommendation: A case study. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.
1239 18, n. 11, p. 1149-1156, 2014. [https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n11p1149-](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n11p1149-1156)
1240 1156.
- 1241 BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of
1242 soybean crop simulation models and their ensemble in Southern Brazil. **Field Crops Research**,
1243 v. 200, p. 28-37, jan. 2017.
- 1244 BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Sensitivity and requirement of
1245 improvements of four soybean crop. **International Journal of Biometeorology**. v.62, páginas
1246 823–832, 2018.
- 1247 BARBOSA, WEMERSON SAULO DA SILVA; LYRA, GUILHERME BASTOS ;
1248 MAGALHÃES, IVOMBERG DOURADO ; FERREIRA JÚNIOR, RICARDO ARAÚJO ;
1249 TEODORO, IÊDO ; SOUZA, JOSÉ LEONALDO DE . Componentes de produção de soja no
1250 tabuleiro costeiro de alagoas em cultivos de sequeiro e irrigado. **IRRIGA** (UNESP. CD-ROM),
1251 v. 26, p. 906-923, 2021.
- 1252 BARBOSA, W. S. S.; LYRA, G. B. ; MAGALHAES, I. D. ; SOUZA, J. L. ; TEODORO, I. P.
1253 O. ; LOPES, J. H. ; SANTOS, J. W. S. . Modelling of the growth and productivity of soy
1254 cultivars under irrigation and rainfed conditions. **REVISTA DE CIÊNCIAS**
1255 **AGROVETERINÁRIAS**, v. 21, p. 370-383, 2022.
- 1256 BELETSE, Y.G., LAURIE, R., DU PLOOY, C.P., VAN DEN BERG, A., LAURIE, S., 2011.
1257 Calibration and validation of AquaCrop model for orange fleshed sweet potatoes. In:
1258 Ardakanian, R., Walter, T. (Eds.), *Capacity Development for Farm Management Strategies to*
1259 *Improve Crop Water Productivity using AquaCrop: Lessons Learned*. UNW-DPC Publication
1260 Series, **Knowledge** No. 7, Bonn, Germany.
- 1261 BELLO, Z.A.; WALKER, S.; TFWALA, C.M. Predicting Pearl millet response to water under
1262 South African climatic conditions. In: Ardakanian, R., Walter, T. (Eds.), *Capacity Development*

- for Farm Management Strategies to Improve Crop Water Productivity using AquaCrop: Lessons Learned. UNW-DPC Publication Series, **Knowledge** No. 7, Bonn, Germany, 2011.
- BOORMAN, E. D.; BEHRENS, T. E.; WOOLRICH, M. W.; RUSHWORTH, M. F. How green is the grass on the other side? Frontopolar cortex and the evidence in favor of alternative courses of action. **Neuron**, v. 62, n. 5, p. 733-743, 2009.
- BRISSON, N.; RUGET, F.; GATE PH LORGEOU, J.; NICOULLAUD, B.; TAYOT, X.; PLENET, D.; JEUFFROY, M.H.; BOUTHIER, A.; RIPOCHE, D.; MARY, B.; JUSTES, E. STICS a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie*, 22. 69-22, 2002.
- CARMO, E. L.; BRAZ, G. B.P.; SIMON, G. A.; DA SILVA. A.G.; ROCHA, A. G. C. Desempenho agrônômico da soja cultivada em diferentes épocas e distribuição de plantas. **Rev. Ciênc. Agrovet.**17(1): 2018. DOI: 10.5965/223811711712018061.
- CARVALHO A. L.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; PORFIRIO, A. C. S. Ocorrência de períodos secos na região de Rio Largo, Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.2, 173 - 180, 2013.
- CARVALHO, O. M.; Classificação e caracterização físico-hídrica de solos de Rio Largo, cultivados com cana-de-açúcar. 2003. P.74 (Dissertação mestrado em agronomia – Rio Largo: Universidade Federal de Alagoas, 2003.
- CAVASSIM, J. E.; ALLIPRANDINI, L. F.; DE OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; GUERRA, E. P. stability of soybean genotypes and their classification into relative maturity groups in Brazil. **American Journal of Plant Sciences**, v. 4, p. 2060-2069, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2013.411258>.
- CHAVAS, J. P., LI, X., ORTEGA, D. L., & RICHARDSON, J. W. Estimating crop yields with deep learning and remotely sensed data. *PloS one*, 13(6), e0198637, 2018.
- CHIBARABADA, T.; MODI, A.; MABHAUDHI, T. Calibration and evaluation of aquacrop for groundnut (*Arachis hypogaea*) under water deficit conditions. **Agric. For. Meteorol.** v.281, p.1–8, 2020.

- 1290 CRUZ, T. V.; PEIXOTO, C. P.; MARTINS, M. C. Crescimento e produtividade de soja em
1291 diferentes épocas de semeadura no oeste da Bahia. **Scientia Agraria**, Londrina – PR, v. 11, n.
1292 1, p. 33-42, 2010.
- 1293 DIAS, J. P. T. **Ecofisiologia de culturas agrícola**. Belo Horizonte: Ed. UEMG, 169 p. 2018.
- 1294 DIAS, P. P.; SOUSA, F. G. da; SILVA, P. R. A.; CORREIA, T. P. S. da; GOMES, A. R. A.
1295 de. A profundidade de semeadura da soja na plantabilidade. **Energia na Agricultura**, Botucatu,
1296 v. 35, n. 2, p. 150-157, 2020.
- 1297 DOORENBOS I.; KASSAM, A.H. Resposta de rendimento à água. Artigo de irrigação e
1298 drenagem da FAO Nº 33, **FAO**, Roma, 1979.
- 1299 ECKARDT, N. A.; COMINELLI, E. The future of science: food and water for life. **Plant Cell**,
1300 v.21, p. 368–372, 2009 <https://doi.org/10.1105/tpc.109.066209>.
- 1301 FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. Soybean yield as influenced by sowing date.
1302 *Scientia Agrícola*, 70(5), 337-342, 2013.
- 1303 FARAHANI, H.J.; IZZI, G.; OWEIS, T.Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop
1304 model for full and deficit irrigated cotton. **Agron. J.** 101, 469–476, 2009.
- 1305 FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A.
1306 *Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola*. 1. ed. Brasília:
1307 INMET, p.263-277, 2009.
- 1308 FARIAS, J. R. B.; VIEIRA, L. M.; SILVA, J. M.; RIBEIRO, M. F. Desempenho de genótipos
1309 de soja sob diferentes épocas de semeadura em sistema de plantio direto. *Revista Brasileira de*
1310 *Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 3, p. 161-166, 2020.
- 1311 FAZIO, S. et al. Assessing the AquaCrop model in simulating cotton growth and yield under
1312 different irrigation regimes in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*,
1313 v. 231, p. 106026, 2020.
- 1314 FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. Stages of soybean development. Ames: Iowa State University
1315 of Science and Technology, 1977. 11 p. (Special Report 80).
- 1316 FERNANDES, T. J. C.; SOUSA, E. F.; CRUZ, F. F.; LIMA, G. A. S.; LUCENA, A. M. A.;
1317 CARVALHO, D. F. Calibration and validation of AquaCrop model for sweet sorghum under
1318 semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 217, 307-315, 2019.

- 1319 FERRAZ, R. L. DE S.; MELO, A. S. DE; SUASSUNA, J.F.; BRITO, M.E.B. DE;
 1320 FERNANDES, P. D.; NUNES JÚNIOR, E. DA S. Trocas gasosas e eficiência fotossintética
 1321 em ecótipos de feijoeiro cultivados no semiárido. **Pesqui. Agropecuária Trop.** 42, 181–188,
 1322 2012. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632012000200010>.
- 1323 FERREIRA JÚNIOR, R. A.; SOUZA J. L.; ESCOBEDO J. F.; TEODORO I.; LYRA G. B. et
 1324 al. Cana de açúcar com irrigação por gotejamento em dois espaçamentos entrelinhas de plantio.
 1325 **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v. 18, p. 798-804, 2014.
- 1326 FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Influência do El Niño oscilação sul (ENOS) sobre a
 1327 precipitação do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5,
 1328 p.127-132, 1997.
- 1329 FOSTER, T.; BROZOVIĆ, N.; BUTLER, A. P.; NEALE, C. M. U.; RAES, D.; STEDUTO, P.;
 1330 FERERES, E.; HSIAO, T. C. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water
 1331 productivity model. **Agricultural Water Management**, v. 181, p. 18-22, 2017.
- 1332 FREITAS, M. C. M.; HAMAWAKI, O. T.; BUENO, M. R.; MARQUES, M. C. Época de
 1333 semeadura e densidade populacional de linhagens de soja UFU de ciclo semitardio. **Bioscience**
 1334 **Journal**, Uberlândia, v.26, n.5, p.698-708, 2010.
- 1335 GEERTS, S.; RAES, D.; GARCIA, M.; MIRANDA, R.; CUSICANQUI, J. A.; TABOADA,
 1336 C.; MENDOZA, J.; HUANCA, R.; MAMANI, A.; CONDORI, O.; MAMANI, J.; MORALES,
 1337 B.; OSCO, V.; STEDUTO, P. Simulating yield response of Quinoa to water availability with
 1338 AquaCrop. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 499-508, 2009.
- 1339 GEERTS, S.; RAES, D.; GARCIA, M.; VACHER, J. Yield response of rainfed maize to soil
 1340 water content and crop coefficient with application to Morocco. **Agricultural Water**
 1341 **Management**, 96(5), 790-798, 2009.
- 1342 HACKENHAA, N.M.; PELUZIO, J.M.; LIMA, M.D.; HACKENHAAR, C.; CARVALHO,
 1343 E.V.; AFFÉRRI, F.S.; MANDARINO, J.M.G. Potássio e época de semeadura em cultivares
 1344 de soja para teor de óleo e proteína. **Acta Iguazu**, Cascavel, v.8, n.2, p. 1-11, 2019.
- 1345 HE, L.; CHEN, J. M.; LIU, J.; BÉLAIR, S.; LUO, X. Assessment of SMAP soil moisture for
 1346 global simulation of gross primary production. **Journal of Geophysical Research:**
 1347 **Biogeosciences**, Washington, v. 122, n.1, p. 1549-1563, 2017.

- 1348 HSIAO, T.C.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E.
 1349 Aquacrop the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and
 1350 testing for maize. **Agron. J.** 101, 448–459, 2009. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>.
- 1351 HUSSEIN, F.; JANAT, M.; YAKOUB, A. Simulating cotton yield response to deficit irrigation
 1352 with the FAO AquaCrop model. *Span. J. Agric. Res.* 9 (4), 1319–1330, 2011.
- 1353 IQBAL, M.A.; SHEN, Y.; STRICEVIC, R.; PEI, H.; SUN, H.; AMIRI, E.; PENAS, A.; RIO,
 1354 S. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under
 1355 deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. **Agric. Water Manag.** 135,
 1356 61–72, 2014.
- 1357 JAMIESON, P.D.; PORTER, J.R.; WILSON, D.R. A test of computer simulation model ARC-
 1358 WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Res.* 27, 337–350, 1991.
- 1359 JANA, S., SAHOO, R. N., & HATI, K. M. Model parameterization for maize growth. In
 1360 *Modelling and Simulation in Agriculture* (pp. 79-100). Springer, Singapore, 2018.
- 1361 JANKOWSKI, K. J. et al. Root distribution and water uptake of maize under different irrigation
 1362 treatments estimated by AquaCrop and capacitance probes. *Agricultural Water Management*,
 1363 v. 216, p. 1-12, 2019.
- 1364 JIANG, Y.; WU, C.; ZHANG, L.; HU, P.; HOU, W.; ZU, W.; HAN, T. Long-day effects on
 1365 the terminal inflorescence development of a photoperiod-sensitive soybean [*Glycine max* (L.)
 1366 Merr.] variety. **Plant Science**, v. 180, n. 3, p. 504-510, 2011.
- 1367 KANTOLIC, A. G.; MERCAU, J. L.; SLAFER, G. A.; SADRAS, V. O. Simulated yield
 1368 advantages of extending post-flowering development at the expense of a shorter pre-flowering
 1369 development in soybean. **Field Crops Research**, v. 101, p. 321-330, 2007.
 1370 <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2006.12.008>.
- 1371 KARUNARATNE, A. P. et al. Calibrating and validating the FAO AquaCrop model for
 1372 Bambara groundnut (*Vigna subterranea* (L.) Verdc.) grown in rainfed conditions. *Agricultural*
 1373 *Water Management*, v. 98, n. 6, p. 1049-1058, 2011.
- 1374 KARUNARATNE, A.S.; AZAM-ALI, S.N.; IZZI, G.; STEDUTO, P. Calibration and
 1375 validation of FAO-AquaCrop model for irrigated and water deficient bambara groundnut. **Exp.**
 1376 **Agric.** 47, 509–527, 2011.

- 1377 KATERJI, N.; CAMPI, P.; MASTRORILLI, M. Productivity, evapotranspiration, and water
1378 use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress
1379 conditions in the Mediterranean region. **Agriculture Water Management** 130, 14–26, 2013.
- 1380 LECERF, R.; CEGLAR, A.; LÓPEZ-LOZANO, R.; VELDE, M. V. D.; BARUTH, B.
1381 Assessing the information in crop model and meteorological indicators to forecast crop yield
1382 over Europe. **Agricultural Systems**, v. 168, p. 191-202, 2019.
- 1383 LINKER, R.; IOSLOVICH, I. Assimilation of canopy cover and biomass measurements in the
1384 crop model AquaCrop. **Biosystems engineering**, v. 162, p. 57-66, 2017.
- 1385 LIU, B.; LIU, X.; WANG, C.; JIN, J.; HERBERTD, S.J.; HASHEMID, M. Responses of
1386 soybean yield and yield components to light enrichment and planting density. **International**
1387 **Journal of Plant Production**, Gorgan, v. 4, n. 1, p.1-9, 2010.
- 1388 LIU, J., ZHANG, B., LI, H., LI, F., & CHENG, Y. (2019). Evaluating the accuracy of
1389 AquaCrop for simulating soil moisture and yield of maize under different meteorological
1390 conditions. *Agricultural Water Management*, 221, 74-86.
- 1391 MABHAUDHI, T.; MODI, A.T.; BELETSE, Y.G. Agricultural and Forest meteorology
1392 parameterization and evaluation of the FAO-AquaCrop model for a South African taro
1393 (*Colocasia esculenta* L. Schott) landrace. **Agric. For. Meteorol**, v.192–93p.132–139, 2014
1394 <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.03.013>.
- 1395 MAGALHAES, I. D.; LYRA, G. B.; DE SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; DA ROCHA, A. E.
1396 Q.; CAVALCANTE, C. A.; DE SOUZA FERRAZ, R. L. Performance of the AquaCrop model
1397 for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under irrigation condition. **Australian Journal of Crop**
1398 **Science**, v. 13, n. 7, p. 1188-1196, 2019.
- 1399 MANAVALAN, L. P.; GUTTIKONDA, S. K.; PHAN TRAN, L. S.; NGUYEN, H. T.
1400 Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. **Plant and**
1401 **cell physiology**, v. 50, n. 7, p. 1260-1276, 2009.
- 1402 MCMASTER, G.S.; WILHELM, W.W. Growing degree-days: one equation, two
1403 interpretations gregory. **Agric. Forest Meteorol.** 87, 291–300. [http://dx.doi.org/10.1016/](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-20)
1404 [S0168-1923\(97\)00027-20](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-20), 1997.

- MEBANE, V.J.; DAY, R.L.; HAMLETT, J.L.; WATSON, J.E.; ROTH, G.W. Validating the
FAO 96 AquaCrop model for rainfed maize in Pennsylvania. **Agron. J.** 105, 419–427, 2013.
- MIRSAFI, Z. S.; SEPASKHAH, A. R.; AHMADI, S. H.; KAMGAR-HAGHIGHI, A. A.
Assessment of AquaCrop model for simulating growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.).
Scientia Horticulturae, v. 211, p. 343-351, 2016.
- MOLLAEI, A., EBRAHIMIAN, H., SOLTANI, A., & ZAREABYANEH, H. (2019).
Calibration and validation of AquaCrop model for maize (*Zea mays* L.) under different
irrigation management scenarios in arid regions of Iran. *Agricultural Water Management*, 221,
321-330.
- MONTOYA, F.; CAMARGO, D.; ORTEGA, J.F.; CÓRCOLES, J.I.; DOMÍNGUEZ, A.
Evaluation of aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. **Agric.**
Water Manag. 164, 267–280, 2016 <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.019>.
- MONTOYA, F.; GARCÍA, C.; PINTOS, F.; OTERO, A. Effects of irrigation regime on the
growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. **Agric. Water**
Manag. 193, 30–45, 2017.
- MONTOYA, J. et al. Testing AquaCrop model for yield simulation of potato under different
levels of water stress in a semiarid region of Mexico. *Agricultural Water Management*, v. 178,
p. 35-42, 2016.
- MONTZKA, C., KASSIE, B. T., & STRECK, T. (2017). Calibration of crop models: A review.
Agronomy for Sustainable Development, 37(1), 9.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.;
VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in
watershed simulations. **Trans. ASABE**, v.50, p.885–900, 2007.
- NAIN, A.; KERSEBAUM, K. Calibration and Validation of CERES Model for Sim-ulating.
Modelling Water and Nutrient Dynamics in Soil. **Crop Systems**, pp.161–181, 2007.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models: Part 1—A
discussion of principles. **J. Hydrol.** 10 (3), 282–290, 1970.
- NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; MERTZ-HENNING, L. M.;
FOLONI, J. S. S.; MORAES, L. A. C.; GONCALVES, S. L. Ecofisiologia da soja. 2020.

- 1434 NÓIA JÚNIOR, R. D. S.; FRAISSE, C. W.; KARREI, M. A. Z.; CERBARO, V. A.; PERONDI,
1435 D. Effects of the El Niño Southern Oscillation phenomenon and sowing dates on soybean yield
1436 and on the occurrence of extreme weather events in southern Brazil. **Agricultural and Forest**
1437 **Meteorology**, v. 290, p. 108038, 2020.
- 1438 NUNES JÚNIOR, J.; LIMA, R. B.; FERREIRA, R. C.; FONSECA, L. C.; MOTA, A. S. Épocas
1439 de semeadura e produtividade da soja em função de diferentes cultivares. *Revista de Ciências*
1440 *Agrárias*, v. 41, n. 1, p. 22-30, 2018.
- 1441 NUNES, H. G. G. C.; DE PINHO SOUSA, D.; MOURA, V. B.; FERREIRA, D. P.; DE
1442 NÓVOA. J.V.; DE OLIVEIRA V. I. C.; DA SILVA, F. V. D.; DE OLIVEIRA, E. C.
1443 Performance of the AquaCrop model in the climate risk analysis and yield prediction of cowpea
1444 (*Vigna Unguiculatta L. Walp*). **Aust. J. Crop Sci.** 13 (07), 1105–1112, 2019.
- 1445 NUNES, H. G. G. C.; FARIAS, V. D. S.; SOUSA, D. P.; COSTA, D. L. P.; PINTO, J. V. N.;
1446 MOURA, V. B.; ... SOUZA, P. J. O. P. Parameterization of the AquaCrop model for cowpea
1447 and assessing the impact of sowing dates normally used on yield. **Agricultural Water**
1448 **Management**, v. 252, p. 106880, 2021.
- 1449 NUNES, J. A. R., SILVA, B. B. D., AMORIM NETO, M. S., PEREIRA, M. A. R., &
1450 FERNANDES, P. D. Evaluation of the AquaCrop model for predicting cowpea yield in the
1451 Northeast of Brazil. *Journal of Arid Land*, 11(2), 195-205, 2019.
- 1452 OLIVEIRA, M. A. et al. Época de semeadura de soja em região de Cerrado: impacto na
1453 produtividade e nas características agrônômicas. *Comunicata Scientiae*, v. 9, n. 2, p. 181-188,
1454 2018.
- 1455 PAREDES, P. et al. Calibration and validation of AquaCrop model for maize crop under
1456 irrigation. *Agricultural Water Management*, v. 142, p. 80-89, 2014.
- 1457 PAREDES, P.; DE MELO-ABREU, J.P.; ALVES, I.; PEREIRA, L.S. Assessing the
1458 performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use underfull and
1459 deficit irrigation with focus on model parameterization. **Agric. Water Manag.** 144, 81–97,
1460 2014.
- 1461 PAREDES, P.; TORRES, M.O. Parameterization of AquaCrop model for vining pea biomass
1462 and yield predictions and assessing impacts of irrigation strategies considering various sowing
1463 dates. **Irrig. Sci.** 35, 27–41, 2016.

- 1464 PAREDES, P.; WEI, Z.; LIU, Y.; XU, D.; XIN, Y.; ZHANG, B.; PEREIRA, L. S. Performance
1465 assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of
1466 soybeans in North China Plain. **Agricultural Water Management**, v.152, p.57-71. 2015.
- 1467 PEREIRA, C.R. Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes
1468 condições ambientais. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de
1469 Viçosa, 2002, 282p.
- 1470 PEREIRA, L. A. M.; SILVA, V. M.; SANTOS, A. C. A.; SANTOS, A. F.; MAIA, A. DE A.
1471 Caracterização do regime hídrico da região do cerrado piauiense. Revista Brasileira de
1472 Engenharia Agrícola e Ambiental, 21(10), 691-696, 2017.
- 1473 PEREIRA, L. S.; OWEIS, T. Y. Irrigation management under water scarcity. In Advances in
1474 Irrigation Agronomy (pp. 1-22). Springer International Publishing, 2015.
- 1475 PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; RODRIGUES, G. C.; NEVES, M. Modeling malt barley water
1476 use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop
1477 and SIM Dual Kc models. **Agricultural Water Management**, v. 159, p. 239-254, 2015.
- 1478 PIRES, L. F. et al. Soybean yield potential as a function of sowing date in the northern Brazilian
1479 savanna. Agronomy Journal, v. 111, p. 1-12, 2019.
- 1480 POEHLMAN, J. M. Breeding soybean. In: POEHLMAN, J. M. (Ed.) **Breeding field crops**. 3^o
1481 ed. Van Nostrand Reinhold, New York. 1987. p.421-450.
- 1482 PROCÓPIO, S. O.; SANTIAGO, A. D.; CARVALHO H. W. L. Estudos de população de
1483 plantas de soja na região do SEALBA. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2018 24 p.
1484 (Boletim de Pesquisa / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1961; 134).
- 1485 RABELO, G. F.; SILVA, E. F. F.; SILVA, C. F. Sowing time for soybean cultivars in the North
1486 and Northwest regions of Minas Gerais State, Brazil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola
1487 e Ambiental, 23(2), 79-84, 2019.
- 1488 RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. AquaCrop 4.0 – The FAO crop model
1489 to simulate yield response to water: chapter 3. Roma, FAO, 2012. 125p.
- 1490 RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. AquaCrop the FAO crop model to
1491 simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agron. J.** 101,
1492 438–447, 2009. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>.

- 1493 RAJA, W.; KANTH, R.H.; SINGH, P. Validating the AquaCrop model for maize under
1494 different sowing dates. **Water Policy**, v. 20, p. 826–840, 2018. [https://doi.org/10.2166/](https://doi.org/10.2166/wp.2018.123)
1495 [wp.2018.123](https://doi.org/10.2166/wp.2018.123).
- 1496 RAJPUT, T. B. S. et al. Application of AquaCrop model for crop yield and water productivity
1497 assessment in different irrigation management scenarios: A review. *Agricultural Water*
1498 *Management*, v. 221, p. 1-14, 2019.
- 1499 RAN, H.; KANG, S.; LI, F.; DU, T.; TONG, L.; LI, S.; ZHANG, X. Parameterization of the
1500 AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest
1501 China. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 438-450, 2018.
- 1502 RAY, D. K.; WEST, P. C.; CLARK, M.; GERBER, J. S.; PRISHCHEPOV, A. V.;
1503 CHATTERJEE, S. Climate change has likely already affected global food production. *PloS*
1504 *one*, 14(5), e0217148, 2019.
- 1505 RAZZAGHI, F.; SEPASKHAH, A. R.; AHMADI, S. H.; KAMGAR-HAGHIGHI, A. A.
1506 Calibration and validation of AquaCrop model under different soil textures and deficit irrigation
1507 management for maize. *Agricultural Water Management*, 183, 44-56, 2017.
- 1508 REICHL, T.; KUHNERT, M.; ECKERSTEN, H.; THORVALDSSON, G. Calibration of crop
1509 growth models using data assimilation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 269-270, 37-45,
1510 2019. doi:10.1016/j.agrformet.2019.01.028.
- 1511 RESOP, J. P.; FLEISER, D. H.; WANG, Q.; TIMLIN, D. J.; REDDY, V. R. Combining
1512 explanatory crop models with geospatial data for regional analyses of crop yield using field-
1513 scale modeling units. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 89, p. 51-61. 2012.
- 1514 RODRIGUES, O.; TEIXEIRA, M. C. C.; COSTENARO, E. R.; AVOZANI, A. Rendimento
1515 de grãos de soja em semeadura tardia. *Passo Fundo: Embrapa Trigo*, 2008. 26p. (Embrapa
1516 *Trigo. Boletim de pesquisa e desenvolvimento Online*, 66).
- 1517 ROSA, A. F.; RICCE, W. S.; COSTA, A. J. S.; LEITE, D. M. G.; CAVARIANI, C. Adaptação
1518 de cultivares de soja de ciclo tardio em diferentes épocas de semeadura na região de
1519 Guarapuava-PR. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, v. 11, n. 1, p. 12-17, 2021.
- 1520 ROSOLEM, C. A. et al. Épocas de semeadura de soja: recomendações técnicas. Londrina:
1521 Embrapa Soja, 2020. 28p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 131).

- 1522 SALAZAR, O.; WESSTRÖM, I.; YOUSSEF, M.A.; SKAGGS, R.W.; JOEL, A. Evaluation of
1523 the DRAINMOD–N II model for predicting nitrogen losses in a loamy sand under cultivation
1524 in south-east Sweden. **Agricultural Water Management**, v. 96, 267–281, 2009.
- 1525 SANCHEZ, H.; CERRATO, M. E.; SANCHEZ, B.; SANCHEZ, M. A.; ALMODOVAR, J. I.;
1526 SALAZAR, J. C. Performance of AquaCrop model for simulating maize production and soil
1527 water content under different climatic conditions. *Agricultural Water Management*, v. 244, p.
1528 1-10, 2021.
- 1529 SANDHU, R.; IRMAK, S. Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield,
1530 and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. **Agricultural Water**
1531 **Management**, v. 223, p. 105687, 2019.
- 1532 SANDOVAL-SOLIS, S.; NÚÑEZ-HERNÁNDEZ, G.; RODRÍGUEZ-DÍAZ, J. A.; MEZA-
1533 FIGUEROA, D.; TISCAREÑO-LÓPEZ, M.; CADENA-IÑIGUEZ, J.; ROMERO-GÁMEZ,
1534 M. Calibration of the AquaCrop model for maize in a semiarid region using lysimeter data.
1535 *Agricultural Water Management*, v. 228, 105864, 2020.
- 1536 SANTOS, L. M. et al. Calibration and validation of AquaCrop model for maize crop in semiarid
1537 conditions. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 4, p. 228-234,
1538 2019.
- 1539 SCHÖFFEL, E.R.; VOLPE, C.A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa
1540 interceptada pela soja para produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**,
1541 n.2, v.9, p.241-249, 2001.
- 1542 SENTELHAS, P.C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G.M.S, FARIAS, J.R.B.; HAMPF, A.;
1543 NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil—magnitude, causes and possible solutions for a
1544 sustainable production, **J. Agric. Sci**, 2015.
- 1545 SHRESTHA, N.; RAES, D.; VANUYTRECHT, E.; KUMAR SAH, S. H. Cereal yield
1546 stabilization in Terai (Nepal) by water and soil fertility management modeling. **Agricultural**
1547 **Water Management**, v. 122, p. 53-62, 2013.
- 1548 SILVA, F. C., SANTOS, D. B., FRANÇA, G. E., DE SOUSA, M. P., & CORRÊA, L. DE F.
1549 (2017). Caracterização do regime hídrico da região do cerrado no estado do Maranhão. *Irriga*,
1550 22(2), 199-210.

- 1551 SILVA, J. B. D.; BRAGA, L. G. T.; NETO, J. F. F.; SILVA, J. M. L. Evaluation of AquaCrop
1552 model for soybean crop under different irrigation management in Northeastern Brazil. *Revista*
1553 *Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(11), 749-754, 2020.
- 1554 SILVA, R. S.; CAVALCANTE, L. F.; NETO, A. S. A.; SILVA, B. B. Desempenho do modelo
1555 AquaCrop para simulação do crescimento e produção de sorgo sacarino irrigado. *Revista*
1556 *Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(5), 300-306, 2017.
- 1557 SILVA, V. P. R.; ALBUQUERQUE, M. F.; ARAÚJO, L. E.; CAMPOS, J. H. B. C.; GARCÊZ,
1558 S. L. A.; ALMEIDA, R. S. R. Medições e Modelagem da pegada hídrica da cultivada cana-de-
1559 açúcar no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiente**, v.19,
1560 n.6, p.521-526. 2015.
- 1561 SOUZA, D. D. D.; SANTOS, A. D. A.; LÚCIO, A. D. P. Assessing the AquaCrop model
1562 performance for simulating soybean yield under water stress in Brazilian semi-arid region.
1563 *African Journal of Agricultural Research*, 16(8), 1169-1181, 2021.
- 1564 SOUZA, J.L.; MOURA FILHO, G.; LYRA, R.F.F. TEODORO, I.; SANTOS, E.A.; SILVA,
1565 J.L.; SILVA, P.R.T.; CARDIM, A.H.; AMORIN, E.C. Análise da precipitação pluvial e
1566 temperatura do ar na região do tabuleiro costeiro de Maceió, AL, período de 1972-2001.
1567 **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v.12, n.1, p.131-141, 2004.
- 1568 STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES, D. Crop Yield Response to Water. *FAO*
1569 *Irrigation and Drainage Paper* 66. FAO, Rome, Italy, pp. 500, 2012.
- 1570 STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D.; FERERES, E. Aquacrop the FAO crop model to
1571 simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agron. J.** 101, 426–
1572 437, 2009. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>.
- 1573 STÜLP, M.; BRACCINI, A. D. L.; ALBRECHT, L. P.; ÁVILA, M. R.; SCAPIM, C. A.;
1574 SCHUSTER, I. Desempenho agrônômico de três cultivares de soja em diferentes épocas de
1575 semeadura em duas safras. **Ciência e Agrotecnologia**, v .33, p. 1240-1248, 2009.
- 1576 TAO, F.; YOKOZAWA, M.; LIU, J.; ZHANG, Z. Climate–crop yield relationships at
1577 provincial scales in China and the impacts of recent climate trends. **Climate Research**, v. 38,
1578 n. 1, p. 83-94, 2008.

- 1579 TAVAKOLI, A.; KESHAVARZ, A.; KHALILI, D.; TORKIAN, P. Performance evaluation of
1580 AquaCrop model under different climatic conditions in arid and semi-arid regions. *Agricultural*
1581 *Water Management*, 199, 20-30, 2018.
- 1582 TAVAKOLI, A.R.; MOGHADAM, M.M.; SEPASKHAH, R.A. Evaluation of the AquaCrop
1583 model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. ***Agric. Water***
1584 ***Manag.*** 161, 136–146, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.020>.
- 1585 TIAN, Z.; WANG, X.; LEE, R.; LI, Y.; SPECHT, J. E.; NELSON, R. L.; MCCLEAN, P.E.;
1586 QIU, L., MA, J. Artificial selection for determinate growth habit in soybean. ***Proceedings of***
1587 ***the National Academy Sciences***. v. 107, p. 8563-8568, 2010.
- 1588 TOUMI, J.; ER-RAKI, S.; EZZAHAR, J.; KHABBA, S.; JARLAN, L.; CHEHBOUNI, A.
1589 Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water
1590 content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): application to irrigation
1591 management. ***Agric. Water Manag.*** 163, 219–235, 2016.
- 1592 VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; WILLEMS, P. Global sensitivity analysis of yield output
1593 from the water productivity model. ***Environ. Model. Softw.*** 51, 323–332, 2014. [http://dx.](http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.017)
1594 [doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.017](http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.017).
- 1595 VIEIRA, P. F. et al. Produtividade da soja em função de cultivares e épocas de semeadura em
1596 região de cerrado. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 1, p. e3689119455, 2020.
- 1597 WANG, Y. et al. Evaluation of the AquaCrop model for simulating soybean growth and yield
1598 under different irrigation management practices. *Agricultural Water Management*, v. 249, p.
1599 106812, 2021.
- 1600 WEN, X. et al. Modelling maize yield and water use efficiency under various nitrogen rates
1601 using AquaCrop. *Water*, v. 11, n. 10, p. 1-17, 2019.
- 1602 WIJEWARDANA, C. et al. Changes in water productivity, evapotranspiration and growth of
1603 soybean under different tillage systems and water regimes. *Agricultural Water Management*, v.
1604 197, p. 80-91, 2018.
- 1605 WIJEWARDANA, C.; REDDY KRF, A. A; TRENTON IRBY J.; KRUTZ, J.; GOLDEN B.
1606 Quantifying soil moisture deficit effects on soybean yield and yield component distribution
1607 patterns. *Irrigation Sci.* 36, 241–255, 2018.

- 1608 YAO, Z. et al. Predicting the effect of saline water irrigation on maize growth and yield using
1609 the AquaCrop model. *Water*, v. 12, n. 10, p. 1-16, 2020.
- 1610 ZADEH, N.; BANNAYAN, M.; ALIZADEH, H. M. Calibration and uncertainty analysis of
1611 DSSAT-CERES-Maize model for maize production in Iran. *Environmental Modelling &*
1612 *Software*, 126, 104675, 2020. doi:10.1016/j.envsoft.2020.104675.
- 1613 ZANON, A. J.; WINCK, J. E. M.; STRECK, N. A.; ROCHA, T. S. M.; CERA, J. C.;
1614 RICHTER, G. L.; LAGO, I.; SANTOS, P. M.; MACIEL, L. R.; GUEDES, J. V. C.;
1615 MARCHESAN, E. Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e
1616 tipo de crescimento em terras altas e terras baixas. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 4, p.400-
1617 411, 2015. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0043>.
- 1618 ZELEKE, K.T.; LUCKETT, D.; COWLEY, R. Calibration and testing of the FAO AquaCrop
1619 model for canola. **Agron. J.** 103 (6), 1610–1618, 2011.
- 1620 ZHANG, Q.; GAO, Q.; HERBERT, S. J.; LI, Y.; HASHEMI, A. M. Influence of sowing date
1621 on phenological stages, seed growth and marketable yield of four vegetable soybean cultivars
1622 in North-eastern USA. **African Journal of Agricultural Research**, v. 5, n. 18, p. 2556-2562,
1623 2010.
- 1624 ZHANG, W.; WANG, H.; LI, H.; WANG, S. Parameter optimization and uncertainty analysis
1625 of AquaCrop model for maize under different irrigation regimes. *Agricultural Water*
1626 *Management*, 240, 106297, 2020.
- 1627 Zhu, Y.; Chen, J.; Li, J.; Li, W.; Li, H.; Liang, W. (2021). Calibration and validation of the
1628 AquaCrop model for simulating maize yield and water use in a semi-arid region. *Agricultural*
1629 *Water Management*, 247, 106778.
- 1630