

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**ALEXANDRE BRUNO DOS SANTOS**

**MODELO AQUACROP: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ANÁLISE DE SUA  
APLICAÇÃO NA AGRICULTURA BRASILEIRA**

**CURITIBA**

**2024**

**ALEXANDRE BRUNO DOS SANTOS**

**MODELO AQUACROP: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ANÁLISE DE SUA  
APLICAÇÃO NA AGRICULTURA BRASILEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo no curso de graduação em Agronomia, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Professor Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

**CURITIBA**

**2024**

**TERMO DE APROVAÇÃO****ALEXANDRE BRUNO DOS SANTOS****MODELO AQUACROP: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ANÁLISE DE SUA  
APLICAÇÃO NA AGRICULTURA BRASILEIRA**

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo no curso de graduação em Agronomia, pela seguinte banca examinadora:



---

Orientador: Professor Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza  
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola  
Setor de Ciências Agrárias



---

Avaliadora: Dra. Daniela Jerszurki  
NDrip Israel, Center Israel



---

Avaliadora: Dra. Stefanie Lais Kreutz Rosa  
Solo Fácil Consultoria e Serviços Ltda

Curitiba, 09 de agosto de 2024

## DEDICATÓRIA

"É melhor ser alegre que ser triste; a alegria é a melhor coisa que existe."

Vinicius de Moraes

## **AGRADECIMENTOS**

- Aos meus pais e familiares pelo apoio incondicional ao longo da minha jornada acadêmica.
- Ao meu orientador pela sua paciência e dedicação exemplares em todas as etapas deste trabalho.
- Aos professores que fizeram parte do meu percurso acadêmico, agradeço por me mostrarem que o caminho certo nem sempre é o mais fácil.
- Aos meus amigos, que personificam camaradagem e entusiasmo, agradeço por serem meu suporte nas horas difíceis.

## RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho levantar, compilar (tabular, organizar, selecionar e classificar) e analisar trabalhos realizados no Brasil que utilizaram o modelo AquaCrop para compreender aspectos sobre a sua calibração, validação, aplicabilidade, eficácia e limitações nos contextos agrícolas e ambientais avaliados. A revisão bibliográfica foi realizada selecionando-se artigos, dissertações e teses em português ou inglês, realizadas para condições ambientais brasileiras, utilizando a palavra-chave “AquaCrop” nas bases de dados *Google Scholar* e *Scopus*. Foram encontrados 53 estudos relevantes envolvendo a utilização do AquaCrop na agricultura brasileira. Os estudos foram analisados quanto aos seus objetivos, bem como suas conclusões sobre o desempenho do AquaCrop e sua aplicabilidade prática. Identificou-se crescimento no número de publicações com o AquaCrop entre 2014 e 2020 e tendência de estabilização entre 2021 e 2023; e desigualdade regional, com menos publicações no Centro-Oeste e Norte do país. Calibração e validação dos parâmetros do AquaCrop predominam na realização dos estudos levantados, enquanto análises comparativas entre o AquaCrop e outros modelos de simulação de culturas são mais escassos. O AquaCrop predominantemente obteve bom desempenho para simular culturas agrícolas em condições brasileiras. Resultados menos precisos ocorreram para culturas pouco estudadas ou quando utilizou-se dados de entrada muito diversificados. Os parâmetros calibrados e validados do AquaCrop predominantemente foram utilizados ou indicados nas considerações dos autores para: otimizar o manejo da irrigação; planejar cultivos mais adequados para cada região e época do ano; realizar previsão de safra e sistemas de alerta precoce; orientar novas pesquisas sobre calibração, validação e aplicação do modelo em diferentes contextos agrícolas.

**Palavras-chave:** Modelagem agrícola; Calibração e validação; Análise de sensibilidade; Simulação de culturas.

## ABSTRACT

The objective of this work was to collect, compile (tabulate, organize, select, and classify), and analyze studies conducted in Brazil that used the AquaCrop model to understand aspects of its calibration, validation, applicability, effectiveness, and limitations in agricultural and environmental contexts. The literature review was carried out by selecting articles, dissertations, and theses in Portuguese or English, conducted under Brazilian environmental conditions, using the keyword "AquaCrop" in the Google Scholar and Scopus databases. Fifty-three relevant studies involving the use of AquaCrop in Brazilian agriculture were found. The studies were analyzed regarding their objectives as well as their conclusions on the performance of AquaCrop and its practical applicability. An increase in the number of publications using AquaCrop was identified between 2014 and 2020, with a stabilization trend between 2021 and 2023, and regional inequality, with fewer publications in the Central-West and North regions of the country. Calibration and validation of AquaCrop parameters predominated in the studies reviewed, while comparative analyses between AquaCrop and other crop simulation models were scarcer. AquaCrop predominantly performed well in simulating agricultural crops under Brazilian conditions. Less accurate results occurred for less-studied crops or when highly diversified input data were used. The calibrated and validated parameters of AquaCrop were predominantly used or indicated in the authors' considerations for: optimizing irrigation management; planning more suitable crops for each region and time of year; forecasting crop yields and early warning systems; and guiding new research on the calibration, validation, and application of the model in different agricultural contexts.

**Keywords:** Agricultural modeling; Calibration and validation; Sensitivity analysis; Crop simulation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1	Esquema de cálculo do AquaCrop.....	22
FIGURA 2.2	Dados de entrada que definem o ambiente em que a cultura se desenvolve, no AquaCrop.....	23
FIGURA 4.1	Distribuição de frequência dos artigos levantados, por objetivo da publicação, tratando da utilização do AquaCrop para as condições brasileiras.....	38
FIGURA 4.2	Artigos levantados, por cultura estudada, tratando da utilização do AquaCrop para as condições brasileiras.....	39
FIGURA 4.3	Distribuição de frequência dos artigos levantados, por ano de publicação, tratando da utilização do AquaCrop para as condições brasileiras.....	40
FIGURA 4.4	Espacialização das localidades estudadas nos trabalhos científicos levantados, utilizando o AquaCrop no Brasil.....	41
FIGURA 4.5	Distribuição de frequência dos artigos levantados, por número de localidades estudadas, tratando da utilização do AquaCrop para o Brasil ....	42

**LISTA DE TABELAS**

TABELA 4.1	Trabalhos científicos levantados na revisão bibliográfica, tratando da utilização do AquaCrop na agricultura brasileira.....	36
TABELA 4.2	Parâmetros calibrados, obtidos nos estudos tratando de calibração e/ou validação de parâmetros do AquaCrop, para o Brasil.....	46
TABELA 4.3	Estatísticas obtidas nos estudos tratando de calibração/validação ou validação dos parâmetros do AquaCrop, para o Brasil.....	50
TABELA 4.4	Estudos que realizaram calibração ou calibração/validação de parâmetros do AquaCrop, para o Brasil.....	52

**LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES**

FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura;
DSSAT	Sistema de Decisão e Suporte à Transferência de Agrotecnologia;
APSIM	Simulador de Sistemas de Produção Agrícola;
ZAE-FAO	Modelo de Zona Agroecológica;
AS	Análise de sensibilidade;
AE	Erro absoluto;
RE	Erro relativo;
$R^2$	Coefficiente de determinação;
RMSE	Raiz do erro quadrático médio;
$d$	Coefficiente de Willmott;
NSE	Eficiência de Nash-Sutcliffe;
CCx	Cobertura máxima do dossel;
CDC	Tempo para o declínio do dossel;
WP*	Produtividade de água da biomassa;
H <sub>lo</sub>	Índice de colheita de referência;
K <sub>c</sub>	Coefficientes de cultivo;
K <sub>s</sub>	Coefficiente de estresse;
K <sub>sat</sub>	Condutividade hidráulica saturada do solo;
Z <sub>x</sub>	Profundidade máxima efetiva das raízes.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Modelagem de cultivos agrícolas .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Modelos de sistemas agrícolas .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>Modelo água-cultura AquaCrop .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4</b>	<b>Dados necessários para simulação com o AquaCrop.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5</b>	<b>Análise de sensibilidade, calibração e validação dos parâmetros de entrada .....</b>	<b>26</b>
<b>2.6</b>	<b>Cenários de simulação do AquaCrop .....</b>	<b>28</b>
<b>2.7</b>	<b>Levantamento e revisões de publicações científicas .....</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Local de realização do estudo .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Levantamento dos artigos científicos que utilizaram o AquaCrop .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>Tabulação, organização, compilação e seleção dos artigos científicos levantados .....</b>	<b>33</b>
<b>3.4</b>	<b>Análise dos artigos científicos que utilizaram o AquaCrop .....</b>	<b>34</b>
<b>3.5</b>	<b>Organização e apresentação dos resultados e discussão dos artigos científicos levantados .....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Trabalhos científicos levantados e selecionados utilizando o AquaCrop .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Síntese dos trabalhos científicos levantados envolvendo análises de sensibilidade .....</b>	<b>42</b>
<b>4.3</b>	<b>Síntese dos trabalhos científicos levantados envolvendo calibração e validação dos parâmetros do AquaCrop .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Considerações sobre os parâmetros calibrados nos trabalhos levantados .....</b>	<b>45</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Eficácia do AquaCrop para simular a produtividade de cultivos agrícolas .....</b>	<b>48</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Limitações e desafios na aplicação do AquaCrop .....</b>	<b>51</b>
<b>4.4</b>	<b>Síntese dos trabalhos científicos levantados envolvendo simulações de culturas .....</b>	<b>53</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Lâminas de irrigação .....</b>	<b>53</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Cenários climáticos .....</b>	<b>56</b>

4.4.3	Épocas de plantio .....	56
4.4.4	Tipos de solo .....	57
4.5	Síntese dos trabalhos científicos levantados envolvendo comparações com outros modelos .....	58
4.6	Limitações da revisão bibliográfica realizada e perspectivas para seu aprimoramento .....	59
5	CONCLUSÕES .....	61
6	CONSIDERAÇÃO FINAL .....	61
7	REFERÊNCIAS .....	62

## 1 INTRODUÇÃO

O modelo AquaCrop, desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), é um *software* de simulação de acesso livre e aberto que tem a intenção de auxiliar na gestão eficiente de culturas agrícolas, especialmente em condições de estresse hídrico. Seu principal objetivo é prever o crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas em cenários climáticos, solo e manejo agrônômico (FAO, 2023).

AquaCrop baseia-se em processos físicos e fisiológicos das plantas para simular o ciclo de crescimento das culturas, considerando variáveis como clima, tipo de solo, características da cultura, práticas de manejo e disponibilidade de água. Baseando-se nessas informações, o AquaCrop pode fornecer aos pesquisadores e agricultores estimativas precisas sobre o desempenho das culturas e orientar decisões relacionadas ao manejo de irrigação, fertilização e planejamento agrícola (FAO, 2023).

A importância do AquaCrop na agricultura brasileira é significativa, considerando os desafios específicos enfrentados pelo setor agrícola do país. O Brasil é uma nação com vasta extensão territorial e grande diversidade de condições climáticas e de solo, o que torna a gestão eficiente da água fator crucial para a produtividade e sustentabilidade das culturas. Além disso, o Brasil tem expressão agrícola global, com produção diversificada abrangendo desde grãos, como soja e milho, até frutas, hortaliças e produtos florestais. Nesse contexto, o uso do AquaCrop pode proporcionar vantagens competitivas aos agricultores brasileiros, permitindo-lhes otimizar o uso dos recursos hídricos, maximizar a produtividade das culturas e reduzir riscos associados à variabilidade climática. A aplicação do AquaCrop na agricultura brasileira pode contribuir para a sustentabilidade e eficiência do setor agrícola, bem como aumentar a segurança alimentar, reduzir a vulnerabilidade climática e o desenvolvimento socioeconômico das comunidades rurais.

Diante do contexto apresentado, é importante compreender a extensão da aplicação do AquaCrop no cenário agrícola brasileiro, levantando e examinando estudos científicos, relatórios técnicos e outras fontes relevantes que abordaram sua utilização em diversas regiões e sistemas de produção agrícola do país. Este

aspecto é fundamental para identificar as culturas em que o AquaCrop tem sido empregado e as condições específicas em que sua aplicação tem sido mais eficaz. Além disso, avaliar criticamente a eficácia e aplicabilidade das estimativas do AquaCrop em relação aos dados observados em condições reais de cultivo são fundamentais para melhor compreensão da sua capacidade para prever o crescimento e desenvolvimento das culturas sob determinadas condições de manejo e estresse hídrico, fornecendo informações importantes para a tomada de decisões agronômicas.

Acredita-se que é importante identificar os desafios enfrentados na aplicação do AquaCrop na agricultura brasileira, como questões relacionadas à disponibilidade de dados, validação do modelo e capacitação dos usuários. A análise crítica possibilita a proposição de estratégias para superar obstáculos e maximizar os benefícios do modelo na prática agrícola brasileira. Teve-se por objetivo no presente trabalho levantar, compilar (tabular, organizar, selecionar e classificar) e analisar trabalhos realizados no Brasil que utilizaram o modelo AquaCrop para compreender aspectos sobre a sua calibração, validação, aplicabilidade, eficácia e limitações nos contextos agrícolas e ambientais avaliados.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Modelagem de cultivos agrícolas**

A modelagem de cultivos agrícolas é fundamental na agricultura moderna, permitindo a previsão do comportamento das plantas às condições ambientais, práticas de manejo e imposição de eventos climáticos. Os modelos são desenvolvidos baseando-se em princípios científicos que representam os processos biológicos, físicos e químicos que ocorrem nas plantas e no ambiente ao seu redor. Sua utilização pode ser realizada em várias áreas da agricultura, desde o planejamento da produção até o manejo eficiente dos recursos naturais (FREITAS, 2018; SANTOS, 2022).

Um dos principais objetivos da modelagem de cultivos agrícolas consiste na previsão do crescimento e desenvolvimento das plantas ao longo do tempo, desde a germinação até a colheita. O resultado é alcançado fazendo-se a representação matemática de processos como fotossíntese, respiração, transpiração, absorção de nutrientes e interação com o ambiente. Ao considerar fatores como temperatura, umidade do solo, disponibilidade de água, nutrientes e luz solar, os modelos podem estimar o rendimento da cultura e identificar práticas de manejo que maximizem a produtividade e a sustentabilidade do sistema agrícola (ALMEIDA, 2020; PINHEIRO, 2022).

A modelagem de cultivos agrícolas também é importante na avaliação do impacto das mudanças climáticas na agricultura. Os modelos podem ser usados para simular cenários futuros de clima e prever como as culturas responderão às mudanças, permitindo aos agricultores e formuladores de políticas adaptar suas práticas de manejo para mitigar os impactos negativos e aproveitar oportunidades emergentes (ANJOS, 2016; PINHEIRO et al., 2021).

Os modelos de cultivos agrícolas também são ferramentas valiosas para otimizar o uso dos recursos naturais, como água e nutrientes. Podem auxiliar no planejamento da irrigação, fornecendo informações sobre o momento e a quantidade ideal de água a ser aplicada. Na gestão da fertilização, podem simular doses e tipos de nutrientes para maximizar o rendimento da cultura e minimizar a lixiviação de

nutrientes para o meio ambiente (CAVALCANTE JÚNIOR, 2019; CONCEIÇÃO, 2021; ROSA et al., 2023b).

A modelagem de cultivos agrícolas é multidisciplinar e se baseia em fundamentações teóricas para estabelecer sistemas matemáticos que possam simular o crescimento, desenvolvimento e interação das culturas com o ambiente. A fisiologia vegetal fornece os princípios básicos sobre os processos biológicos que ocorrem nas plantas, incluindo fotossíntese, respiração, absorção de nutrientes e transpiração. São princípios fundamentais para entender como as plantas respondem às condições ambientais e de manejo. A agrometeorologia integra aspectos meteorológicos à agricultura, considerando fatores como temperatura, umidade do ar, radiação solar e precipitação. Os dados meteorológicos são essenciais para prever o crescimento das plantas e estimar suas necessidades de água e nutrientes. A ciência do solo fornece informações sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, incluindo textura, estrutura, capacidade de retenção de água e disponibilidade de nutrientes. Os dados são importantes para entender como as plantas interagem com o solo e absorvem água e nutrientes. A ciência da computação fornece ferramentas e técnicas necessárias para desenvolver e implementar os modelos de cultivos agrícolas. A modelagem computacional permite simular os processos agrícolas de forma eficiente e analisar os resultados de maneira sistemática (ALENCAR, 2014; BOOTE, 2020; DANTAS, 2020).

No entanto, é importante reconhecer que existem desafios significativos associados à modelagem, como a complexidade dos processos biológicos e ambientais, a variabilidade espacial e temporal dos dados e a necessidade de calibração e validação dos modelos. A resposta dos modelos depende da qualidade dos dados de entrada, que nem sempre estão disponíveis com precisão, e de simplificações dos processos biológicos e ambientais, que podem afetar a precisão das estimativas. Os modelos também podem variar em complexidade, desde modelos simplificados até mais detalhados e sofisticados. Assim, a escolha do modelo mais adequado depende das necessidades específicas do usuário e das condições locais. Com os avanços contínuos na ciência e tecnologia, a modelagem de cultivos agrícolas está se tornando uma ferramenta poderosa para impulsionar a

agricultura sustentável e a segurança alimentar (SILVA et al., 2020; RIBEIRO, 2020; PINHEIRO et al., 2021).

Ao integrar dados científicos, conhecimento agrônômico e técnicas de modelagem, os modelos podem fornecer informações para apoiar decisões na agricultura, contribuindo para a produção sustentável de alimentos, adaptação às mudanças climáticas e à conservação dos recursos naturais (MINUZZI et al., 2017; BOOTE, 2020).

## **2.2 Modelos de sistemas agrícolas**

Na literatura encontram-se diversos modelos agrícolas que são empregados para simular o crescimento e desenvolvimento das culturas, prever aspectos hídricos do solo e avaliar o impacto de diferentes práticas de manejo. Entre os modelos mais relevantes, destacam-se (PINHEIRO et al., 2021; ALVES et al., 2021): AquaCrop, DSSAT, ZAE-FAO, APSIM, FAO56 Dual, Ritchie e Jensen and Hermann. Os principais aspectos destes modelos são:

- O AquaCrop se destaca por sua especialização no manejo da irrigação e na avaliação da resposta das culturas ao estresse hídrico, sendo amplamente utilizado para prever o rendimento das culturas em condições de disponibilidade limitada de água (FAO, 2023);
- O Sistema de Decisão e Suporte à Transferência de Agrotecnologia (DSSAT) é reconhecido por sua capacidade de simular sistemas agrícolas, permitindo avaliar o impacto de práticas de manejo e condições ambientais no rendimento das culturas (PINHEIRO et al., 2021);
- O Simulador de Sistemas de Produção Agrícola (APSIM) é utilizado para simular sistemas agrícolas complexos, permitindo avaliar o impacto de práticas de manejo e condições ambientais na produtividade e sustentabilidade dos sistemas (PINHEIRO et al., 2021);
- O FAO56 Dual é empregado na estimativa das evapotranspirações de referência, real e das culturas, considerando fatores climáticos e características da cultura (ALVES et al., 2021);

- O Modelo de Zona Agroecológica (ZAE-FAO) destaca-se por sua aplicação na avaliação da aptidão agrícola das terras, baseando-se no clima, solo e topografia (PINHEIRO et al., 2021);
- Ritchie e Jensen and Hermann são modelos simplificados para estimar as necessidades de água das culturas baseando-se na evapotranspiração potencial, sendo úteis em situações que requer estimativa rápida e direta da evapotranspiração da cultura (ALVES et al., 2021).

Cada modelo possui particularidades e vantagens específicas, sendo escolhido conforme as necessidades do usuário e as condições locais de cultivo (BOOTE, 2020).

## **2.3 Modelo água-cultura AquaCrop**

### **a) Aspectos gerais sobre o AquaCrop**

O AquaCrop, desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), é amplamente utilizado na agricultura para prever o crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas agrícolas, especialmente em condições de estresse hídrico. Para compreender melhor os fundamentos teóricos do modelo, é essencial examinar os princípios e conceitos que o fundamentam (FAO, 2023).

O AquaCrop baseia-se em abordagem simplificada, porém robusta, que combina conhecimentos sobre os processos fisiológicos das plantas, interações solo-planta-atmosfera e respostas das culturas ao estresse hídrico. O modelo é capaz de simular o crescimento da cultura ao longo do tempo, levando em consideração diversos fatores ambientais e de manejo (FAO, 2023).

Um dos aspectos fundamentais do AquaCrop é sua capacidade de representar a relação entre a disponibilidade de água no solo e o crescimento das plantas. O modelo considera a água disponível no solo como um fator determinante para o desenvolvimento das culturas, influenciando diretamente processos como a absorção de nutrientes, transpiração e fotossíntese. Além disso, o AquaCrop considera características específicas da cultura, como estágio de desenvolvimento,

ciclo de crescimento, sensibilidade ao estresse hídrico e capacidade de recuperação. São aspectos que permitem que o modelo seja adaptado para ampla variedade de culturas agrícolas, tornando-o versátil para diferentes contextos e regiões (FREITAS, 2018; RIBEIRO, 2020).

Outro aspecto importante do AquaCrop é sua simplicidade para a estimativa dos parâmetros necessários nas suas simulações. O modelo não necessita de grande quantidade de dados detalhados, e utiliza informações básicas sobre a cultura, como coeficientes de cultivo, coeficientes de estresse e dados meteorológicos, tornando-o mais acessível e fácil de ser aplicado em diferentes situações (SANTOS, 2022; NUNES, 2022).

No entanto, apesar de sua simplicidade, o AquaCrop é fundamentado em princípios científicos sólidos e já foi avaliado em várias condições climáticas e tipos de solo no mundo. São aspectos que conferem credibilidade ao modelo, tornando-o confiável para estimativa e manejo de culturas agrícolas em diferentes contextos (ALENCAR, 2014; PIEKARSKI et al., 2016; SOUZA et al., 2020b).

## **b) Como o AquaCrop foi desenvolvido**

A idealização do AquaCrop ocorreu nos anos 2000, quando a necessidade de abordar questões relacionadas à escassez de água e à segurança alimentar se tornou limitante em muitas regiões do mundo (BOOTE, 2020; FAO, 2023).

O desenvolvimento do AquaCrop foi motivado pela percepção de que os modelos agrícolas existentes na época não atendiam completamente às necessidades dos agricultores e gestores de recursos hídricos, especialmente em regiões propensas a condições de estresse hídrico. Os modelos existentes muitas vezes eram complexos, exigindo quantidade significativa de dados e recursos computacionais, o que limitava sua aplicabilidade prática em muitos contextos (BOOTE, 2020; PINHEIRO et al., 2021; FAO, 2023).

Assim, a FAO se esforçou para desenvolver um modelo mais simples e acessível, capaz de prever o desempenho das culturas em condições de estresse hídrico e fornecer recomendações práticas para o manejo da irrigação. O AquaCrop foi lançado em 2009, como uma ferramenta de código aberto, disponível

gratuitamente para uso por agricultores, pesquisadores e gestores de água em todo o mundo (FAO, 2023). Desde então, o AquaCrop passou por várias atualizações e melhorias, incorporando novos conhecimentos científicos e técnicos, expandindo sua aplicabilidade para grande variedade de culturas agrícolas e condições ambientais (OLIVEIRA, 2019; FERNANDES, 2021; NUNES, 2022).

A capacidade do AquaCrop de fornecer previsões precisas e recomendações práticas para o manejo da irrigação tem contribuído significativamente para aumentar a eficiência no uso da água na agricultura e melhorar a segurança alimentar em muitas comunidades rurais (RIBEIRO, 2020; CONCEIÇÃO, 2021; COSTA et al., 2021).

### **c) Processo de cálculo**

O AquaCrop emprega métodos de cálculo fundamentados em sólidos princípios científicos para prever o desempenho das culturas agrícolas em diferentes condições ambientais. Os coeficientes de cultivo ( $K_c$ ), por exemplo, consistem na relação que reflete o crescimento da cultura e sua evapotranspiração, em relação a uma cultura de referência padrão. Os coeficientes baseiam-se nos estádios de desenvolvimento das culturas e condições climáticas, e permitem a estimativa das necessidades hídricas das plantas ao longo do seu ciclo de crescimento (MARTIM et al., 2009; CASTILLO et al., 2018; SILVESTRE et al., 2019b).

O AquaCrop utiliza também métodos de modelagem da disponibilidade de água no solo, considerando a precipitação, evapotranspiração, infiltração e capacidade de campo do solo. Os procedimentos permitem calcular a quantidade de água disponível para as plantas em diferentes momentos do ciclo de crescimento, fornecendo informações para o manejo da irrigação e o planejamento da produção agrícola (PIEKARSKI et al., 2016; COSTA et al., 2021; GURSKI et al., 2021).

A modelagem da resposta das culturas ao estresse hídrico, baseando-se em princípios fisiológicos e ecofisiológicos do AquaCrop, ajusta o crescimento da planta, taxa de transpiração e outros processos fisiológicos em resposta à disponibilidade de água no solo. Os procedimentos permitem simular como as plantas respondem ao

estresse hídrico, afetando seu crescimento e desenvolvimento ao longo do tempo (SILVESTRE, 2019b; NUNES et al., 2021; FERREIRA e SILVA, 2023).

O AquaCrop estima o rendimento das culturas baseando-se em equações que consideram o crescimento da planta, número de frutos ou grãos, peso médio dos frutos ou grãos, e fatores específicos da cultura. As equações são ajustadas com dados observados e experimentais, permitindo a estimativa precisa do rendimento da cultura em condições de manejo e ambiente (CAVALCANTE JÚNIOR, 2019; RIBEIRO, 2020; FERNANDES, 2021).

Basicamente, o AquaCrop realiza as simulações agrícolas em quatro etapas. Cada uma contribui para compreensão e contabilização do crescimento e desenvolvimento das culturas (FIGURA 2.1):

*i)* Simulação da cobertura verde do dossel (*CC*): Representa a expansão, envelhecimento, condutância e senescência da cobertura do dossel, que são fatores cruciais na determinação da quantidade de água transpirada e da biomassa produzida pela cultura. A *CC* é influenciada por parâmetros conservadores e específicos do cultivar, bem como estresses relacionados à água, salinidade e fertilidade do solo. São fatores que podem reduzir a *CC* em relação ao seu potencial de desenvolvimento (FAO, 2023);

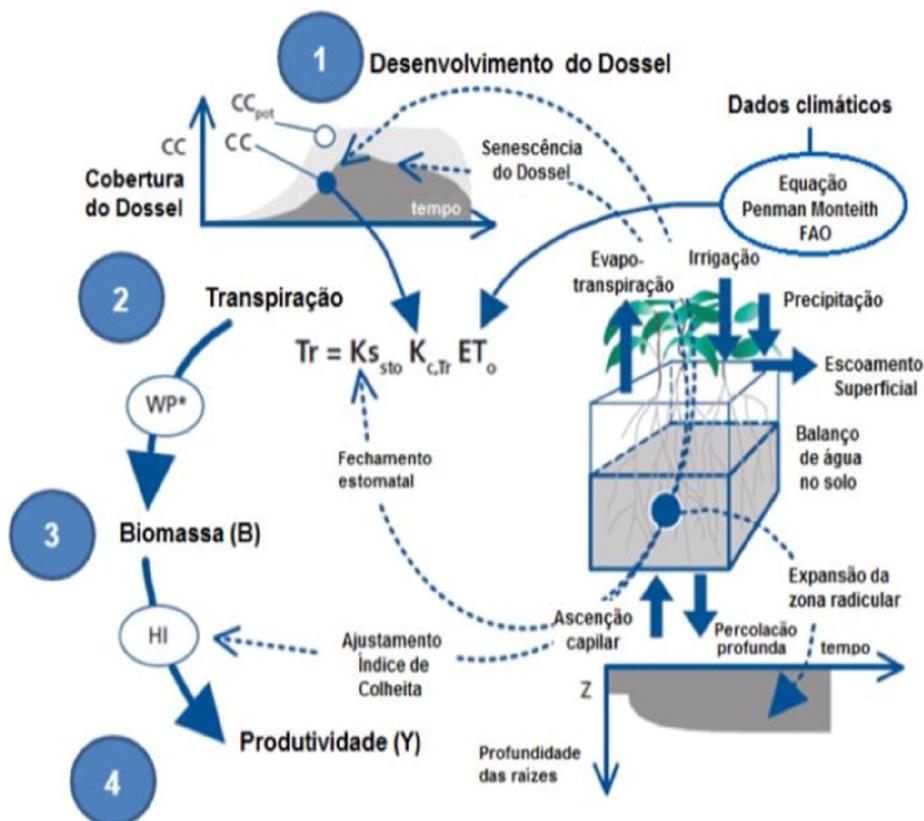
*ii)* Simulação da transpiração da cultura (*Tr*): É calculada baseando-se na cobertura verde do dossel, considerando-se a existência de proporcionalidade com a *CC*. Contudo, fatores como estresse devido ao frio, escassez ou excesso de água e salinidade do solo na zona radicular podem promover o fechamento estomático e reduzir a *Tr* no período analisado (FAO, 2023);

*iii)* Simulação da produção de biomassa acima do solo (*B*): É estimada baseando-se na quantidade cumulativa de água transpirada pela cultura. No entanto, o estresse de fertilidade do solo pode reduzir a produção, influenciando diretamente o crescimento da cultura (FAO, 2023);

*iv)* Simulação do rendimento da cultura (*Y*): Resulta do produto entre a biomassa final acima do solo e o índice de colheita, que é ajustado durante a simulação baseando-se nos efeitos do estresse. O índice de colheita possibilita a

representação precisa do rendimento da cultura em condições de crescimento e estresse (FAO, 2023).

FIGURA 2.1 – Esquema de cálculo do AquaCrop.



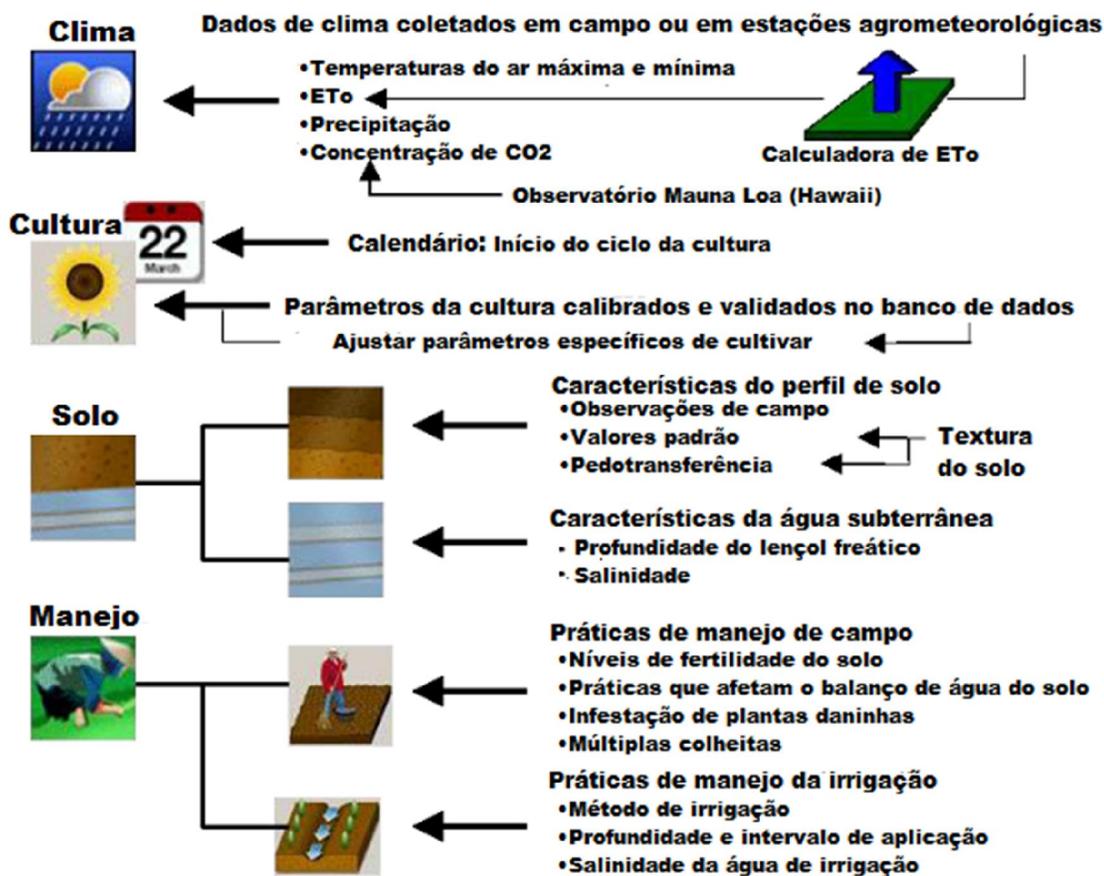
Sendo:  $CC$  – cobertura simulada do dossel;  $CC_{pot}$  – cobertura potencial do dossel;  $Z$  – profundidade de enraizamento;  $ET_o$  – evapotranspiração de referência;  $WP^*$  – produtividade normalizada da água da cultura; e,  $HI$  – Índice de Colheita.

Fonte: FAO (2023).

## 2.4 Dados necessários para simulação com o AquaCrop

As simulações no AquaCrop podem ser realizadas somente após a configuração de parâmetros específicos que têm impacto direto nos resultados. Os parâmetros são categorizados em dados: climáticos; solo; cultura; e, manejo agrícola (FIGURA 2.2).

FIGURA 2.2 – Dados de entrada que definem o ambiente em que a cultura se desenvolve, no AquaCrop.



Fonte: FAO (2023)

### a) Dados climáticos

Cada dia simulado no AquaCrop necessita dos dados de precipitação pluviométrica ( $P$ ), evapotranspiração de referência ( $ETo$ ), temperatura mínima ( $Tn$ ) e máxima ( $Tx$ ) do ar (MARTINS et al., 2019; FAO, 2023).

A entrada da  $ETo$ ,  $Tx$  e  $Tn$  pode ser na periodicidade diária, 10 dias ou mensal. Se não houver dados diários disponíveis, o AquaCrop usa métodos internos para estimar os dados baseando-se em médias de 10 dias ou mensais. No entanto, quanto maior a periodicidade dos dados usados nos cálculos, menos confiáveis serão os resultados do modelo (MINUZZI e LOPES, 2015; FAO, 2023).

As precipitações pluviométricas também podem ser inseridas na periodicidade diária, 10 dias ou mensal. No entanto, deve-se evitar períodos de 10 dias ou mensais, pois a precipitação varia muito ao longo do tempo. Totais precipitados em períodos mais longos faz com que o modelo perca a capacidade de capturar a resposta dinâmica da cultura à água (MINUZZI et al., 2017; FAO, 2023).

O AquaCrop também requer a concentração média anual de CO<sub>2</sub> atmosférico para ajustar a transpiração da cultura e a produtividade da água da biomassa (SILVA et al., 2020; FAO, 2023).

#### **b) Dados do solo**

Os dados necessários para cada horizonte do perfil de solo incluem (SOUZA et al., 2020b; FAO, 2023): conteúdos de água volumétrico na saturação (*SAT*); capacidade de campo (*FC*); ponto de murcha permanente (*PWP*); condutividade hidráulica do solo na saturação (*Ksat*); porcentagem de cascalho em massa (%; se presente); e, penetrabilidade das raízes (%; se restritiva).

Baseando-se nos dados fornecidos, o AquaCrop determina: a água total disponível (*TAW*), para os cálculos do balanço hídrico do solo; água prontamente evaporável (*REW*), para simulação da evaporação do solo; classe textural do solo, para determinação da ascensão capilar; função de ascensão capilar (*CRmax*), considerando a *Ksat* e classe textural do solo; característica de drenagem (*tau*), considerando *Ksat*; e, número de curva padrão (*CN*), considerando *Ksat* (PIEKARSKI et al., 2016; FAO, 2023).

Se não houver dados locais do solo, o usuário pode utilizar valores indicativos disponíveis no AquaCrop para várias classes texturais do solo ou valores indicativos derivados, empregando funções de pedo-transferência como alternativa (SOUZA et al., 2020b; FAO, 2023).

As características necessárias para o lençol freático incluem sua profundidade, em metros abaixo da superfície do solo, e sua salinidade (BOOTE, 2020; FAO, 2023).

### c) Dados da cultura

A base de dados do AquaCrop contém parâmetros de culturas calibrados e validados. São dois tipos de parâmetros considerados (NUNES et al., 2021; FAO, 2023): Conservativos – são estáveis ao longo do tempo, independentemente das práticas de manejo, localização geográfica ou clima (como os limiares para estresses e a produtividade de água da biomassa); e, Não-conservativos – variam com as cultivares ou condições ambientais, e podem necessitar de ajustes dependendo do cultivar ou condições assumidas na calibração.

Desta forma, geralmente exigem ajustes os parâmetros não-conservativos relacionados ao plantio e manejo da cultura, como: Método de plantio (semeadura direta ou transplante), densidade de plantio, que determinará a cobertura de dossel inicial (CCo) e máxima (CCx), tempo para atingir 90% da emergência das plântulas (afetado pela preparação do campo e temperatura do solo) e comprimento do ciclo de crescimento (DANTAS, 2020; FAO, 2023); Parâmetros específicos do cultivar, que incluem o tempo para atingir a cobertura máxima do dossel (CCx), início da senescência do dossel, maturidade fisiológica, início da floração e duração da floração (OLIVEIRA, 2018; FAO, 2023); Parâmetros influenciados pelas condições do solo, como a profundidade máxima efetiva das raízes (Zx) e taxa de aprofundamento das raízes (tempo para alcançar Zx), que são afetados pelos atributos físicos e químicas do solo; e, Calibração da resposta da cultura à fertilidade e salinidade do solo para aprimorar a precisão da simulação (SALES et al., 2020; FAO, 2023).

O efeito do estresse ambiental no desenvolvimento e produção da cultura é simulado no AquaCrop por meio de coeficientes de estresse ( $K_s$ ). O  $K_s$  modifica o parâmetro alvo e varia de um (sem estresse) a zero (estresse total), em função do indicador de estresse. Os indicadores de estresse no AquaCrop incluem depleção relativa da zona radicular, excesso de água, temperatura do ar e salinidade do solo (MARTINI, 2018; SOUZA et al., 2022; FAO, 2023).

#### **d) Dados de manejo**

O AquaCrop considera manejos de campo (MARTINI, 2018; ROSA et al., 2023b; FAO, 2023) como práticas de conservação do solo, cobertura morta, manejo de plantas daninhas e fertilidade do solo.

A precipitação perdida por escoamento superficial é estimada com o método Número de Curva (*CN*). A estimativa do escoamento superficial no AquaCrop não considera apenas o *CN* especificado, mas também a umidade do solo superficial no momento da precipitação (FREITAS, 2018; FAO, 2023).

As rotinas do AquaCrop simulam e consideram a redução da evaporação quando há palhada que cobre a superfície do solo. Dependendo do tipo de cobertura morta e fração da superfície do solo coberta por elas, a redução na evaporação do solo pode ser mais ou menos significativa (NUNES, 2022; FAO, 2023).

A competição com plantas daninhas é expressa no AquaCrop pela cobertura relativa de plantas daninhas (*RC*), consistindo na proporção entre a área do solo coberta pelas folhas das plantas daninhas e a cobertura total do dossel das plantas daninhas e da cultura. A transpiração total da cultura e das plantas daninhas, bem como a evaporação do solo no campo infestado por plantas daninhas, também são consideradas no AquaCrop para simular corretamente o balanço de água do solo (RIBEIRO, 2020; FAO, 2023).

O estresse por fertilidade é simulado no AquaCrop indiretamente, baseando-se em efeitos do estresse de fertilidade do solo no desenvolvimento do dossel e produtividade de água da biomassa. O usuário especifica a produção relativa de biomassa (referindo-se à expectativa de máxima biomassa seca acima do solo esperada no final da temporada de crescimento) em campo com estresse de fertilidade do solo em comparação às condições sem estresse (ROSA et al., 2023b, FAO, 2023).

### **2.5 Análise de sensibilidade, calibração e validação dos parâmetros de entrada**

Na utilização de modelos é fundamental seguir etapas para garantir a sua precisão e confiabilidade. Primeiro, realiza-se a análise de sensibilidade, que avalia

como as variações nos parâmetros do modelo afetam os resultados. Em seguida, procede-se à calibração, ajustando os parâmetros do modelo para que suas previsões se alinhem com séries de dados observados. Por fim, a validação é executada para verificar a precisão do modelo em prever resultados, considerando dados independentes, garantindo que o modelo tenha a robustez necessária para aplicações práticas (BOOTE, 2020).

As análises de sensibilidade consistem na identificação dos parâmetros que têm maior impacto nas saídas, e que podem ser ajustados para melhorar a precisão das simulações (RIBEIRO, 2020). A sensibilidade dos parâmetros em modelos agrícolas refere-se à magnitude com que as mudanças nos valores dos parâmetros afetam as suas saídas, como as previsões de rendimento da cultura, uso de água ou necessidades de fertilizantes. É a medida da influência de cada parâmetro no desempenho do modelo e na confiabilidade das estimativas (MARTINI, 2018; SOUZA et al., 2020b). Os parâmetros menos sensíveis geralmente são ajustados com menos precisão ou fixados em valores padrão, reduzindo a complexidade do processo de calibração (SOUZA et al., 2022; ROSA et al., 2023b).

Antes de realizar a calibração é fundamental proceder à coleta cuidadosa de dados observados do ambiente a ser analisado. Parte dos dados serve como entrada e outra parte serve de referência para comparar as saídas do modelo na calibração (ALENCAR, 2014; PINHEIRO et al., 2021).

A calibração é o processo de ajuste dos parâmetros de um modelo para alinhar suas previsões com séries de dados observados. Inicia-se com a seleção dos parâmetros mais influentes e a definição de critérios de desempenho, seguido pela coleta de dados representativos. O modelo é executado com parâmetros iniciais, sendo comparado os resultados simulados com os dados observados para identificar desvios. Ajustes sistemáticos dos parâmetros são feitos iterativamente até que as previsões do modelo estejam suficientemente próximas dos dados reais (MARTINS et al., 2015; PINHEIRO, 2022).

Na validação testa-se a capacidade do modelo de fazer estimativas precisas com dados independentes, não utilizados para calibrar os parâmetros do modelo. Os procedimentos proporcionam resultados mais consistentes e precisos que refletem melhor as condições reais do campo (OLIVEIRA, 2019).

Indicadores estatísticos são usados para avaliar a precisão do modelo em simular os dados observados. Os principais indicadores utilizados para comparar valores estimados versus observados são: Erro médio absoluto (*MAE*); Coeficiente de determinação ( $R^2$ ); Raiz do erro quadrático médio (*RMSE*); Coeficiente de Willmott (*d*); Eficiência de Nash-Sutcliffe (*NSE*); entre outros (BOOTE, 2020; ROSA et al., 2020b).

Além de comparar as estimativas do modelo com dados observados, a avaliação de sua robustez em diferentes condições também é importante. A avaliação da robustez pode envolver a execução do modelo em diferentes períodos, localidades geográficas ou condições climáticas, para verificar se o modelo realiza previsões confiáveis em várias situações (MARTINS et al., 2019; RIBEIRO, 2020).

Os modelos agrícolas são sensíveis a vários fatores climáticos, tipos de solo e práticas de manejo. A sensibilidade torna difícil a calibração precisa dos modelos para diferentes condições ambientais. Portanto, de forma geral, é importante considerar a variabilidade natural do ambiente agrícola ao se calibrar e validar os parâmetros dos modelos (MARTINS et al., 2015; CONCEIÇÃO, 2021). Em determinadas situações, os dados disponíveis para calibrar e validar modelos podem ser limitados em quantidade e qualidade, tornando a atividade um desafio a ser superado (OLIVEIRA, 2018; MAGALHÃES et al., 2019; OLIVEIRA, 2019; NUNES, 2022).

## **2.6 Cenários de simulação do AquaCrop**

O AquaCrop possibilita a realização de cenários de simulação, considerando: tipos de culturas agrícolas; variações climáticas; práticas de manejo agrícola; condições de solo; e, mudanças climáticas. A realização de cenários ajuda nas análises e tomada de decisões relacionadas ao ambiente estudado. Para agricultura, os cenários contribuem para a compreensão dos sistemas agrícolas e desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis (SILVESTRE et al., 2019a; RIBEIRO, 2020).

O AquaCrop é amplamente utilizado na agricultura para simular diversos tipos de culturas (cereais, hortaliças, frutas, entre outras). Cada cultivo agrícola possui

aspectos específicos que influenciam seu crescimento, desenvolvimento e resposta ao ambiente. Assim, cereais como milho, trigo e arroz têm necessidades hídricas diferentes das hortaliças como alface, tomate e cenoura (MARTIM et al., 2009).

Para simular cultivos agrícolas no AquaCrop é essencial considerar os aspectos específicos, como (COSTA et al., 2021; VIEIRA et al., 2020): estágios de crescimento da cultura; tolerância ao estresse hídrico e térmico; demanda por nutrientes e água em diferentes fases do ciclo de crescimento; entre outros. São aspectos que precisam ser considerados para fornecer previsões precisas e úteis para os agricultores e pesquisadores (CONCEIÇÃO, 2021).

O AquaCrop simula condições climáticas, permitindo explorar os efeitos de variações na temperatura, regime de chuvas e concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera. A flexibilidade torna o modelo interessante para avaliar o desempenho das culturas em cenários climáticos e análises de sensibilidade (MINUZZI e LOPES, 2015; MINUZZI et al., 2017; MARTINS et al., 2019; SILVA et al., 2020).

O AquaCrop utiliza dados meteorológicos. A simulação das variações na temperatura baseia-se nas séries de temperaturas mínimas e máximas diárias medidas, fornecidas como entrada ao modelo para processar as análises no período desejado. As informações são essenciais para calcular a evapotranspiração da cultura, desenvolvimento fenológico e resposta da cultura ao estresse térmico (CASTILLO et al., 2018; SILVESTRE et al., 2019a).

Para simular o regime pluviométrico, o AquaCrop utiliza a série de dados de precipitação do local, que precisa ser fornecida como entrada. Com os demais dados de entrada (solos, cultivos, entre outros) as rotinas do modelo determinam a quantidade e a distribuição temporal da água disponível para a cultura, avaliando os efeitos dos padrões pluviométricos, incluindo eventos de seca e períodos de excesso de água na produtividade das culturas (ANJOS, 2011; SILVESTRE et al., 2019a; GURSKI et al., 2021).

A concentração de CO<sub>2</sub>, que pode ser considerada nas simulações do AquaCrop, afetam diretamente a fotossíntese das plantas, influenciando seu crescimento e produção. Ao simular níveis de CO<sub>2</sub> os usuários podem avaliar como

as mudanças climáticas afetaram ou afetarão o desempenho das culturas no futuro (MARTINS et al., 2019; SILVA et al., 2020).

A capacidade de simular condições climáticas permite que os usuários explorem cenários para entender melhor como as culturas respondem aos estímulos ambientais. Os recursos que o AquaCrop disponibilizam são fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de manejo agrícola adaptativas e sustentáveis, especialmente em face das mudanças climáticas globais (MINUZZI e LOPES, 2015; MINAZZI et al., 2017, MARTINS et al., 2019; SILVA et al., 2020).

A seguir são apresentados alguns cenários em que AquaCrop possibilita a simulação: Aplicação de diferentes lâminas de irrigação, para avaliar o efeito da quantidade e distribuição da água sobre o crescimento e desenvolvimento das culturas, para otimizar o uso da água e evitar desperdícios (CONCEIÇÃO, 2021); Analisar as melhores épocas de plantio da cultura, considerando a temperatura do solo, disponibilidade de água e duração do ciclo de cultivo. Os resultados possibilitam otimizar o rendimento das culturas e minimizar os riscos associados a condições climáticas adversas (SILVESTRE et al., 2019b); Avaliar o efeito da aplicação de fertilizantes no crescimento das culturas, considerando a disponibilidade de nutrientes no solo e seu efeito na absorção pelas plantas. Os resultados auxiliam na determinação das quantidades ideais de fertilizantes a serem aplicadas para maximizar a produção e minimizar custos (ROSA et al., 2023b); A avaliação da variação dos atributos do solo fornece informações de como as condições do solo afetam o crescimento das culturas e quais práticas de manejo podem ser adotadas para otimizar a produção em diferentes ambientes de solo (PIEKARSKI et al., 2016); Testes com cenários de mudança climática na agricultura ajudam no planejamento das estratégias de adaptação, para a seleção de variedades mais resistentes ao calor e à seca, bem como na implementação de práticas de conservação do solo e da água, estabelecimento de medidas de mitigação para redução das emissões de gases de efeito estufa e uso eficiente de recursos (MARTINS et al., 2019).

De forma geral, ao considerar condições e práticas de manejo, o AquaCrop permite a avaliação mais completa dos sistemas agrícolas e ajuda a orientar

decisões eficazes e sustentáveis no setor agrícola (RIBEIRO, 2020; CONCEIÇÃO, 2021).

## **2.7 Levantamento e revisões de publicações científicas**

O levantamento bibliográfico, também denominado revisão bibliográfica é parte fundamental da pesquisa acadêmica que envolve a identificação, coleta, seleção, análise e síntese de fontes de informação relevantes para determinado tema de estudo. As fontes podem incluir artigos científicos, livros, teses, relatórios técnicos e outros materiais acadêmicos. Sua realização possibilita o conhecimento sobre o tema em questão. Os pesquisadores podem identificar as principais teorias, conceitos, descobertas e debates relacionados ao campo de estudo de seu interesse, bem como contextualizar seu próprio trabalho e compreender as contribuições anteriores à área. Os levantamentos bibliográficos ajudam também a identificar lacunas na literatura existente. Ao revisar estudos anteriores, pesquisadores podem identificar áreas em que o conhecimento é limitado, inconsistente ou inconclusivo. Possibilita identificar oportunidades, abordar questões não resolvidas e avançar no campo de estudo (DANTAS, 2020; RIBEIRO, 2020).

A identificação de fontes de informação no levantamento de publicações científicas geralmente inclui bases de dados acadêmicos como *PubMed*, *Scopus*, *Web of Science*, *Google Scholar*, entre outras. É fundamental garantir que as fontes sejam confiáveis e reconhecidas na comunidade científica, assegurando qualidade e relevância dos estudos selecionados (ALENCAR, 2014; CONCEIÇÃO, 2021).

Estratégias de busca eficazes são necessárias para localizar os estudos mais pertinentes. As estratégias envolvem o uso de palavras-chave relacionadas ao tema de estudo, combinadas com operadores *booleanos* (*and*, *or*, *not*) para refinar os resultados da busca. O uso de filtros, como datas de publicação e tipos de estudo, também ajuda a restringir os resultados das publicações mais relevantes e recentes (OLIVEIRA, 2018; CAVALCANTE JUNIOR, 2019).

Os critérios de inclusão e exclusão são estabelecidos para definir quais estudos serão considerados na revisão. Critérios de inclusão podem considerar a relevância do estudo para o tema, qualidade metodológica e publicação em

periódicos revisados por pares. Os critérios de exclusão abrangem a irrelevância temática, baixa qualidade metodológica ou publicação em fontes não confiáveis (ANJOS, 2016; COSTA, 2016).

O processo de seleção dos estudos geralmente é realizado em etapas. Inicialmente, uma triagem dos títulos e resumos é realizada para eliminar estudos claramente irrelevantes. Em seguida, a leitura completa dos textos é feita para avaliação mais detalhada, assegurando que apenas os estudos que realmente atendem aos critérios estabelecidos sejam incluídos na revisão (PINHEIRO et al., 2021; PINHEIRO, 2022).

A análise e síntese dos estudos selecionados envolvem a extração de dados relevantes, como objetivos, métodos, resultados e conclusões dos estudos. A etapa pode incluir a avaliação crítica da qualidade dos estudos e a identificação de padrões e tendências nos resultados. Métodos estatísticos, como a meta-análise, podem ser utilizados para combinar os resultados quantitativos de estudos individuais e fornecer estimativas mais precisas dos efeitos investigados (ALMEIDA, 2020; PATOLE, 2021; SANTOS, 2022).

Finalmente, a apresentação dos resultados deve ser clara e organizada, permitindo aos leitores a compreensão abrangente das conclusões da revisão. Pode-se incluir tabelas, figuras ou gráficos e diagramas para ilustrar as informações de maneira visualmente acessível. A discussão dos resultados deve abordar as implicações práticas e teóricas, as limitações do estudo e sugestões para pesquisas futuras (FREITAS, 2018; SILVA, 2019).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Local de realização do estudo**

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi realizado seguindo a linha de pesquisa (diagnóstico e análise de dados) da <sup>®</sup>M Plataforma Moretti, tendo como apoio o Laboratório de Modelagem de Sistemas Ambientais / DSEA / SCA / UFPR.

#### **3.2 Levantamento dos artigos científicos que utilizaram o AquaCrop**

A revisão bibliográfica foi realizada selecionando-se artigos, dissertações e teses em português ou inglês, realizadas para condições ambientais brasileiras, utilizando a palavra-chave “AquaCrop” nas bases de dados *Google Scholar* e *Scopus*. Os critérios de inclusão foram aplicados aos títulos, resumos e autoria dos artigos para selecionar os estudos relevantes.

Os critérios para selecionar os artigos avaliados incluíram a adequação ao tema do estudo, aspectos técnicos do trabalho (profundidade, robustez), metodologia utilizada, clareza na apresentação dos resultados e consistência dos resultados.

#### **3.3 Tabulação, organização, compilação e seleção dos artigos científicos levantados**

Os artigos científicos foram categorizados em quatro grupos, baseando-se nos objetivos do estudo: Trabalhos que realizaram análise de sensibilidade dos parâmetros do AquaCrop; Trabalhos que realizaram a calibração e/ou validação dos parâmetros do AquaCrop; Trabalhos que simularam cultivos agrícolas em diferentes cenários com o AquaCrop; e, Trabalhos que compararam diferentes modelos.

Os dados extraídos dos artigos científicos foram tabulados em planilha eletrônica. Cada coluna representou uma variável específica, como: autor, ano de publicação, título, revista em que o artigo foi publicado, cultura agrícola estudada, local de realização do experimento, dados do experimento, parâmetros estudados, valores dos parâmetros calibrados e estatísticas da validação.

### **3.4 Análise dos artigos científicos que utilizaram o AquaCrop**

A análise dos artigos científicos selecionados iniciou-se com a revisão qualitativa dos conteúdos. A análise foi realizada de forma sistemática, buscando identificar padrões, tendências e lacunas na literatura sobre o uso do AquaCrop na agricultura brasileira. Foram extraídas informações relevantes sobre os objetivos dos estudos, metodologias aplicadas, resultados obtidos e conclusões alcançadas. Foram realizadas análises estatísticas descritivas dos dados, para identificar medidas de tendência central, dispersão e relações entre variáveis. A intenção foi compreender de forma abrangente a situação atual das pesquisas realizadas com AquaCrop e das principais contribuições que a sua utilização tem proporcionado para agricultura no contexto brasileiro.

### **3.5 Organização e apresentação dos resultados e discussão dos artigos científicos levantados**

Os itens dos “Resultados e Discussão” foram organizados em cinco tópicos principais, abordando aspectos essenciais obtidos da revisão bibliográfica e análise do AquaCrop:

- i)* Quantificação geral dos trabalhos científicos levantados: Contabilizou-se os artigos disponíveis, discutindo a série histórica. A etapa foi realizada para obter informações abrangentes e quantitativas sobre o estado atual do conhecimento, para melhor compreensão das áreas mais exploradas e que ainda necessitam de investigação;
- ii)* Análises de sensibilidade: Destacou-se os estudos que realizaram análises de sensibilidade dos parâmetros do AquaCrop, e discutido as principais variáveis analisadas e suas influências nas saídas do modelo. Essa abordagem foi importante para evidenciar a sensibilidade do AquaCrop para diferentes condições e parâmetros, e verificar sua robustez e limitações;
- iii)* Calibração e validação: Apresentou-se resultados dos estudos que realizaram a calibração e validação dos parâmetros do AquaCrop. Também foi discutida a concordância entre as simulações do modelo e os dados observados em campo, destacando a confiabilidade do AquaCrop em diferentes contextos e suas limitações;

iv) Simulações: Abordou as simulações realizadas com o AquaCrop em diferentes cenários agrícolas e ambientais. Discutiu-se como o modelo foi aplicado para prever rendimentos de culturas, avaliar práticas de manejo e simular diferentes condições climáticas, fornecendo informações para o planejamento agrícola e a gestão de riscos;

v) Comparação com outros modelos de simulação: Realizou-se a comparação entre o AquaCrop e outros modelos de simulação agrícola, destacando suas vantagens, limitações e aplicações específicas. A abordagem visou a avaliação mais ampla do desempenho do AquaCrop em relação a outros modelos de simulações disponíveis.

A estrutura e organização criada para a apresentação dos “Resultados e Discussão” tentou disponibilizar as informações dos estudos levantados de forma abrangente e aprofundada, fornecendo informações sobre o AquaCrop e sua aplicação na agricultura brasileira.

Em todas as etapas, realizou-se a análise crítica dos resultados para a avaliação mais aprofundada do desempenho, limitações e potencialidade de utilização do AquaCrop, bem como identificou-se áreas de interesse para futuras investigações e avanço do conhecimento e prática agrícola.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Trabalhos científicos levantados e selecionados utilizando o AquaCrop

No *Google Scholar*, a busca com “*All in title*” e “*Only Portuguese pages*” retornou 42 resultados. No *Scopus*, a busca com “*title, keyword*”, “*abstract*” e “*Limited to Brazil*” resultou 34 registros. Após a exclusão de duplicatas e trabalhos não pertinentes, a revisão bibliográfica realizada permitiu a contabilização de 53 estudos relevantes envolvendo a utilização do AquaCrop na agricultura brasileira (TABELA 4.1). Dentre os estudos levantados (FIGURA 4.1), cinco fizeram análises de sensibilidade dos parâmetros do AquaCrop. Os autores verificaram a influência de diferentes variáveis no desempenho do modelo. Trinta e cinco estudos realizaram calibração e/ou validação dos parâmetros do AquaCrop. Os parâmetros foram ajustados para melhorar a precisão das simulações. Quinze estudos simularam cultivos agrícolas usando o AquaCrop, abordando questões como manejo de água, estratégias de cultivo e resiliência às mudanças climáticas. Também foram encontrados dois artigos comparando o AquaCrop com outros modelos.

TABELA 4.1 – Trabalhos científicos levantados na revisão bibliográfica, tratando da utilização do AquaCrop na agricultura brasileira.

Autor(es)	Título	Editor ou periódico	Local	Cultura agrícola
Martim et al. (2009)	Uso do modelo AquaCrop para estimar o efeito das chuvas sobre o desempenho produtivo do Amendoim no Sudoeste de Goiás	Congresso Brasileiro de Agrometeorologia	Goiás	Amendoim
Anjos (2011)	Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeio em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AquaCrop	Universidade Federal de Alagoas	Alagoas	Milho
Alencar (2014)	Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar	Universidade Federal de Viçosa	Vários	Cana
Martins et al. (2015)	Calibração do modelo Aquacrop para estimativa de rendimento de milho no semiárido do Brasil.	Congresso Brasileiro de Agrometeorologia	Semiárido nordestino	Milho
Minuzzi e Lopes (2015)	Desempenho agrônomo do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental	Centro-Oeste	Milho
Anjos (2016)	Cultivo do milho irrigado no semiárido alagoano e modelagem com o AquaCrop/FAO®.	Universidade Federal de Campina Grande	Alagoas	Milho
Costa (2016)	Disponibilidade hídrica, uso de aditivo na adubação e calibração do software AquaCrop para o feijoeiro	Universidade Federal de Viçosa	Minas Gerais	Feijão
Piekarski et al. (2016)	Simulação da produtividade da soja em três tipos de solo com o modelo AquaCrop	Convibra Online Conference Agronomy	Paraná e São Paulo	Soja
Battisti et al. (2017)	Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil	Field Crops Research	Sul do Brasil	Soja
Espadafor (2017)	Simulation of the responses of dry beans ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.) to irrigation	Transactions of the ASABE	EUA	Feijão
Minuzzi et al. (2017)	Estimation of soybean agronomic performance in climatic scenarios for Southern Brazil	Revista Ceres	Sul do Brasil	Soja
Castillo et al. (2018)	Simulação do efeito da irrigação sobre o rendimento da soja na bacia do Rio Potiribu, Rio Grande do Sul	IRRIGA	Rio Grande do Sul	Soja
Freitas (2018)	Calibração do modelo AquaCrop e necessidades hídricas da cultura do tomateiro cultivada em condições tropicais	Universidade Federal de Campina Grande	Paraíba	Tomate
Martini (2018)	Análise de sensibilidade de parâmetros do AquaCrop para milho de sequeiro no Sul do Brasil	Pesquisa Agropecuária Brasileira	Santa Catarina	Milho
Martins et al. (2018)	Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting	Agricultural Systems	Semiárido nordestino	Milho

Continua ....

Continuação ... TABELA 4.1 – Trabalhos científicos levantados na revisão bibliográfica, tratando da utilização do AquaCrop na agricultura brasileira.

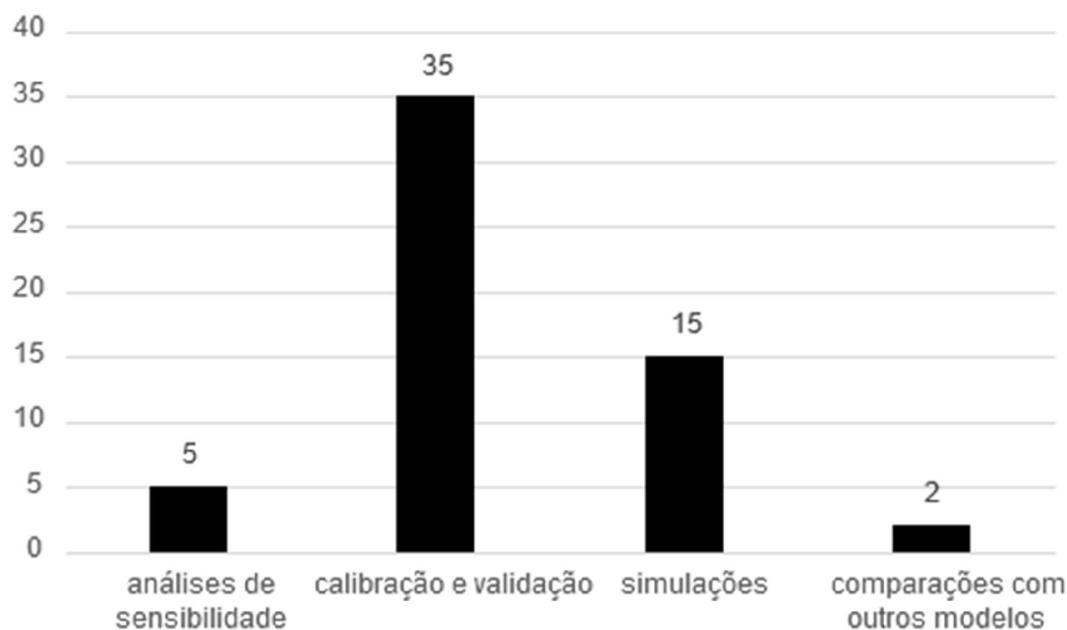
Autor(es)	Título	Editor ou periódico	Local	Cultura agrícola
Oliveira (2018)	Consumo hídrico e calibração/validação do modelo AquaCrop para a cultura do coentro submetido à irrigação localizada	Universidade Federal de Campina Grande	Paraíba	Coentro
Silva et al. (2018)	Calibração e validação do modelo AquaCrop para a cultura de soja cultivada mediante diferentes níveis de irrigação na região de Matopiba, Brasil	Ciência Rural	Tocantins	Soja
Cavalcante Junior (2019)	Desempenho do modelo AquaCrop/FAO® para cultivo do milho em Alagoas	Universidade Federal de Campina Grande	Alagoas	Milho
Magalhães et al. (2019)	Performance of the Aquacrop model for bean ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.) under irrigation condition	Australian Journal of Crop Science	Alagoas	Feijão
Martins et al. (2019)	Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation	Agricultural Water Management	Nordeste	Milho
Nunes et al. (2019)	Performance of the AquaCrop model in the climate risk analysis and yield prediction of cowpea ( <i>Vigna unguiculata</i> L. Walp)	Australian Journal of Crop Science	Pará	Feijão-caupi
Oliveira (2019)	Parametrização e validação do modelo AquaCrop para gramíneas forrageiras sob diferentes disponibilidades hídricas	Universidade Federal de Viçosa	Minas Gerais	Brachiaria brizantha
Rosa et al. (2019)	Calibração do modelo AquaCrop para a cultura do trigo em Castro-PR	Convibra Online Conference Agronomy	Paraná	Trigo
Silva (2019)	Consumo hídrico e calibração/validação do modelo AquaCrop para a cultura do feijão caupi cultivado no semiárido do nordeste do Brasil	Universidade Federal de Campina Grande	Semiárido nordestino	Feijão-caupi
Silvestre et al. (2019a)	Produção de milho estimada pelo software AquaCrop e obtida pela cultura sob diferentes lâminas de irrigação	IRRIGA	Espírito Santo	Milho
Silvestre et al. (2019b)	Estimativa da melhor época de plantio e produtividade de cana-de-açúcar com o modelo agrometeorológico AquaCrop	Revista Ifes Ciência	Espírito Santo	Cana
Almeida (2020)	Evapotranspiração, coeficiente de cultivo e calibração do modelo AquaCrop para a cultura do rabanete cultivado no semiárido nordestino	Universidade Federal de Campina Grande	Semiárido nordestino	Rabanete
Dantas (2020)	Calibração e validação do modelo AquaCrop para a cultura leucena ( <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit) cultivada no semiárido do Nordeste Brasileiro.	Universidade Federal de Campina Grande	Semiárido Nordeste	Leucena
Ribeiro (2020)	Calibração, validação e análise de sensibilidade do modelo AquaCrop (FAO) para variedades de cana-de-açúcar	Universidade de São Paulo	São Paulo	Cana
Rosa et al. (2020a)	Desempenho do modelo AquaCrop para a cultura do trigo na mesoregião Centro Oriental do Paraná	Convibra Online Conference Agronomy	Paraná	Trigo
Rosa et al. (2020b)	Performance of the AquaCrop model for the wheat crop in the subtropical zone in Southern Brazil	Pesquisa Brasileira Agropecuária	Paraná	Trigo
Sales et al. (2020)	Calibration and validation of FAO-aquacrop model to estimate the total biomass and yacon root yield	International Journal of Agricultural and Biological Engineering	Espírito Santo	Yacon
Silva et al. (2020)	Produtividade da soja na região de Matopiba sob mudanças climáticas	Revista Brasileira de Engenharia e Ambiental	Tocantins	Soja
Souza et al. (2020a)	Calibração e Validação do Modelo AquaCrop para Estimar a Produtividade de Milho nos Campos Gerais, Estado do Paraná, Brasil	Revista Brasileira de Meteorologia	Paraná	Milho
Souza et al. (2020b)	Influence of the aquacrop soil module on the estimation of soybean and maize crop yield in the state of Parana, Brazil	Agronomia Colombiana	Paraná	Soja e milho
Vieira et al. (2020)	Uso do modelo aquacrop para o feijão-caupi cultivado sob diferentes lâminas de irrigação em Castanhal-PA	Revista Brasileira de Climatologia	Pará	Feijão-caupi
Alves et al. (2021)	Evaluation of models to estimate the actual evapotranspiration of soybean crop subjected to different water deficit conditions	Anais da Academia Brasileira de Ciências	Distrito Federal	Soja
Conceição (2021)	Estimativa da produção da cultura do milho irrigado através de simulação com o modelo AquaCrop e determinação da lâmina ótima econômica	Universidade Federal de Santa Maria	Rio Grande do Sul	Milho
Costa et al. (2021)	Uso do software AquaCrop para simular a resposta do feijão a diferentes regimes de irrigação	IRRIGA	Minas Gerais	Feijão
Fernandes (2021)	Parametrização do modelo AquaCrop e simulação da transpiração e produtividade do algodoeiro sob lâminas de irrigação e nitrogênio	Universidade Federal de Mato Grosso	Mato Grosso	Algodão
Gurski et al. (2021)	Deficiência hídrica e excedente hídrico prováveis para milho e soja no estado do Paraná, sul do Brasil	IRRIGA	Paraná	Soja e milho
Nunes et al. (2021)	Parameterization of the AquaCrop model for cowpea and assessing the impact of sowing dates normally used on yield	Agricultural Water Management	Pará	Feijão-caupi

Continua ....

Continuação ... TABELA 4.1 – Trabalhos científicos levantados na revisão bibliográfica, tratando da utilização do AquaCrop na agricultura brasileira.

Autor(es)	Título	Editor ou periódico	Local	Cultura agrícola
Pinheiro et al. (2021)	Importância dos modelos de simulação de culturas diante dos impactos das alterações climáticas sobre a produção agrícola- Revisão	Revista Brasileira de Geografia Física	-	-
Conceição et al. (2022)	Desempenho do modelo Aquacrop para híbridos de milho sob diferentes estratégias de irrigação	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental	Rio Grande do Sul	Milho
Nunes (2022)	Calibração e teste do modelo AquaCrop para o amendoineiro sob lâminas de irrigação plena e deficitária	Universidade Estadual Paulista	São Paulo	Amendoim
Pinheiro (2022)	Simulação de sistemas agrícolas com uso do modelo Aquacrop parametrizado para culturas forrageiras em ambiente semiárido	Universidade Federal Rural de Pernambuco	Pernambuco	Palma forrageira e sorgo
Santos (2022)	Componentes de produção da soja estimados pelo AquaCrop no estado de Alagoas	Universidade Federal de Alagoas	Alagoas	Soja
Souza et al. (2022)	Sensitivity analysis of AquaCrop model for maize crop in a humid subtropical climate in Brazil	Agricultural Engineering International: CIGR Journal	Paraná	Milho
Zizinga et al. (2022)	Simulating Maize Productivity under Selected Climate Smart Agriculture Practices Using AquaCrop Model in a Sub-humid Environment	Sustainability	Uganda	Milho
Farias et al. (2023)	Avaliação do modelo AquaCrop para simulação da resposta da soja sob estresse hídrico	Ciência Rural	Distrito Federal	Soja
Ferreira et al. (2023)	Calibração e validação do modelo AquaCrop para a cultura do feijão-caupi sob estresse hídrico	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental	Paraíba	Feijão-caupi
Rosa et al. (2023a)	Calibration and validation of the AquaCrop model to estimate soybean production in the Campos Gerais, Parana State, Brazil	Agricultural Engineering International: CIGR Journal	Paraná e São Paulo	Soja
Rosa et al. (2023b)	Sensitivity analysis of the AquaCrop model for wheat crop in Campos Gerais region, Paraná	Revista Ceres	Paraná	Trigo

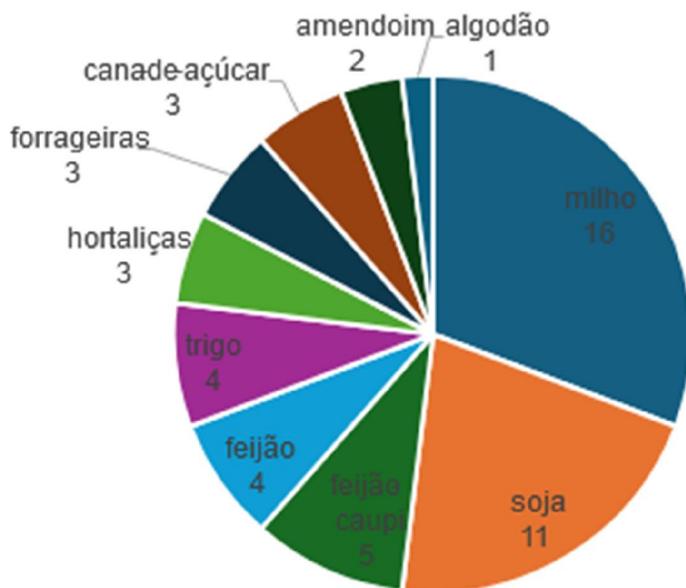
FIGURA 4.1 – Distribuição de frequência dos artigos levantados, por objetivo da publicação, tratando da utilização do AquaCrop para as condições brasileiras.



Fonte: O Autor (2024)

Os estudos levantados abrangeram culturas como milho (31%), soja (21%), feijão-caupi (9%), feijão e trigo (7% cada), cana-de-açúcar, hortaliças e forrageiras (6% cada), amendoim (4%) e algodão (2%) (FIGURA 4.2), demonstrando a aplicabilidade do AquaCrop para as condições agrícolas brasileiras. As análises de sensibilidade e os estudos de calibração e validação foram conduzidos em diversas regiões do país, considerando as especificidades climáticas e edafoclimáticas de cada localidade.

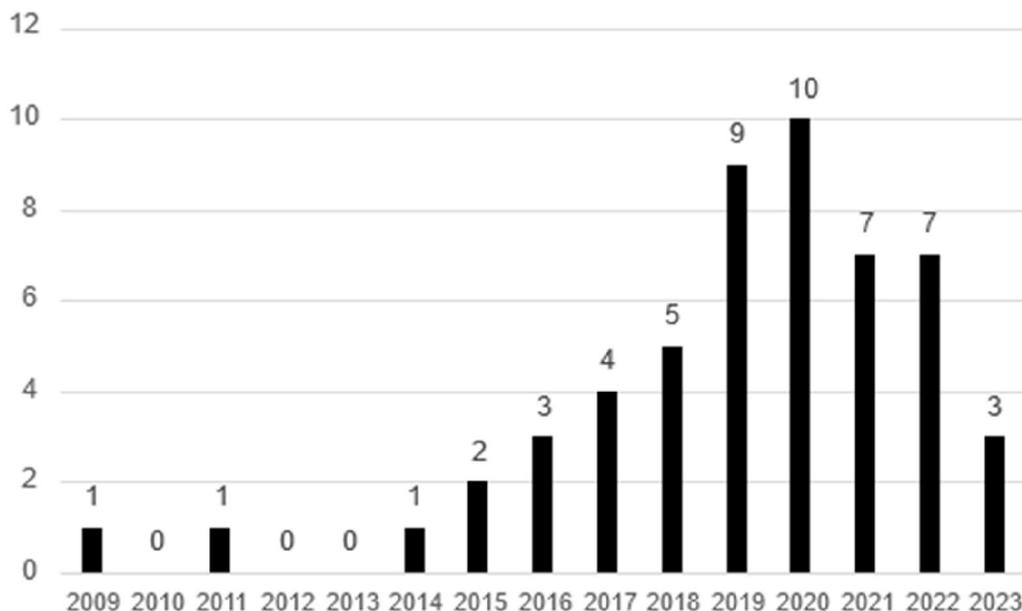
FIGURA 4.2 – Artigos levantados, por cultura estudada, tratando da utilização do AquaCrop para as condições brasileiras.



Fonte: O Autor (2024)

A maioria dos estudos encontrados foi publicada nos últimos dez anos (FIGURA 4.3), indicando interesse recente quanto ao uso do AquaCrop na pesquisa agrônômica brasileira. Os resultados destacaram a relevância do AquaCrop, fornecendo informações para futuras investigações e aplicações práticas na agricultura.

FIGURA 4.3 – Distribuição de frequência dos artigos levantados, por ano de publicação, tratando da utilização do AquaCrop para as condições brasileiras.



Fonte: O Autor (2024)

A distribuição de frequência dos artigos por ano de publicação indicou o interesse crescente entre 2014 e 2020 na comunidade acadêmica pela aplicação do AquaCrop, na agricultura brasileira (FIGURA 4.3). Entre 2021 e 2023 verificou-se tendência de estabilização na realização dos estudos. O interesse pelo AquaCrop pode ser atribuído à vários fatores, incluindo avanços na metodologia de modelagem, maior disponibilidade de dados e a crescente necessidade de ferramentas precisas para otimizar a produção agrícola quanto aos desafios climáticos e ambientais.

Na revisão bibliográfica realizada, verificou-se estudos em diversas regiões brasileiras (FIGURA 4.4), sendo: 19 estudos no Sul; 14 no Sudeste; 5 no Centro-Oeste; 18 no Nordeste; e, 4 no Norte. A distribuição geográfica diversificada dos estudos permitiu análise abrangente e representativa dos contextos agrícolas brasileiros.

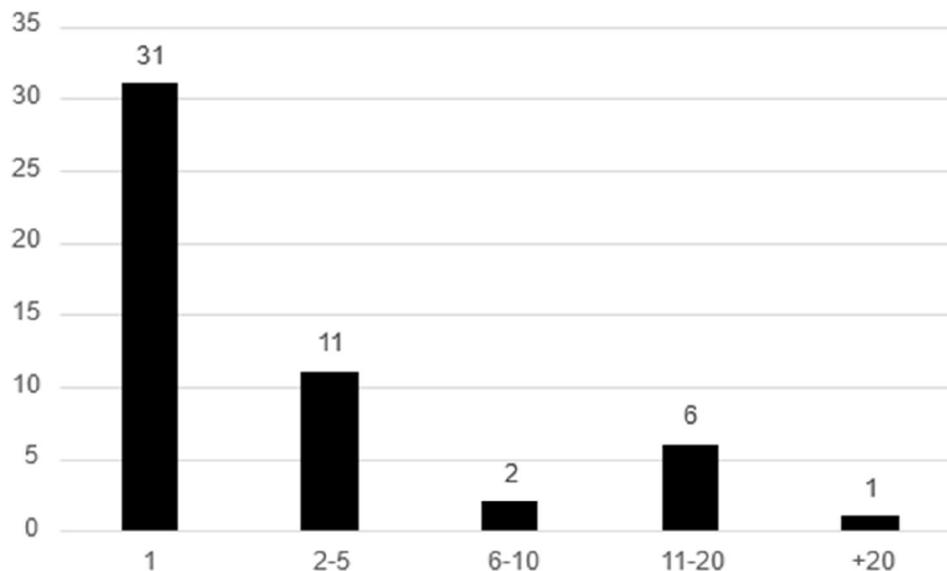
FIGURA 4.4 – Espacialização das localidades estudadas nos trabalhos científicos levantados, utilizando o AquaCrop no Brasil.



Fonte: O Autor (2024)

Dentre os estudos obtidos na revisão, 31 foram realizados para uma única localidade ou município (FIGURA 4.5), sugerindo concentração de pesquisas em áreas específicas. O resultado indicou tendência de estudos mais detalhados e aprofundados em algumas localidades, devido à disponibilidade de dados ou aspectos particulares das regiões. Referente à aplicação do AquaCrop, a concentração verificada indicou a necessidade de maior diversidade geográfica nas pesquisas, para assegurar a variabilidade dos sistemas agrícolas em diferentes contextos regionais brasileiros.

FIGURA 4.5 – Distribuição de frequência dos artigos levantados, por número de localidades estudadas, tratando da utilização do AquaCrop para o Brasil.



Fonte: O Autor (2024)

#### 4.2 Síntese dos trabalhos científicos levantados envolvendo análises de sensibilidade

Ao todo, foram encontrados cinco trabalhos que realizaram análise de sensibilidade (AS) do AquaCrop em condições brasileiras. As culturas estudadas foram milho (2 trabalhos), trigo e cana-de-açúcar (1 trabalho cada) e 1 trabalho estudou soja e milho. Os estados em que foram realizados estudos foram Paraná (3 trabalhos), São Paulo (2 trabalhos) e Santa Catarina (1 trabalho).

Nas AS realizadas com o AquaCrop foram identificados parâmetros que exerceram expressiva influência em suas saídas. Entre os parâmetros mais influentes destacaram-se (RIBEIRO, 2020; SOUZA et al., 2020b; ROSA et al., 2023b): densidade de plantas; cobertura máxima do dossel ( $CC_x$ ); tempo para o declínio do dossel ( $CDC$ ); coeficiente de cultivo ( $K_{C_{Trx}}$ ); produtividade de água da biomassa ( $WP^*$ ); índice de colheita de referência ( $H_{lo}$ ); coeficiente de estresse ( $K_s$ ); e, condutividade hidráulica saturada do solo ( $K_{sat}$ ).

Ribeiro (2020) avaliou o efeito das variáveis densidade de plantas,  $CGC$ ,  $CDC$  e  $Kc_{Trx}$  em simulações com a cana-de-açúcar. A variável mais influente foi  $Kc_{Trx}$ . Martini (2018) avaliou a sensibilidade dos parâmetros densidade de plantas,  $Zx$ , padrão de extração de água,  $Kc_{Trx}$ ,  $WP^*$ ,  $Ks$ ,  $ARM$ , contribuição da água subterrânea e cobertura do solo em simulações com a cultura do milho, no município de Concórdia - SC. Os parâmetros mais sensíveis foram  $Ks$  e  $Zx$ . Souza et al. (2020b) testaram a sensibilidade das variáveis  $Kc_{Trx}$ ,  $Hlo$ ,  $Ks$ ,  $ATS$  e  $K_{sat}$  em simulações da cultura do milho, em Castro - PR. A variável que mais afetou os resultados das simulações foi  $Kc_{Trx}$ .

A variação na densidade das plantas influencia diretamente na produtividade da cultura e competição por recursos entre as plantas.  $CCx$  e  $CDC$  afetam o desenvolvimento e a senescência do dossel, influenciando na interceptação da radiação solar e, conseqüentemente, produtividade da cultura.  $Kc_{Trx}$  e  $WP^*$  estão relacionados à eficiência no uso da água pela cultura, enquanto o  $Hlo$  reflete a eficiência da cultura na transformação da biomassa em rendimento. O  $Ks$  indica a resposta da cultura ao estresse hídrico, afetando diretamente o rendimento (FAO, 2023).

A profundidade máxima efetiva das raízes ( $Zx$ ) também foi identificada como parâmetro influente, diretamente relacionada à capacidade da cultura em obter água no solo. A variação da  $Zx$  impacta a disponibilidade de água para a cultura e, conseqüentemente, na sua produtividade (MARTINI, 2018).

Souza et al. (2020b) compararam o uso de dados padrão de solo do AquaCrop com parâmetros calibrados pelo usuário para as culturas milho e soja em regiões do Paraná e São Paulo. Os autores verificaram que os dados padrão comprometeram a precisão do modelo. O resultado ressaltou a importância da calibração dos parâmetros do solo para garantir a confiabilidade das simulações realizadas no AquaCrop, especialmente em contextos específicos de solo e clima.

A escolha e o ajuste adequado dos parâmetros do modelo são essenciais para garantir a precisão das estimativas, bem como a confiabilidade das análises realizadas com o AquaCrop. A AS identifica os parâmetros mais sensíveis e destaca a necessidade do cuidadoso processo de calibração e validação para adaptar o

modelo às condições específicas de cada região ou sistema agrícola, visando melhorar a sua aplicabilidade e utilidade na prática agrícola.

A AS também apresenta limitações e incertezas que devem ser consideradas ao interpretar os resultados. A principal delas está relacionada à escolha dos parâmetros a serem analisados. Embora seja possível avaliar vários parâmetros, a seleção dos mais relevantes pode ser desafiadora e subjetiva, influenciando os resultados da análise (BOOTE, 2020). Rosa et al. (2023b) examinaram todos os parâmetros do AquaCrop nos municípios de Castro e Ponta Grossa - PR e Itaberá - SP, para a cultura do trigo. Conforme os autores, por terem apresentado sensibilidade, os seguintes parâmetros deveriam receber prioridade para calibração pelo usuário, em simulações envolvendo a cultura do trigo:  $CCx$ ,  $CDC$ ,  $Kc_{Trx}$ ,  $WP^*$ ,  $Hlo$ ,  $K_{sat}$  e fertilidade do solo.

#### **4.3 Síntese dos trabalhos científicos levantados envolvendo calibração e validação dos parâmetros do AquaCrop**

As culturas mais estudadas envolvendo a utilização do AquaCrop no Brasil foram (TABELA 4.1): milho (8 artigos); soja (5 artigos); feijão-caupi (5 artigos); trigo (2 artigos); feijão (3 artigos); cana-de-açúcar, algodão, amendoim e forrageiras (brachiaria, leucena, palma e sorgo), hortaliças (coentro, rabanete e tomate), yacon e algodão (1 artigo para cada cultura).

Cada estudo levantado adotou métodos específicos para calibrar e validar os parâmetros do AquaCrop. As técnicas utilizadas variaram conforme objetivos do estudo e culturas agrícolas investigadas. Alguns estudos optaram por calibração manual, alterando os parâmetros do modelo para melhor se ajustarem aos dados observados, enquanto outros empregaram técnicas automatizadas, já existentes no AquaCrop. A validação dos parâmetros geralmente foi conduzida utilizando conjuntos de dados independentes, muitas vezes provenientes de experimentos de campo ou estações meteorológicas, para avaliar a capacidade do AquaCrop para simular o desempenho das culturas em condições ambientais. Alguns experimentos avaliaram o manejo de cultivos agrícolas irrigados (ANJOS, 2016; ESPADAFOR et al., 2017; OLIVEIRA, 2018; SILVA et al., 2018; MAGALHÃES et al., 2019; VIEIRA et

al., 2020; CONCEIÇÃO, 2021; FERNANDES, 2021; CONCEIÇÃO et al., 2022; NUNES, 2022). No levantamento realizado, verificou-se a complexidade e importância da calibração e validação dos parâmetros do AquaCrop para precisão e confiabilidade das simulações agrícolas.

#### **4.3.1 Considerações sobre os parâmetros calibrados nos trabalhos levantados**

Os estudos revisados realizaram calibração e validação de vários parâmetros para melhorar a precisão do AquaCrop para simular o crescimento das culturas em condições ambientais. Entre os parâmetros calibrados e validados, destacaram-se (TABELA 4.2): cobertura máxima do dossel ( $CCx$ ), coeficiente de declínio do dossel ( $CDC$ ), coeficiente de cultivo ( $Kc$ ), produtividade de água da biomassa ( $WP^*$ ) e Índice de colheita de referência ( $Hlo$ ).

A calibração do  $CCx$  apresentou variação nos valores otimizados nos estudos (TABELA 4.2), conforme a cultura, condições ambientais e regiões analisadas. Nos estudos realizados em regiões de clima mais úmido, os  $CCx$  foram mais altos, refletindo maior cobertura do dossel da cultura. Em regiões mais secas os  $CCx$  foram menores para melhorar a adaptação do modelo às condições locais. As variações verificadas destacaram a importância de calibrar o  $CCx$  de forma específica para cada contexto agrícola, garantindo maior precisão das simulações com o AquaCrop. No levantamento, verificou-se os seguintes percentuais de  $CCx$ : 99% para soja e feijão; entre 85% e 99% para cana-de-açúcar; entre 80% e 95% para milho; e, entre 93% e 94% para feijão-caupi em condições ideais (TABELA 4.2). Em condições de seca severa foram encontrados  $CCx$  de até 25% para feijão-caupi, refletindo a adaptação da planta às condições de estresse hídrico (FERREIRA e SILVA, 2023). Alta porcentagem indica cobertura máxima do dossel ( $CCx$ ) mais completa, o que é desejável para maximizar a interceptação de luz e, conseqüentemente, a produtividade da cultura.

A calibração do Coeficiente de Declínio do Dossel ( $CDC$ ) indicaram variação dos valores otimizados, dependendo das condições específicas de cada localidade e cultura. Rosa et al. (2023a), estudando a soja na região sul do Brasil encontrou  $CDC$  entre 4,8 e 14,5%  $\text{dia}^{-1}$ , indicando ampla resposta das culturas à senescência do dossel. Silva et al. (2018), em Palmas - TO, obteve  $CDC$  médio mais restritos e

baixos (3,1% dia<sup>-1</sup>) para a cultura da soja. Os resultados destacaram a importância de calibrar o *CDC* conforme as condições locais e características específicas das culturas estudadas.

TABELA 4.2 – Parâmetros calibrados, obtidos nos estudos tratando de calibração e/ou validação de parâmetros do AquaCrop, para o Brasil.

Autores	Cultura	----- Parâmetros calibrados -----				
		<i>CCx</i> (%)	<i>CDC</i> (% dia <sup>-1</sup> )	<i>K<sub>C<sub>Trx</sub></sub></i> (adimensional)	<i>WP*</i> (g m <sup>-2</sup> )	<i>H<sub>lo</sub></i> (%)
Alencar (2014)	Cana-de-açúcar	100	4,0	1,1	22 - 36	32,7 - 44,1
Anjos (2016)	Milho	—	—	—	31,0	35 - 45
Costa (2016)	Feijão	—	12,0 - 20,3	1,10	9,9 - 12,8	43,0 - 51,7
Espadafor et al. (2017)	Feijão	99	0,881**	1,05	15	40
Freitas (2018)	Tomate	74	—	—	—	57
Oliveira (2018)	Coentro	11	—	—	17	25
Silva et al. (2018)	Soja	99	3,1	—	15,5	—
Rosa et al. (2019)	Trigo	80 - 93	7,1 - 8,4	1,05 - 1,4	16 - 20	46 - 70
Cavalcante Junior (2019)	Milho	90	6,7	—	30,0	33
Magalhães et al. (2019)	Feijão	—	15,5	—	15	58
Oliveira (2019)	Brachiaria brizantha	100	0,08	1,1	—	—
Silva (2019)	Feijão-caupi	60	—	—	—	26 - 72
Almeida (2020)	Rabanete	30	—	—	17	51
Dantas (2020)	Leucena	11 - 15	—	—	—	61 - 70
Ribeiro (2020)	Cana-de-açúcar	85 - 99	—	1,0 - 1,50	30	—
Rosa et al. (2020b)	Trigo	89 - 93	7,1 - 8,4	1,25 - 1,37	17 - 19	55 - 62
Sales et al. (2020)	Yacon	83	1,08	—	15	56
Souza et al. (2020a)	Milho	—	0,427 - 0,489	1,05	32 - 33	30 - 53
Vieira et al. (2020)	Feijão-caupi	93	0,53	1,14	16,5	29
Conceição (2021)	Milho	80 - 95	8,0 - 12,7	—	33,7	47 - 55
Fernandes (2021)	Algodão	33,2 - 61,45	—	—	—	45 - 54
Nunes et al. (2021)	Feijão-caupi	93	—	1,14	16,5	29
Conceição et al. (2022)	Milho	80 - 95	11,3 - 14,3	—	33,7	48 - 55
Nunes (2022)	Amendoim	87	0,789	1,05	16	60
Pinheiro (2022)	Palma forrageira e sorgo	43-82 e 72-96	3,1-9,3 (sorgo)	0,52 e 1,1	27-40 e 25-34	50 e 80
Zizinga et al. (2022)	Milho	84	10	—	30,5	48
Farias et al. (2023)	Soja	—	0,709	—	17	45
Ferreira et al. (2023)	Feijão-caupi	25,4 - 94,0	—	—	17	9,3 - 38,1
Rosa et al. (2023a)	Soja	99	4,8 - 14,5	1,10 - 1,15	16 - 20	26 - 47

\*\* *CDC* com unidade em “% graus-dia<sup>-1</sup>”.

No levantamento realizado, os *CDC* otimizados no AquaCrop foram obtidos em diferentes unidades de medida. Os estudos expressaram o *CDC* em “% dia<sup>-1</sup>” ou “% graus-dia<sup>-1</sup>”. A unidade utilizada reflete diferentes abordagens metodológicas e interpretações dos pesquisadores, mas destaca a necessidade de se atentar e considerar as unidades adequadas ao interpretar e comparar os resultados entre estudos. Os *CDC* levantados nos estudos variaram da seguinte forma para as culturas: entre 12 e 20,3% dia<sup>-1</sup> para o feijão; entre 6,7 e 14,3% dia<sup>-1</sup> para o milho; entre 3,1 e 14,5% dia<sup>-1</sup> para a soja; entre 7,1 e 8,4% dia<sup>-1</sup> para o trigo; 4% dia<sup>-1</sup> para cana-de-açúcar; e, 0,53% graus-dia<sup>-1</sup> para o feijão-caupi. Os *CDC* indicaram sensibilidade às condições de cultivo, culturas e variabilidade de cultivares. Os intervalos de *CDC* para milho, soja e trigo foram mais amplos, sugerindo maior variabilidade na resposta das culturas ao declínio do dossel. Os intervalos foram mais estreitos para o feijão e cana-de-açúcar, indicando resposta mais consistente ao manejo do dossel.

A calibração do *Kc* nos estudos (TABELA 4.2) revelaram variação muito pequena nos valores otimizados. Rosa et al. (2020b) verificaram para o trigo, nos Campos Gerais, *Kc* entre 1,25 e 1,37, destacando a influência da cultura no processo de calibração do AquaCrop. De forma geral, obteve-se os seguintes *Kc* para as culturas: 1,05 para o milho; entre 1,10 e 1,15 para a soja; 1,14 para o feijão-caupi; entre 1,05 e 1,4 para o trigo; entre 1,05 e 1,10 para o feijão; e, entre 1,0 e 1,5 para a cana-de-açúcar. Os *Kc* podem ser influenciados pelo clima, práticas de manejo e ambiente de cultivo. É fundamental validar localmente os *Kc* para assegurar a precisão das simulações do AquaCrop em diferentes regiões e condições agrícolas.

A calibração da Produtividade de água da biomassa (*WP\**) também variaram conforme as culturas e condições ambientais (TABELA 4.2). O *WP\** é fundamental na equação que calcula a produção de biomassa no AquaCrop, representando a quantidade de biomassa produzida por unidade de água transpirada pela cultura. No levantamento realizado (TABELA 4.2) foram encontrados *WP\** variando entre: 22 e 36 g m<sup>-2</sup> para a cana-de-açúcar; 30 e 33,7 g m<sup>-2</sup> para o milho; 15,5 e 20 g m<sup>-2</sup> para a soja; 16 e 20 g m<sup>-2</sup> para o trigo; 16,5 e 17 g m<sup>-2</sup> para o feijão-caupi; e, 9,9 e 15 g m<sup>-2</sup> para o feijão. Valores otimizados diferentes da *WP\** para as culturas (milho, soja,

trigo, feijão-caupi, feijão e cana-de-açúcar), refletiram suas características fisiológicas distintas, especialmente para a eficiência no uso da água. As plantas C4 (milho e cana-de-açúcar) apresentam valores mais altos de  $WP^*$  em comparação com as plantas C3 (soja, trigo e feijão). As plantas C4 realizam a fotossíntese mais eficientemente em altas temperaturas e disponibilidade limitada de água, resultando em maior produtividade de biomassa por unidade de água consumida. Os intervalos de  $WP^*$  obtidos no levantamento (TABELA 4.2) refletiram as adaptações fisiológicas das culturas ao ambiente e suas demandas variadas por água.

A calibração do Índice de colheita ( $Hlo$ ) também indicaram valores otimizados variando, nos estudos revisados. Cavalcante Junior (2019), no estado de Alagoas, encontrou  $Hlo = 0,33\%$  para o milho, enquanto Conceição et al. (2022) obtiveram  $Hlo = 0,48\%$  para a mesma cultura, em Alegrete - RS. No levantamento realizado, verificou-se  $Hlo$  calibrados variando entre: 30 e 55% para o milho; 26 e 47% para a soja; 9,3 e 72% para o feijão-caupi; 46 e 70% para o trigo; 40 e 58% para o feijão; e, 32,7% e 44,1% para a cana-de-açúcar. A variação indicou que o  $Hlo$  é bem atuante, e seu valor depende das características específicas do cultivar e região. Sua calibração proporciona modelagem mais precisa do rendimento das culturas no AquaCrop.

O  $Hlo$  representa a fração da biomassa da cultura disponível para a colheita. Portanto,  $Hlo$  mais altos indicam maior biomassa total disponível para ser colhida, afetando diretamente a estimativa da produtividade da cultura.  $Hlo$  mais baixos significam menor biomassa disponível para colheita, o que pode resultar em produtividade subestimada pelo modelo. A calibração do  $Hlo$  para cada cultivar permite representação mais precisa da partição de biomassa, garantindo previsões de produtividade mais confiáveis e realistas no AquaCrop.

#### **4.3.2 Eficácia do AquaCrop para simular a produtividade de cultivos agrícolas**

Os estudos levantados adotaram vários indicadores estatísticos para validar, em análise de regressão linear, os parâmetros do modelo AquaCrop: coeficiente de determinação ( $R^2$ ); coeficiente de correlação ( $r$ ); eficiência de Nash-Sutcliffe ( $NSE$ ); coeficiente de concordância de Willmott (1982) ( $d$ ); índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997); erros absoluto ( $EA$ ) e relativo ( $ER$ ); e, raiz quadrada do erro-médio

(*RMSE*). Os indicadores estatísticos são importantes para avaliar a qualidade das simulações realizadas. As associações são feitas entre os respectivos valores observados no campo e estimados com o AquaCrop, simulando as condições ambientais que foram parametrizadas na calibração do modelo (OLIVEIRA, 2019; ALMEIDA, 2020; SANTOS, 2022).

De forma geral, a validação dos parâmetros do AquaCrop foram promissoras, indicando boa associação entre os respectivos valores observados no campo e simulação com o modelo (TABELA 4.3). Desta forma, observou-se nos trabalhos levantados os seguintes indicadores estatísticos:

- 16 artigos de um total de 23, obtiveram  $r \geq 0,9$ , indicando estreitas associações entre as produtividades estimadas e observadas (TABELA 4.3);
- 19 artigos de um total de 23, obtiveram  $d \geq 0,9$ , indicando proximidade dos valores estimados e observados da reta de 45° (1:1), nas análises de regressão linear realizadas (TABELA 4.3);
- 9 artigos de um total de 11, obtiveram Índice “*c*”  $\geq 0,8$ . O resultado é interessante, pois o Índice “*c*” é muito rigoroso, resultando do produto entre “*d*” e “*r*” (TABELA 4.3);
- Verificou-se *RMSE* para a produtividade entre: 510 e 1136 kg ha<sup>-1</sup> para o milho; 419 e 536 kg ha<sup>-1</sup> para a soja; e, 378 e 508 kg ha<sup>-1</sup> para o trigo. Os resultados indicaram adequação regular do modelo às condições reais de cultivo. No entanto, é importante ressaltar que a interpretação dos resultados deve levar em consideração as limitações específicas de cada estudo, bem como a variabilidade natural presente nos sistemas agrícolas (TABELA 4.3);
- 12 artigos de um total de 16, obtiveram *RE* < 10%, considerando a produtividade. No entanto, o erro absoluto apresentou grande variabilidade nos estudos (2,66 < *EA* < 740 kg ha<sup>-1</sup>; TABELA 4.3).

É importante considerar que a validação do AquaCrop pode ser aprimorada em certos aspectos e que a variabilidade nos resultados pode ser influenciada por uma série de fatores, como: qualidade dos dados observados; seleção dos parâmetros calibrados; e, representatividade das condições climáticas e do solo. A

análise detalhada dos resultados experimentais em diversos cenários agrícolas possibilita o aprimoramento do modelo AquaCrop e fortalece sua confiabilidade.

TABELA 4.3 – Estatísticas obtidas nos estudos tratando de calibração/validação ou validação dos parâmetros do AquaCrop, para o Brasil.

Autores	Cultura	----- Indicadores estatísticos -----					
		<i>AE</i> (kg ha <sup>-1</sup> )	<i>RE</i> (%)	<i>RMSE</i> (kg ha <sup>-1</sup> )	<i>r</i> (ad.)	<i>d</i> (ad.)	<i>c</i> (ad.)
Martins et al. (2015)	Milho	—	—	—	0,66	0,84	0,68
Anjos (2016)	Milho	—	<21,50	—	—	—	—
Battisti et al. (2017)	Soja	458	—	536	0,84	0,91	—
Espadafor et al. (2017)	Feijão	—	—	160	0,94	0,978	—
Freitas (2018)	Tomate	—	—	242	0,9	0,967	—
Martins et al. (2018)	Milho	929	—	1136	0,86	0,72	—
Oliveira (2018)	Coentro	300	—	—	—	0,5	—
Silva et al. (2018)	Soja	330	—	—	0,927	0,96	—
Cavalcante Junior (2019)	Milho	—	1,70 - 7,58	—	0,96	0,94	0,91
Magalhães et al. (2019)	Feijão	—	0,43 - 30,42	—	—	—	—
Nunes et al. (2019)	Feijão-caupi	2,66 - 66,46	0,34 - 5,39	—	—	—	—
Oliveira (2019)	Brachiaria brizantha	—	—	290 - 540	0,6 - 0,9	0,99 - 1,00	0,64 - 0,94
Silva (2019)	Feijão-caupi	301 - 468	—	—	—	0,912 - 0,954	—
Almeida (2020)	Rabanete	—	0,868 - 5,978	6,3	—	0,98	—
Dantas (2020)	Leucena	—	—	—	—	0,99	—
Ribeiro (2020)	Cana-de-açúcar	< 10000	—	—	alto	alto	alto
Rosa et al. (2020a)	Trigo	137,88 - 158,26	3,68 - 4,05	378,07 - 426,52	0,91	0,95	0,86
Rosa et al. (2020b)	Trigo	150 - 156	3,8 - 8,1	398 - 508	0,90 - 0,91	0,94 - 0,95	0,85 - 0,86
Sales et al. (2020)	Yacon	740	5,08	1220	0,93	0,98	—
Souza et al. (2020a)	Milho	6 - 121	1,07	—	0,98	0,99	0,97
Vieira et al. (2020)	Feijão-caupi	33 - 185	3 - 25	—	—	—	—
Conceição (2021)	Milho	—	—	510	0,97	—	—
Fernandes (2021)	Algodão	—	5,9 - 30,1	—	0,98	0,93	0,92
Nunes et al. (2021)	Feijão-caupi	2,66 - 66,46	0,34 - 5,39	—	—	—	—
Conceição et al. (2022)	Milho	—	—	510	0,97	—	—
Nunes (2022)	Amendoim	—	alto	—	baixo	—	—
Pinheiro (2022)	Palma forrageira e sorgo	—	—	—	0,92 - 1,0	0,95 - 1,0	0,87 - 1,0
Santos (2022)	Soja	—	5,38	—	0,97	0,94	0,91
Zizinga et al. (2022)	Milho	—	—	—	0,91 - 0,99	0,90 - 0,98	—
Farias et al. (2023)	Soja	—	—	60	0,98	—	—
Ferreira et al. (2023)	Feijão-caupi	—	baixo	—	alto	0,38 - 1,0	—
Rosa et al. (2023a)	Soja	277,69	7,12	419,13	0,89	0,92	0,81

### 4.3.3 Limitações e desafios na aplicação do AquaCrop

A validação dos parâmetros do AquaCrop indicaram boa concordância entre valores simulados e observados no campo, na maioria dos estudos. No entanto, 11 de 30 trabalhos levantados apresentaram resultados insatisfatórios ( $r < 0,9$ ;  $NSE < 0,9$ ; Índice  $c < 0,8$ ;  $RE > 10\%$ ). Os desempenhos inferiores podem ser atribuídos à complexidade das culturas estudadas, diversidade de condições ambientais e manejo, bem como eventuais limitações do AquaCrop em simular as condições ambientais dos locais e culturas de forma precisa.

Quatro dos 11 artigos insatisfatórios trataram de culturas pouco estudadas com o AquaCrop, como algodão, amendoim, brachiaria e coentro (OLIVEIRA, 2018; OLIVEIRA, 2019; FERNANDES, 2021; NUNES, 2022). A falta de dados e conhecimentos prévios sobre essas culturas pode ter contribuído para a menor precisão das simulações. Outros quatro trabalhos, dos 11 insatisfatórios, utilizaram dados numerosos e variados, abrangendo diversas safras, cultivares e localidades, o que pode ter introduzido maior complexidade e variabilidade nos resultados (MARTINS et al., 2015; BATTISTI et al., 2017; MARTINS et al. 2018; ROSA et al. 2023a) (TABELA 4.3). Nos três artigos restantes, não ficou claro o motivo específico para a baixa precisão das simulações. Dois dos estudos foram sobre feijão-caupi e um sobre feijão, indicando a necessidade de investigações adicionais para entender melhor as possíveis fontes de erro e aprimorar a capacidade do modelo de simular essas culturas com precisão (MAGALHÃES et al., 2019; VIEIRA et al., 2020; FERREIRA et al., 2022). Os resultados ressaltaram a importância de continuar validando e aperfeiçoando os parâmetros do AquaCrop, para garantir sua robustez e confiabilidade em diferentes condições e culturas.

Os procedimentos de calibração e validação dos parâmetros do AquaCrop apresentam limitações e incertezas que podem influenciar na confiabilidade dos resultados. Vieira et al. (2020) apontaram como importante limitação a falta de diversidade nos conjuntos de dados utilizados. Vinte e quatro dos 35 trabalhos analisados usaram dados de uma única localidade, o que pode resultar em representação limitada da variabilidade espacial das condições agrônômicas. Além disso, 13 estudos se basearam em dados de apenas uma safra, o que não permite capturar a variabilidade interanual e os efeitos das condições climáticas sazonais

nas safras sucessivas. A utilização de um único cultivar em 17 estudos também pode ter limitado a generalização dos resultados, pois diferentes variedades podem ter respostas distintas aos parâmetros do modelo (TABELA 4.4).

TABELA 4.4 – Estudos que realizaram calibração ou calibração/validação de parâmetros do AquaCrop, para o Brasil.

Autores	Cultura	----- Quantidade (unidades) -----		
		Locais	Safras	Cultivares
Alencar (2014)	Cana-de-açúcar	1	1	8
Martins et al. (2015)	Milho	3	6	12
Anjos (2016)	Milho	2	4	9
Costa (2016)	Feijão	1	1	1
Battisti et al. (2017)	Soja	4	10	4
Espadafor (2017)	Feijão	1	3	2
Freitas (2018)	Tomate	1	2	1
Martins et al. (2018)	Milho	3	4	6
Oliveira (2018)	Coentro	1	1	1
Silva et al. (2018)	Soja	7	3	1
Rosa et al. (2019)	Trigo	1	8	2
Cavalcante Junior (2019)	Milho	1	1	1
Magalhães et al. (2019)	Feijão	1	1	1
Nunes et al. (2019)	Feijão-caupi	1	2	1
Oliveira (2019)	Brachiaria brizantha	1	3	2
Silva (2019)	Feijão-caupi	1	1	1
Almeida (2020)	Rabanete	1	1	1
Dantas (2020)	Leucena	1	1	1
Ribeiro (2020)	Cana-de-açúcar	6	7	Várias
Rosa et al. (2020a)	Trigo	1	8	2
Rosa et al. (2020b)	Trigo	2	11	5
Sales et al. (2020)	Yacon	1	1	1
Souza et al. (2020a)	Milho	13	10	Variedades crioulas
Vieira et al. (2020)	Feijão-caupi	1	1	1
Conceição (2021)	Milho	21	47	Não informado
Fernandes (2021)	Algodão	1	1	1
Nunes et al. (2021)	Feijão-caupi	1	2	1
Conceição et al. (2022)	Milho	2	4	9
Nunes (2022)	Amendoim	1	3	2
Pinheiro (2022)	Palma forrageira e sorgo	12	1	6 e 3
Santos (2022)	Soja	1	2	2
Zizinga et al. (2022)	Milho	1	3	1
Farias et al. (2023)	Soja	1	1	1
Ferreira et al. (2023)	Feijão-caupi	1	2	1
Rosa et al. (2023a)	Soja	1	2	2

#### **4.4 Síntese dos trabalhos científicos levantados envolvendo simulações de culturas**

Ao todo, foram encontrados 15 trabalhos que realizaram simulações de culturas com o AquaCrop. As simulações foram realizadas para avaliar os efeitos: Lâminas de irrigação sobre a produtividade de determinada cultura (7 trabalhos); Mudanças climáticas sobre o crescimento e desenvolvimento de certa cultura (4 trabalhos); Interações entre época de plantio e variáveis climáticas em determinadas região e cultura (3 trabalhos); e, Cobertura do solo sobre evapotranspiração e produtividade (1 trabalho). As culturas estudadas foram milho (6 trabalhos), soja (5 trabalhos), cana-de-açúcar (2 trabalhos), amendoim, feijão e feijão-caupi (1 trabalho cada).

Os subitens dispostos a seguir descrevem aspectos, resultados e conclusões obtidas nos estudos que utilizaram o AquaCrop para realizar simulações com cultivos agrícolas.

##### **4.4.1 Lâminas de irrigação**

Castillo et al. (2018) realizando simulações com a cultura da soja irrigada, verificaram aumento médio de 1670 kg ha<sup>-1</sup> em comparação com a média histórica da produtividade do período e região de estudo. O incremento verificado nas simulações ressaltou o impacto positivo e a viabilidade da irrigação para melhorar a produtividade da soja na bacia do rio Pitiribu - RS.

Silvestre et al. (2019a) e Costa et al. (2021) analisaram os efeitos das lâminas de irrigação com o AquaCrop no crescimento, desenvolvimento e produção de milho e feijão. As análises permitiram verificar como a quantidade de água aplicada influenciou os sistemas agrícolas estudados. Os autores consideraram que o AquaCrop mostrou-se confiável nas simulações do crescimento e desenvolvimento do milho e feijão.

Martim et al. (2009) avaliaram a eficiência do uso da água e o coeficiente de resposta específico para cultivares de amendoim. A análise permitiu quantificar o quanto cada variedade utiliza de água disponível, bem como sua resposta às variações no suprimento hídrico, contribuindo para compreensão mais aprofundada

das estratégias de manejo da irrigação. A análise da eficiência no uso da água em cenários de irrigação envolveram as seguintes etapas (MARTIM et al., 2009): *i*) Foram identificados os cenários de irrigação a serem simulados, que variaram conforme à lâmina de irrigação aplicada às culturas agrícolas; *ii*) Analisou-se as respostas das culturas agrícolas em cada cenário, considerando variáveis como crescimento da cultura, produção de biomassa e rendimento da cultura; *iii*) Calculou-se a eficiência no uso da água para cada cenário, comparando a produtividade das culturas com o volume de água aplicado; *iv*) Baseando-se nos cálculos, foram identificados os cenários de irrigação que proporcionaram maior produtividade com menor consumo de água, destacando as lâminas de irrigação mais eficientes; *v*) Com os resultados obtidos, verificou-se as vantagens e desvantagens de cada cenário em termos de eficiência no uso da água e impacto na produtividade das culturas; e, *vi*) Baseando-se nas simulações, foram fornecidas recomendações práticas para auxiliar nas decisões relacionadas ao manejo da água na agricultura, para maximizar a produtividade das culturas com uso sustentável dos recursos hídricos.

Conceição (2021), determinando a lâmina ótima econômica em cultivo irrigado com o AquaCrop, verificou que lâminas de água superiores a 81,5% da *ETc* do milho podem resultar desperdício de recursos hídricos, sem proporcionar aumento significativo de produtividade ou rendimento econômico da cultura.

A viabilidade econômica das estratégias de irrigação pode ser avaliada com resultados simulados na modelagem. Nos cenários com o AquaCrop, Conceição (2021) simulou e analisou o impacto de lâminas de irrigação na produtividade da cultura do milho nos municípios de Alegrete e Santiago - RS. Obtido os resultados, a autora calculou os custos de implementação e manutenção dos sistemas de irrigação, retorno financeiro esperado e benefícios socioeconômicos para os agricultores. Na análise de viabilidade econômica, também é essencial considerar o custo inicial de instalação do sistema de irrigação, incluindo equipamentos, infraestrutura e mão de obra. Além disso, os custos operacionais, como energia elétrica, combustível e manutenção, devem ser estimados ao longo do ciclo de cultivo.

A modelagem também pode ajudar na previsão do retorno financeiro esperado, baseando-se na produtividade estimada com o AquaCrop para cultivos irrigados. A análise envolve a avaliação dos custos de produção e o preço de mercado dos produtos agrícolas, considerando a demanda e oferta no mercado. Além dos aspectos financeiros, também é importante considerar os benefícios socioeconômicos associados às diferentes estratégias de irrigação, como a geração de empregos, o desenvolvimento rural e a segurança alimentar das comunidades agrícolas. Ao integrar todos esses aspectos nas simulações, os agricultores podem tomar decisões mais consistentes sobre as estratégias de irrigação que melhor atenderão suas necessidades econômicas e sociais, contribuindo para a sustentabilidade e o desenvolvimento da agricultura (CONCEIÇÃO, 2021).

Ribeiro (2020) avaliou o desempenho da cultura da cana-de-açúcar em diversas regiões do Brasil, considerando o uso de irrigação. O estudo verificou que a prática de irrigação na cultura da cana-de-açúcar pode expandir significativamente as áreas de cultivo brasileiras. A cana-de-açúcar é uma cultura importante economicamente para o Brasil, sendo amplamente utilizada na produção de açúcar, etanol e energia. No entanto, muitas regiões onde a cana-de-açúcar é cultivada enfrentam desafios relacionados à disponibilidade de água, especialmente durante períodos de estiagem. Assim, a prática da irrigação pode ser uma solução para mitigar os impactos negativos da escassez de água e garantir o suprimento adequado para as plantações. Os aspectos abordados são especialmente relevantes em um contexto de mudanças climáticas, em que eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, podem se tornar mais frequentes e intensos.

As informações provenientes de simulações com o AquaCrop envolvendo práticas de irrigação são importantes para o planejamento estratégico da agricultura irrigada no Brasil (CASTILLO et al., 2018; RIBEIRO, 2020; VIEIRA et al., 2020). No levantamento bibliográfico realizado, verificou-se estudos identificando áreas potenciais para expansão da irrigação (RIBEIRO, 2020), desenvolvimento de sistemas de gestão eficientes de recursos hídricos (RIBEIRO, 2020) e adoção de tecnologias e práticas agrícolas sustentáveis (RIBEIRO, 2020; VIEIRA et al., 2020).

#### 4.4.2 Cenários climáticos

No levantamento bibliográfico realizado, quatro artigos abordaram cenários climáticos com o AquaCrop em suas análises. Os resultados obtidos estão descritos a seguir:

*i)* Minuzzi e Lopes (2015) verificaram para o Centro-Oeste do Brasil, que a primeira safra de milho provavelmente terá ciclo mais curto, mas não sofrerá estresse hídrico significativo. À medida que o ciclo do milho safrinha foi reduzido, observou-se que sua produtividade e necessidade de irrigação líquida tenderam a diminuir;

*ii)* Martins et al. (2019) concluíram que é viável evitar perdas expressivas na produção total de milho na região nordeste do Brasil, em todos os cenários analisados, exceto no cenário RCP8.5 entre 2071 e 2099. Para manter os níveis atuais de produção será necessário aumentar consideravelmente o consumo de água, podendo chegar a até 140%;

*iii)* Verificou-se nas simulações que a duração do ciclo da soja diminuirá nas regiões mais frias do Brasil. Mesmo sem a necessidade de irrigação em cenários climáticos futuros, espera-se aumento na produtividade e eficiência no uso da água para a cultura (MINUZZI et al., 2017);

*iv)* Os aumentos na concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura do ar, conforme projetado nos modelos climáticos HadGEM2-ES e MIROC5 sob os cenários de estabilização (RCP 4.5) e progressão (RCP 8.5), contribuirão para o aumento na produtividade da soja até o final deste século, conforme estimativas realizadas no AquaCrop (SILVA et al., 2020).

#### 4.4.3 Épocas de plantio

As épocas de plantio apresentam diversos riscos para as culturas agrícolas, principalmente relacionados à exposição a estresses climáticos. Plantios realizados no início ou final da estação de chuvas podem estar sujeitos a períodos de seca ou excesso de umidade, afetando o desenvolvimento das plantas e reduzindo a produtividade. Variações na temperatura também influenciam o ciclo de desenvolvimento das culturas, levando a problemas como quebra de safra ou baixa qualidade dos produtos (ANJOS, 2011).

Silvestre et al. (2019) simulando o cultivo de cana-de-açúcar com o AquaCrop, em São Roque do Canaã - ES, verificaram que o plantio realizado em abril apresentou resultados satisfatórios. O plantio no mês de maio foi identificado como mais arriscado.

Gurski et al. (2021) observaram no estado do Paraná que as menores deficiências hídricas para a cultura da soja ocorreram quando a semeadura foi realizada entre 27 e 31 de dezembro. Os menores excessos hídricos foram registrados entre 08 e 17 de outubro. Para o milho, os autores verificaram para a primeira e segunda safras que as menores deficiências ocorrem nas semeaduras entre 17 e 26 de dezembro e entre 22 e 31 de março, respectivamente. Os menores excessos hídricos variaram conforme o nível de probabilidade analisado.

Anjos (2011), simulando épocas de semeadura no AquaCrop e investigando o que ocorreu com o armazenamento de água no solo, evapotranspiração, drenagem e escoamento superficial no cultivo do milho, no Agreste Alagoano, verificaram que os plantios realizados em 10 de junho proporcionaram maiores produtividades. O AquaCrop obteve estimativas precisa do rendimento de milho com 18 dias de antecedência à colheita na região.

As estimativas de rendimento de cultivos agrícolas são importantes para decisões relacionadas à comercialização e investimento na atividade agrícola. Os agricultores podem planejar suas estratégias de comercialização, decidindo quando e como vender suas safras para obter os melhores preços no mercado. Além disso, as previsões de rendimento fornecem informações importantes para investidores e instituições financeiras, que podem usar os dados para avaliar o potencial de retorno de investimentos em operações agrícolas (ANJOS, 2011).

#### **4.4.4 Tipos de solo**

Apenas dois trabalhos avaliaram sistematicamente o efeito de diferentes tipos de solo sobre o desempenho das simulações. Estudos adicionais são importantes para entender melhor como as variações no tipo de solo afetam as simulações no AquaCrop.

Piekarski et al. (2016) testaram três tipos de solo (cambissolo háplico, planossolo háplico e latossolo vermelho) com a cultura da soja, nos municípios de Castro-PR, Itaberá-SP e Ponta Grossa-PR e obtiveram aproximadamente 92% de desempenho satisfatório em termos de precisão do modelo. O melhor desempenho ocorreu nas simulações de experimentos realizados em Latossolo Vermelho distrófico típico, de textura argilo-arenosa.

Souza et al. (2020b), estudando a variável textura do solo, compararam o uso de dados sugeridos pelo AquaCrop com dados observados para as culturas milho e soja, em regiões do Paraná e São Paulo. Os autores verificaram que os dados observados produziram resultados mais precisos. Desta forma, segundo os autores, o uso de dados sugeridos pelo modelo proporciona facilidades, mas deve ser evitado.

#### **4.5 Síntese dos trabalhos científicos levantados envolvendo comparações com outros modelos**

A comparação do AquaCrop com outros modelos de simulação de cultivos é fundamental para avaliar sua eficácia e confiabilidade em diferentes contextos agrícolas, identificando e indicando suas qualidades e limitações para os usuários e pesquisadores. Além disso, ajudam a validar e aprimorar o AquaCrop, contribuindo para o avanço da modelagem agrícola, melhorando sua aplicabilidade e garantindo sua utilidade em diversas situações práticas.

Na revisão bibliográfica realizada foram identificados apenas dois artigos (ALVES et al., 2021; PINHEIRO et al., 2021) comparando o AquaCrop com outros modelos.

Pinheiro et al. (2021) compararam a estrutura e aplicabilidade dos principais modelos de simulação de culturas disponíveis na literatura, incluindo o AquaCrop. A intenção foi diagnosticar opções disponíveis para os pesquisadores e profissionais agrícolas. Nas análises realizadas, os autores verificaram que as mudanças climáticas podem intensificar as perdas de produtividade das culturas agrícolas. Neste caso, o uso da modelagem é fundamental para a compreensão e

preenchimento de lacunas existentes, especialmente em sistemas de cultivo com informações incipientes, como é o caso de culturas forrageiras.

Alves et al. (2021) avaliaram procedimentos metodológicos para estimar a evapotranspiração real de um cultivar de soja (BRS 7581RR) em condições de déficit hídrico. Nas análises foram considerados os procedimentos para estimativa da evapotranspiração real que se encontram nos modelos FAO56 Dual, AquaCrop e Jensen and Heermann. Os resultados indicaram que o modelo Jensen and Heermann ( $NSE_{\text{médio}} = 0,65$ ) tiveram o melhor desempenho para estimar a evapotranspiração real da cultura da soja na região do Cerrado, seguido pelo modelo FAO56 Dual ( $NSE = 0,60$ ). O AquaCrop apresentou desempenho inferior ( $NSE = 0,48$ ) em comparação aos demais modelos.

#### **4.6 Limitações da revisão bibliográfica realizada e perspectivas para seu aprimoramento**

A revisão bibliográfica realizada permitiu o levantamento de informações interessantes sobre as potencialidades e uso do AquaCrop para a agricultura brasileira. No entanto, é importante reconhecer que existem limitações no levantamento realizado:

- O objetivo e intenção da revisão consistiu em levantar estudos publicados em português ou inglês, conduzidos em regiões brasileiras. Logo, houve a exclusão de estudos relevantes em outros idiomas ou conduzidos em outras regiões agrícolas do planeta;
- A qualidade e abrangência dos estudos incluídos no levantamento podem variar, apresentando limitações metodológicas ou de amostragem, afetando a validade dos resultados e das conclusões obtidas;
- A revisão levantou estudos que utilizaram o AquaCrop para simular o desempenho de culturas agrícolas em diferentes condições. No entanto, outros modelos de simulação podem oferecer perspectivas complementares que não foram abordadas no presente Trabalho de Conclusão de Curso;

Para superar as limitações e expandir o conhecimento na área, sugere-se os seguintes aspectos para pesquisas visando a realização de levantamentos semelhantes ao do presente estudo:

- Considerar estudos de outros países para ter melhor noção da abrangência da utilização do AquaCrop;
- Avaliação crítica da qualidade dos estudos, incluindo a validade dos dados de entrada, representatividade das amostras e robustez das análises estatísticas, para maior confiabilidade dos resultados.

A expansão do levantamento, abordando mais áreas de pesquisa e culturas agrícolas, poderá melhorar ainda mais o diagnóstico do desempenho do AquaCrop. Esse tipo de análise contribui diretamente com os pesquisadores que pretendem utilizar o AquaCrop, e indiretamente para o avanço do conhecimento e aprimoramento das práticas agrícolas sustentáveis, ajudando a enfrentar os desafios globais relacionados à segurança alimentar e às mudanças climáticas.

## **5 CONCLUSÕES**

O levantamento e as análises realizadas no presente estudo permitiram chegar às seguintes conclusões:

- Identificou-se crescimento no número de publicações com o AquaCrop entre 2014 e 2020 e tendência de estabilização entre 2021 e 2023; e desigualdade regional, com menos publicações no Centro-Oeste e Norte do país;
- Calibração e validação dos parâmetros do AquaCrop predominam na realização dos estudos levantados, enquanto análises comparativas entre o AquaCrop e outros modelos de simulação de culturas são mais escassos;
- O AquaCrop predominantemente obteve bom desempenho para simular culturas agrícolas em condições brasileiras. Resultados menos precisos ocorreram para culturas pouco estudadas ou quando utilizou-se dados de entrada muito diversificados;
- Os parâmetros calibrados e validados do AquaCrop predominantemente foram utilizados ou indicados nas considerações dos autores para: otimizar o manejo da

irrigação; planejar cultivos mais adequados para cada região e época do ano; realizar previsão de safra e sistemas de alerta precoce; orientar novas pesquisas sobre calibração, validação e aplicação do modelo em diferentes contextos agrícolas.

## 6 CONSIDERAÇÃO FINAL

A revisão bibliográfica realizada permitiu constatar que o AquaCrop é um modelo simples e interessante para aprimorar a produtividade agrícola e promover a sustentabilidade ambiental. O aprimoramento do modelo proporcionará sistemas agrícolas mais resilientes e adaptáveis, capazes de enfrentar os desafios do século XXI.

## 7 REFERÊNCIAS

ALENCAR, L. P. **Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar**. 2014. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. Disponível em: <https://locus.ufv.br//handle/123456789/8211>

ALMEIDA, H. C. **Evapotranspiração, coeficiente de cultivo e calibração do modelo AquaCrop para a cultura do rabanete cultivado no semiárido nordestino**. 2020. 53 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/26176>

ALVES, E. S.; RODRIGUES, L. N.; CUNHA, F. F.; FARIAS, D. B. S. Evaluation of models to estimate the actual evapotranspiration of soybean crop subjected to different water deficit conditions. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, p. e20201801, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120201801>

ANJOS, F. A. **Cultivo do milho irrigado no semiárido alagoano e modelagem com o AquaCrop/FAO®**. 2016. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/12438>

ANJOS, F. A. **Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeio em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AquaCrop**. 2011. 72 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia; Produção vegetal; Proteção de plantas) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2011. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/riufal/235>

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 200, p. 28-37, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.004>

BOOTE, K. **Advances in crop modelling for a sustainable agriculture**. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing Limited, 2020.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CASTILLO, A. C.; LOUZADA, J. A. S.; CASTRO, N. M. R. Simulação do efeito da irrigação sobre o rendimento da soja na bacia do Rio potiribu, Rio Grande do Sul. **Irriga**, v. 23, n. 1, p. 44-54, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2018v23n1p44>

CAVALCANTE JUNIOR, C. A. **Desempenho do modelo AquaCrop/FAO® para cultivo do milho em Alagoas**. 2019. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3399>

CONCEIÇÃO, C. G. **Estimativa da produção da cultura do milho irrigado através de simulação com o modelo AquaCrop e determinação da lâmina ótima econômica**. 2021. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/23169>

CONCEIÇÃO, C. G.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; BEN, L. H. B.; FERREIRA, L. D.; PARIZI, A. R. C. Desempenho do modelo Aquacrop para híbridos de milho sob diferentes estratégias de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, p. 441-450, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n6p441-450>

COSTA, M. S. **Disponibilidade hídrica, uso de aditivo na adubação e calibração do software AquaCrop para o feijoeiro**. 2016. 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016. Disponível em: <https://locus.ufv.br//handle/123456789/8203>

COSTA, M. S.; MANTOVANI, E. C.; JESUS, F. L. F.; SANCHES, A. C.; SILVA, J. L. B.; SANTOS, J. E. O. Uso do Software AquaCrop para Simular a Resposta do Feijão à Diferentes Regimes de Irrigação. **Irriga**, v. 1, n. 3, p. 557-572, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v1n3p557-572>

DANTAS, S. M. **Calibração e validação do modelo AquaCrop para a cultura leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit) cultivada no semiárido do Nordeste Brasileiro**. 2020. 47 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2020. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/25063>

ESPADAFOR, M.; COUTO, L.; RESENDE, M.; HENDERSON, D. W.; GARCÍA-VILA, M.; FERERES, E. Simulation of the responses of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to irrigation. **Transactions of the ASABE**, v. 60, n. 6, p. 1983-1994, 2017. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=48675>

FAO - Food and Agriculture Organization. **Reference Manual – AquaCrop, Version 7.1**. Roma: FAO, 2023.

FARIAS, D. B. S.; RODRIGUES, L. N.; SOUZA, S. A. Avaliação do modelo AquaCrop para simulação da resposta da soja sob estresse hídrico. **Ciência Rural**, v. 54, p. e20230168, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20230168>

FERNANDES, W. S. **Parametrização do modelo AquaCrop e simulação da transpiração e produtividade do algodoeiro sob lâminas de irrigação e nitrogênio**. 2021. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis, 2021. Disponível em: <http://ri.ufmt.br/handle/1/3910>

FERREIRA, F. E. P.; SILVA, V. P. R. Calibração e validação do modelo AquaCrop para a cultura do feijão-caupi sob estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, p. 83-91, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n2p83-91>

FREITAS, J. C. **Calibração do modelo AquaCrop e necessidades hídricas da cultura do tomateiro cultivada em condições tropicais**. 2018. 119f. Tese (Doutorado em Meteorologia), Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2018. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2380>

GURSKI, C.; SOUZA, J. L. M.; XAVIER, A. C.; SANTOS, A. A. Deficiência hídrica e excedente hídrico prováveis para milho e soja no estado do Paraná, sul do Brasil. **Revista Irriga (Brazilian Journal of Irrigation & Drainage)**, v. 26, n. 2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n2p293-314>

MAGALHÃES, I. D.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; ROCHA, A. E. Q.; CAVALCANTE JÚNIOR, C. A.; LYRA, G. B.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; CARVALHO, A. L.; FERRAZ, R. L. S. Performance of the Aquacrop model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under irrigation condition. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 7, p. 1188-1196, 2019. Disponível em: [https://www.cropj.com/magalhaes\\_13\\_7\\_2019\\_1188\\_1196.pdf](https://www.cropj.com/magalhaes_13_7_2019_1188_1196.pdf)

MARTIM, A.; ASSUNÇÃO, H. F.; LIMA, T. M.; FILHO, G. C. Uso do modelo AquaCrop para estimar o efeito das chuvas sobre o desempenho produtivo do Amendoim no Sudoeste de Goiás. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, 16., 2009, Belo Horizonte. Disponível em: <http://www.sbagro.org/files/biblioteca/2485.pdf>

MARTINI, L. C. P. Análise de sensibilidade de parâmetros do AquaCrop para milho de sequeiro no Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 8, p. 934-

942, 2018. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/25893>

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; DIAS, C. G.. Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: impacts and adaptation. **Agricultural water management**, v. 216, p. 339-350, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.011>

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; GIAROLLA, A.; ALVALÁ, R. C. S.; ANDRADE, C. L. T. Calibração do modelo Aquacrop para estimativa de rendimento de milho no semiárido do Brasil. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, 19., 2015, Lavras. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1030153>

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; ALVALÁ, R. C. S.; GIAROLLA, A.; GAROFOLO, L. L.; JÚNIOR, J. L. S.; PAOLICCHI, L. T. L. C.; PINTO, G. L. N. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. **Agricultural Systems**, v. 160, p. 21-30, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.002>

MINUZZI, R. B.; FREDERICO, C. A.; SILVA, T. G. F. Estimation of soybean agronomic performance in climatic scenarios for Southern Brazil. **Revista Ceres**, v. 64, p. 567-573, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764060002>

MINUZZI, R. B.; LOPES, F. Z. Desempenho agrônômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 734-740, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p734-740>

NUNES, H. G. G. C.; FARIAS, V. D. S.; SOUSA, D. P.; COSTA, D. L. P.; PINTO, J. V. N.; MOURA, V. B.; TEIXEIRA, E. O.; LIMA, M. J. A.; ORTEGA-FARIAS, S.; SOUZA, P. J. O. P. Parameterization of the AquaCrop model for cowpea and assessing the impact of sowing dates normally used on yield. **Agricultural Water Management**, v. 252, p. 106880, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106880>

NUNES, H. G. G. C.; SOUSA, D. P.; MOURA, V. B.; FERREIRA, D. P.; PINTO, J. V. N.; VIEIRA, I. C. O.; FARIAS, V. D. S.; OLIVEIRA, E. C.; SOUZA, P. J. O. P. Performance of the AquaCrop model in the climate risk analysis and yield prediction of cowpea ('Vigna Unguiculatta' L. Walp). **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 7, p. 1105-1112, 2019. Disponível em: [https://www.cropj.com/nunes\\_13\\_7\\_2019\\_1105\\_1112.pdf](https://www.cropj.com/nunes_13_7_2019_1105_1112.pdf)

NUNES, L. R. T. **Calibração e teste do modelo AquaCrop para o amendoineiro sob lâminas de irrigação plena e deficitária**. 2022. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/238790>

OLIVEIRA, A. B. **Consumo hídrico e calibração/validação do modelo AquaCrop para a cultura do coentro submetido à irrigação localizada**. 2018. 50 f.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2018. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2391>

OLIVEIRA, V. M. R. **Parametrização e validação do modelo AquaCrop para gramíneas forrageiras sob diferentes disponibilidades hídricas**. 2019. 91 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019. Disponível em: <https://locus.ufv.br//handle/123456789/28361>

PATOLE, S. (Ed.). **Principles and practice of systematic reviews and meta-analysis**. Switserzland: Springer, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71921-0>

PIEKARSKI, K. R.; SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; TSUKAHARA, R. Y.; OLIVEIRA, C. T. Simulação da produtividade da soja em três tipos de solo com o modelo AQUACROP. In: **Convibra Online Conference Agronomy**. 2016. P. 189-198. Disponível em: <https://www.convibra.org/publicacao/12478/>

PINHEIRO, A. G. **Simulação de sistemas agrícolas com uso do modelo Aquacrop parametrizado para culturas forrageiras em ambiente semiárido**. 2022. 170 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2022. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/9069>

PINHEIRO, A. G.; SOUZA, L. S. B.; JARDIM, A. M. R. F.; ARÚJO JÚNIOR, G. N.; ALVES, C. P.; SOUZA, C. A. A.; SILVA, G. I. N.; SILVA, T. G. F. Importância dos modelos de simulação de culturas diante os impactos das alterações climáticas sobre a produção agrícola-Revisão. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 14, n. 6, p. 3648-3666, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.6.p3648-3666>

RIBEIRO, N. L. **Calibração, validação e análise de sensibilidade do modelo AquaCrop (FAO) para variedades de cana-de-açúcar**. 2020. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Ciências Agrícolas) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.11.2020.tde-05102020-105540>

ROSA, S. L. K.; SOUZA, J. L. M.; OLIVEIRA, C. T.; TSUKAHARA, R. Y. Calibration and validation of the AquaCrop model to estimate soybean production in the Campos Gerais, Parana State, Brazil. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 25, n. 4, 2023a. Disponível em: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/8245>

ROSA, S. L. K.; SOUZA, J. L. M.; SANTOS, A. A. **Desempenho do modelo AquaCrop para a cultura do trigo na mesorregião centro oriental do Paraná**. In: **Convibra Online Conference Agronomy**. 2020a. Disponível em: <https://www.convibra.org/publicacao/16965/>

ROSA, S. L. K.; SOUZA, J. L. M.; TSUKAHARA, R. Y. Performance of the AquaCrop model for the wheat crop in the subtropical zone in Southern Brazil. **Pesquisa**

**Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. e01238, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01238>

ROSA, S. L. K.; SOUZA, J. L. M.; TSUKAHARA, R. Y.; CRUZ, J. B. C.; JERSZURKI, D. Calibração do modelo AquaCrop para a cultura do trigo em Castro-PR. In: **Convibra Online Conference Agronomy**. 2019. Disponível em: <https://convibra.org/publicacao/16021/>

ROSA, S. L. K.; SOUZA, J. L. M.; TSUKAHARA, R. Y.; KOCHINSKI, E. G. Sensitivity analysis of the AquaCrop model for wheat crop in Campos Gerais region, Paraná. **Revista Ceres**, v. 70, p. 32-41, 2023b. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202370010004>

SALES, R. A.; XAVIER, A. C.; OLIVEIRA, E. C.; OLIVEIRA, F. L.; SILVA, D. M. N.; BERILLI, S. S. Calibration and validation of FAO-AquaCrop model to estimate the total biomass and yacon root yield. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 13, n. 3, p. 123-128, 2020. Disponível em: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/5012>

SANTOS, J. W. S. **Componentes de produção da soja estimados pelo aquacrop no estado de Alagoas**. 2022. 45f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2022. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/9905>

SILVA, A. C. S. L. **Consumo hídrico e calibração/validação do modelo AquaCrop para a cultura do feijão caupi cultivado no semiárido do nordeste do Brasil**. 2019. 60 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/11422>

SILVA, V. P. R.; SILVA, R. A.; MACIEL, G. F.; BRAGA, C. C.; SILVA JÚNIOR, J. L. C.; SOUZA, E. P.; ALMEIDA, R. S. R.; SILVA, M. T.; HOLANDA, R. M. Calibração e validação do modelo AquaCrop para a cultura de soja cultivada mediante diferentes níveis de irrigação na região de Matopiba, Brasil. **Ciência Rural**, v. 48, n. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20161118>

SILVA, V. P. R.; SILVA, R. A.; MACIEL, G. F.; SOUZA, E. P.; BRAGA, C. C.; HOLANDA, R. M. Soybean yield in the Matopiba region under climate changes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 8-14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n1p8-14>

SILVESTRE, G.; VIEIRA, G. H. S.; ROSADO, T. L.; POLONI, C. M. M.; PETERLE, G.; KRAUSE, M. R. Produção de milho estimada pelo software AquaCrop e obtida pela cultura sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista IRRIGA (Brazilian Journal of Irrigation & Drainage)**, v. 24, n. 3, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n3p552-568>

SILVESTRE, N. G.; VIEIRA, G. H. S.; NASCIMENTO, D. P. Estimativa da melhor época de plantio e produtividade de cana-de-açúcar com o modelo

agrometeorológico AquaCrop. **Revista Ifes Ciência**, v. 5, n. 1, p. 197-207, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.36524/ric.v5i1.279>

SOUZA, J. L. M.; OLIVEIRA, C. T.; ROSA, S. L. K.; TSUKAHARA, R. Y. Calibração e Validação do Modelo AquaCrop para Estimar a Produtividade de Milho nos Campos Gerais, Estado do Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 243-253, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-7786352001>

SOUZA, J. L. M.; OLIVEIRA, C. T.; ROSA, S. L. K.; TSUKAHARA, R. Y. Sensitivity analysis of AquaCrop model for maize crop in a humid subtropical climate in Brazil. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 24, n. 3, 2022. Disponível em: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/download/7541/3897/37519>

SOUZA, J. L. M.; ROSA, S. L. K.; PIEKARSKI, K. R.; TSUKAHARA, R. Y. Influence of the AquaCrop soil module on the estimation of soybean and maize crop yield in the State of Parana, Brazil. **Agronomía Colombiana**, v. 38, n. 2, p. 234-241, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v38n2.78659>

VIEIRA, I. C. O.; NUNES, H. G. G. C.; SOUZA, D. P.; COSTA, D. L. P.; PINTO, J. V. N.; FARIAS, V. D. S.; FERREIRA, B. G.; TEIXEIRA, E. O.; MARTINS, C. G. D.; SILVA, M. Y. F.; SOUZA, P. J. O. P. Uso do modelo aquacrop para o feijão-caupi cultivado sob diferentes lâminas de irrigação em Castanhal-PA. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 726-746, 2020.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v.63, p.1309-1313, 1982. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2)

ZIZINGA, A.; MWANJALOLO, J. G. M.; TIETJEN, B.; BEDADI, B.; SALES, R. A.; BEESIGAMUKAMA, D. Simulating Maize Productivity under Selected Climate Smart Agriculture Practices Using AquaCrop Model in a Sub-humid Environment. **Sustainability**, v. 14, n. 4, p. 2036, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14042036>