

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**CALIBRAÇÃO E TESTE DO MODELO AQUACROP PARA O AMENDONZEIRO
SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO PLENA E DEFICITÁRIA**

**Lucas Ramon Teixeira Nunes
Engenheiro Agrônomo**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**CALIBRAÇÃO E TESTE DO MODELO AQUACROP PARA O AMENDONZEIRO
SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO PLENA E DEFICITÁRIA**

**Discente: Lucas Ramon Teixeira Nunes
Orientador: Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim**

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

N972c Nunes, Lucas Ramon Teixeira
Calibração e teste do modelo AquaCrop para o amendoimzeiro sob
lâminas de irrigação plena e deficitária / Lucas Ramon Teixeira
Nunes. -- Jaboticabal, 2022
62 p. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Glauco de Souza Rolim

1. Modelagem de sistemas agrícolas. 2. Simulação do crescimento e
desenvolvimento de plantas. 3. Engenharia de irrigação. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CALIBRAÇÃO E TESTE DO MODELO AQUACORP PARA O AMENDONZEIRO SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO PLENA E DEFICITÁRIA

AUTOR: LUCAS RAMON TEIXEIRA NUNES

ORIENTADOR(A): *orientador não cadastrado*

Glauco de Souza Rolim

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas (DECEX) / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. THIERES GEORGE FREIRA DA SILVA (Participação Virtual)
Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE - Unidade Acadêmica de Serra Talhada - UAST / Serra Talhada/PE

Mailson Freire de Oliveira

Pós-doutorando MAILSON FREIRE DE OLIVEIRA (Participação Virtual)
Auburn University-College of Agriculture / Estados Unidos

Jaboticabal, 30 de junho de 2022



Documento assinado digitalmente
THIERES GEORGE FREIRE DA SILVA
Data: 12/07/2022 09:44:25-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Lucas Ramon Teixeira Nunes: Nascido no dia 30 de agosto de 1996, na cidade de Fortaleza, Ceará. Filho de Luzivani Teles Teixeira e tendo por pai José Flávio Teles Ferreira, migrou-se para o Estado do Pará, onde, no ano de 2014, ingressou os estudos no curso de graduação em Agronomia, pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), campus de Capanema, formando-se como Engenheiro Agrônomo no ano de 2019. Ao longo de sua graduação teve a oportunidade de ingressar no programa de monitoria, exercendo a atividade de monitor da disciplina de fisiologia vegetal por 4 semestres. Posteriormente, foi bolsista de iniciação científica, desenvolvendo pesquisa com mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) submetido a níveis de calagem, a qual resultou no seu trabalho de conclusão de curso. Ainda em sua graduação, estagiou na Secretaria de Meio Ambiente do Município de Capanema e desenvolveu atividades em grupos de pesquisas que englobavam temáticas como: forragicultura, irrigação, fertilidade de solos e nutrição de plantas nas condições Amazônicas do Nordeste do Estado do Pará. Incentivado pelas boas experiências acadêmicas adquiridas na graduação, ingressou, no ano de 2019, como aluno bolsista (CNPQ) do curso de Mestrado no programa Agronomia (Ciência do Solo), pela Universidade Estadual de São Paulo “Júlio de Mesquita Filho”, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/Unesp). Durante o mestrado, participou no desenvolvimento de pesquisas com o amendoim (*Arachis hypogaea* L.) cultivado em segunda safra, submetido a níveis de irrigação; avaliando a aplicação do sensoriamento remoto e proximal, com a utilização de VANT (veículo aéreo não tripulado) e índices de vegetação para o monitoramento da irrigação. Na elaboração de seu trabalho de dissertação, desenvolveu pesquisa com o modelo AquaCrop, desenvolvido pela FAO, visando a calibração do modelo para as condições do sistema produtivo nacional de amendoim, em pesquisa pioneira a nível nacional. Atuou na coordenação do evento e revisão de trabalhos submetido à: II Feira Nacional do Amendoim, XVII Encontro Sobre a Cultura do Amendoim e XLIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola (CONBEA).

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”.

José de Alencar

Dedico

Aos meus pais e avós, aos amigos e familiares, e a todos que, postos por Deus em minha vida, contribuíram para que eu progredisse na caminhada.

À Daniela Varela, pelo seu grande amor, sabedoria, paciência e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o autor da vida, por dotar-me de fôlego, fé, persistência, capacidades e, principalmente, por conceder-me a oportunidade de ter ao lado pessoas incríveis, as quais me possibilitaram alçar conquistas e aprendizados valiosos.

Aos meus pais, Luzivani Teles e Flávio Teles, por não medirem esforços em proporcionar-me a maior e mais valiosa riqueza que podiam me oferecer: a educação. Obrigado por me ensinarem a acreditar em mim e a ser forte, sem, contudo, perder a humildade, essência, perseverança e forma alegre de encarar a vida.

Aos meus avós, Francisca Teles e Canuto Franco, pela sabedoria e amor repassados, e por proverem os recursos essenciais à minha formação profissional e pessoal.

À Daniela Varela, por todo amor, companheirismo e bons conselhos, mantendo meu coração aquecido em dias frios.

Agradecimento especial a Anderson Prattes, pela amizade e pelas orientações tão importantes a construção dos trabalhos desenvolvidos ao longo do curso.

Aos amigos Ancelmo Cazuza, Emanuel Ceita, Edmilson N'dami, Laércio Santos e Wenderson Nonato, pela grande amizade, aconselhamentos e bons momentos ao longo da trajetória do meu curso de mestrado.

A Marcelo Rodrigues e Danilo Tedesco, por todo o apoio, motivação e conhecimentos compartilhados na elaboração de minhas pesquisas.

Ao professor Dr. Glauco de Souza Rolim por me acolher como seu orientado e por todo apoio e ensinamentos repassados em suas disciplinas.

Ao Antônio Michael, por ceder sua área de pesquisa para a coleta dos meus dados e por todo o acompanhamento técnico-científico.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” (FCAV/Unesp) e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pela oportunidade da realização do mestrado.

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

A todos os demais familiares, amigos, colegas e professores que direta ou indiretamente foram essenciais à elaboração deste trabalho. Meu muito obrigado!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. A cultura do amendoim.....	3
2.1.1. Origem, caracterização botânica, morfologia e fenologia.....	3
2.1.2. Levantamento da produção mundial e nacional de amendoim	6
2.2. Necessidade hídrica da cultura	11
2.3. O modelo AquaCrop.....	13
2.4. Emprego do modelo AquaCrop na cultura do amendoim	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1. Banco de dados e descrição da área experimental	19
3.2. Estabelecimento da cultura	21
3.3. Tratamentos e delineamento experimental	21
3.4. Manejo da irrigação	22
3.5. Dados climáticos	24
3.6. Dados do solo.....	25
3.7. Dados da cultura	26
3.8. Calibração, teste e avaliação do modelo	27
4. RESULTADOS	31
4.1. Calibração do modelo AquaCrop.....	31
4.1.1. Ajuste dos coeficientes.....	31
4.1.2. Irrigação plena.....	37
4.1.3. Irrigação deficitária	40
4.2. Teste do modelo AquaCrop.....	43
5. DISCUSSÃO	46
6. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS.....	54
CONSIDERAÇÕES FINAIS	62

CALIBRAÇÃO E TESTE DO MODELO AQUACROP PARA O AMENDINZEIRO SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO PLENA E DEFICITÁRIA

RESUMO – Modelos de simulação são ferramentas poderosas para avaliar o efeito de manejos de irrigação sobre o desenvolvimento das culturas, permitindo a definição de estratégias eficientes do uso da água na agricultura. Este estudo objetivou calibrar e testar o modelo AquaCrop para simular a fenologia, fração de cobertura do dossel (CC), biomassa da parte aérea ao longo do ciclo (B), biomassa final (BF), produtividade de vagens (PV), índice de colheita (IC) e armazenamento de água no solo (Aa) do amendoimzeiro sob irrigação plena (L1) e dois níveis de irrigações deficitárias (L3 e L5). O banco de dados empregados para a calibração e teste do modelo provém de experimentos conduzidos em quatro ciclos de cultivo de amendoimzeiro (*Arachis hypogaea* L.), realizados na época da segunda safra da cultura para a região, nos anos de 2018, 2019 e 2020, no município de Jaboticabal. No ano de 2018, foram realizados dois ciclos, semeados nos meses de fevereiro (2018 Fev) e março (2018 Mar). Foram empregadas as cultivares de amendoimzeiro IAC 505 (ciclos de 2018) e IAC 503 (ciclos 2019 e 2020). Os dados do tratamento L1 (todos os ciclos) e os dados das lâminas deficitárias do ciclo 2019 foram utilizados para a calibração do modelo, com os demais dados empregados para o teste do modelo. De forma geral, o modelo AquaCrop possibilitou simulações precisas da fenologia, como o tempo para a maturidade fisiológica, bem como para os componentes CC, B e B final, entretanto, o modelo apresentou menor desempenho em simular o tempo para floração, PV e IC mediante condições de alta deficiência hídrica e baixas temperaturas (ocorridas no ciclo 2020). A alta incidência de mancha-preta (*Cercosporidium personatum*) no ciclo 2018 Fev resultou em menor precisão nas simulações da fração de cobertura do dossel, uma vez que o AquaCrop não foi projetado para simular o efeito do ataque de pragas e doenças. O modelo apresentou menor acurácia nas simulações de Aa. O modelo AquaCrop apresentou bom potencial em simular o desenvolvimento e produtividade do amendoimzeiro, especialmente para condições de suprimento hídrico adequado. Novas pesquisas deverão ser realizadas a fim de avaliar o modelo para diferentes cultivares/variedades de amendoimzeiro, bem como para outras épocas, regiões e condições de manejo representativas do sistema de produção nacional da cultura do amendoim.

Palavras-chave: aplicativo canopeo, IAC 505, IAC 503, manejo de irrigação, modelagem de cultivos agrícolas.

CALIBRATION AND TEST OF THE AQUACROP MODEL FOR PEANUT CROP (*Arachis hypogaea* L.) UNDER FULL AND DEFICIT IRRIGATION

ABSTRACT – Crop system modeling is a powerful tool for evaluating the effect of irrigation management on crop development, enabling defining of efficient strategies for water use in agriculture. This study aims to evaluate and test the capacity of the AquaCrop in simulating the phenology, canopy cover fraction (CC), above-ground biomass throughout the plant cycle (B), final biomass (BF), pod productivity (PV), harvest index (IC) and soil water storage (Aa) of the peanut plants under fully irrigated (L1) and two levels of deficit irrigation management (L3 and L5). The database applied for the calibration and model test was provided by previous experiments conducted on four peanuts (*Arachis hypogaea* L.) growth cycles, carried out at the time of the second crop of the crop for the region, in the years 2018, 2019, and 2020, in the Jaboticabal city. In 2018, two cycles were carried out, sown in the months of February (2018 Feb) and March (2018 Mar). Peanut cultivars IAC 505 (2018 cycles) and IAC 503 (2019 and 2020 cycles) were used. The data from the L1 treatment (all cycles) and the data from the deficit slides from the 2019 cycle were used for model calibration, with the other data used for model testing. In general, the AquaCrop model allowed accurate simulations of phenology, such as time to physiological maturity, as well as for components CC, B, and BF, however, the model presented a lower performance in simulating time to flowering, PV, and IC under conditions of high-water deficit and low temperatures (that occurred on the 2020 cycle). The high incidence of black spots (*Cercosporidium personatum*) in the 2018 Feb cycle resulted in less accuracy in the canopy cover fraction simulations since AquaCrop was not designed to simulate the effect of pest and disease attacks. The model showed lower accuracy in the Aa simulations. The AquaCrop model showed good potential in simulating the development and productivity of peanuts, especially under conditions of adequate water supply. Further research should be carried out in order to evaluate the model for different peanut cultivars/varieties, as well as for other periods, regions, and management conditions that are representative of the national peanut production system.

Keyword: canopeo app., IAC 505, IAC 503, irrigation management, crop system modelling.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Características morfológicas da planta de amendoim. Adaptado de Wikihmong (2022).4
- Figura 2.** Área total mundial cultivada com amendoim: 2015 a 2020. Fonte: FAOSTAT (2022).7
- Figura 3.** Participação dos 14 maiores países produtores de amendoim em relação à produção mundial da cultura em 2020 (A), e volume produzido por cada um destes países no mesmo ano (B) (1 megagrama equivale a 1 tonelada). Fonte: FAOSTAT (2022).8
- Figura 4.** Área cultivada de amendoim no Brasil de 2016 a 2021. Fonte: IBGE (2022).9
- Figura 5.** Produção nacional de amendoim de 2016 a 2021 (A), e produtividade média das lavouras de amendoim nos principais estados produtores do Brasil (B), safra 2021. Fonte: IBGE (2022).10
- Figura 6.** Procedimentos realizados pelo modelo AquaCrop nas 4 etapas e processos (setas pontilhadas) afetados pelo estresse hídrico (a - e) e estresse por temperatura (f - g). Zr é a profundidade de enraizamento. O estresse hídrico: (a) retarda a expansão do dossel, (b) acelera a senescência do dossel, (c) diminui o aprofundamento da raiz, mas apenas se severo, (d) reduz a abertura estomática e a transpiração e (e) afeta o índice de colheita. O estresse de baixa temperatura (f) reduz a transpiração da cultura. O estresse por temperatura quente ou fria (g) inibe a polinização e reduz o HI. Adaptado de Raes (2017).15
- Figura 7.** Evolução da cobertura do dossel durante o ciclo de cultivo. CCo - cobertura inicial do dossel no momento da emergência da cultura, CGC - taxa de crescimento, CCx - cobertura máxima e CDC - coeficiente de declínio do dossel. Adaptado de Steduto et al. (2009).16
- Figura 8.** Relação entre nível de estresse estabelecido pelo usuário (estresse relativo) e coeficiente de stress (Ks) gerado no modelo AquaCrop. As relações podem ser lineares ou convexas. Fonte: Adaptado de Steduto et al. (2012).17
- Figura 9.** Localização geográfica da área de estudo destacando o município de Jaboticabal, SP.20
- Figura 10.** Representação da distribuição dos tratamentos na área experimental. ...22
- Figura 11.** Modelo de aspersor empregado (A) (Fonte: Senninger, 2022) e distribuição da precipitação em função da distância da linha de aspersores (B).23

- Figura 12.** Condições meteorológicas na área experimental ao longo dos 4 ciclos de cultivo do amendoim. Jaboticabal, SP. As legendas alfanuméricas (R1, R2, etc.) representam os estádios fenológicos do amendoimzeiro de acordo com a escala de Boote (1982).....25
- Figura 13.** Representação da sonda HydroSense II modelo HS2P empregada para as leituras de umidade de solo dos experimentos conduzidos em 2019 e 2020. Adaptado de Campbell Scientific (2022).....26
- Figura 14.** Representação do emprego do aplicativo Canopeo™ nas leituras da fração de cobertura do dossel realizadas ao longo dos experimentos.....27
- Figura 15.** Resumo das etapas de calibração e teste do modelo AquaCrop para o amendoimzeiro empregadas na pesquisa.....29
- Figura 16.** Desvio médio obtido para valores de temperatura base (Tb) e graus-dia (GD) acumulado ao fim do ciclo do amendoimzeiro para os respectivos valores de Tb. Cultivares IAC 505 e IAC 503. Jaboticabal, SP.....32
- Figura 17.** Cobertura do dossel (CC) ao longo do ciclo observada e simulada pelo modelo AquaCrop para o amendoimzeiro sob irrigação plena (L1) durante a fase de calibração. Cultivar IAC 503. Jaboticabal, SP.38
- Figura 18.** Biomassa da parte aérea ao longo do ciclo (B) observada e simulada pelo modelo AquaCrop para o amendoimzeiro sob irrigação plena (L1) durante a fase de calibração. Cultivar IAC 503. Jaboticabal, SP.39
- Figura 19.** Armazenamento de água no solo (Aa) na camada 0-20 cm de profundidade observado e simulado pelo AquaCrop. Fase de calibração, lâmina plena (L1). Jaboticabal, SP.40
- Figura 20.** Cobertura do dossel (CC) e biomassa da parte aérea ao longo do ciclo (B) observada e simulada pelo modelo AquaCrop para o amendoimzeiro sob lâminas de irrigação deficitárias (L3 e L5) durante a fase de calibração, ciclo 2019 (cultivar IAC 503). Jaboticabal, SP.41
- Figura 21.** Armazenamento de água no solo (Aa) na camada 0-20 cm de profundidade observado e simulado pelo AquaCrop. Fase de calibração, lâminas de irrigação deficitárias (L3 e L5). Jaboticabal, SP.42
- Figura 22.** Cobertura do dossel (CC) observada e simulada pelo modelo AquaCrop para o amendoimzeiro sob lâminas de irrigação deficitárias (L3 e L5) durante a fase de teste, cultivares IAC 503 e IAC 505. Jaboticabal, SP.....44
- Figura 23.** Biomassa da parte aérea ao longo do ciclo (B) observada e simulada pelo modelo AquaCrop para o amendoimzeiro sob lâminas de irrigação deficitárias (L3 e L5) durante a fase de teste, cultivares IAC 503 e IAC 505. Jaboticabal, SP.....44
- Figura 24.** Armazenamento de água no solo (Aa) na camada 0-20 cm de profundidade observado e simulado pelo AquaCrop. Fase de teste (L1). Jaboticabal, SP.....46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estádios de desenvolvimento do amendoinceiro (<i>Arachis hypogaea</i> L.). Adaptado de Boote (1982).	5
Tabela 2. Atributos químicos do solo da área experimental (0-20 cm) antes e depois da adubação de semeadura. Jaboticabal, SP.	21
Tabela 3. Precipitação (P), irrigação (I) e lâmina total (L), em mm, por tratamento aplicadas durante os ciclos de cultivo de amendoim.	24
Tabela 4. Características físico-hídricas do solo da área experimental.	26
Tabela 5. Classificação quanto aos valores dos índices estatísticos utilizados na análise de desempenho do modelo AquaCrop (Raes et al., 2018).	31
Tabela 6. Coeficientes biométricos e fenológicos empregados na calibração das cultivares de amendoim IAC 503 e IAC 505 para o modelo AquaCrop. Jaboticabal, SP.	33
Tabela 7. Variação (Var (%)) entre a fenologia observada (Obs) e simulada (Sim) pelo modelo AquaCrop para a cultura do amendoim, cultivares IAC 503 e IAC 505, sob irrigação plena (L1). Jaboticabal, SP.	37
Tabela 8. Variação (Var (%)) entre a produtividade de vagens (PV), biomassa final (BF) e índice de colheita (IC) observado (Obs) e simulado (Sim) pelo modelo AquaCrop para o amendoinceiro, cultivares IAC 505 e IAC 503. Fase de calibração, sob lâmina de irrigação plena (L1). Jaboticabal. SP.	39
Tabela 9. Variação (Var (%)) entre a produtividade de vagens (PV), biomassa final (BF) e índice de colheita (IC) observado (Obs) e simulado (Sim) pelo modelo AquaCrop para o amendoinceiro. Fase de calibração, lâminas de irrigação deficitárias (L3 e L5), ciclo 2019 (IAC 503). Jaboticabal. SP.	42
Tabela 10. Variação (Var (%)) entre a produtividade de vagens (PV), biomassa final (BF) e índice de colheita (IC) observado (Obs) e simulado (Sim) pelo modelo AquaCrop para o amendoinceiro, cultivares IAC 505 e IAC 503. Fase de calibração, lâminas de irrigação deficitárias (L3 e L5). Jaboticabal. SP.	45
Tabela 11. Coeficientes de valor ou classificação semelhantes aos empregados por Chibarabada et al. (2020) na calibração e teste do modelo AquaCrop para a cultura do amendoim.	47

1. INTRODUÇÃO

A agricultura se configura como uma atividade de alto risco e está inserida em um cenário global desafiador de aumento populacional, crises político-econômicas e incertezas ocasionadas pelas mudanças climáticas. Neste contexto, volumes cada vez maiores de produção de alimentos, fibras e energia deverão ser alcançados a partir de um uso eficiente e sustentável das terras cultivadas e dos insumos a elas aplicados.

Para atingir tais demandas, estratégias eficientes de uso da água e insumos agrícolas deverão ser elaboradas. Neste contexto, a modelagem de sistemas agrícolas, ao simular o desenvolvimento de uma cultura sob os mais variados cenários de clima, solo e cultivo, possibilita a obtenção de estratégias de manejo mais ajustadas aos diferentes cenários de cultivo, garantindo maior produtividade e eficiência na alocação de insumos às lavouras.

A modelagem de culturas envolve a abordagem matemática dos processos fisiológicos que ocorrem na planta e que são afetados pelo tipo de manejo adotado, gerando modelos que, ao serem calibrados e validados, possibilitam a obtenção rápida de informações confiáveis sem a necessidade de testes de campo onerosos e, por vezes, de elevado custo (Mabhaudhi et al., 2014; Masasi et al., 2019). Entretanto, o desenvolvimento da planta apresenta uma dinâmica complexa, com vários processos interagindo entre si (Adeboye et al., 2017). Dessa forma, alguns softwares de modelos foram desenvolvidos exigindo dados de entrada específicos e complexos (García-Vila e Fereres, 2012), destacando-se o Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) (Jones et al., 2003).

O DSSAT é um sistema que reúne diversos modelos e possibilita a realização de simulações acuradas de diversos componentes do sistema solo-planta-atmosfera nas principais culturas agrícolas, sendo empregado em diversos trabalhos de zoneamento agrícola, avaliação de estratégias de manejo e cenário de mudanças climáticas (Jones et al., 2003; Brilli et al., 2017). Entretanto, o DSSAT exige uma quantidade considerável de dados específicos da cultura para realizar as simulações, o que pode dificultar sua utilização por usuários não especializados.

A fim de se atingir um equilíbrio ideal entre precisão, simplicidade e robustez, a Food and Agricultural Organization (FAO), uma organização das Nações Unidas, desenvolveu o modelo AquaCrop (Steduto et al., 2009; Hsiao et al., 2009; Steduto et al., 2012), que possibilita simular o rendimento das culturas em resposta à água, voltado especialmente a condições em que este recurso é um fator limitante e decisivo à condução da lavoura (Karunaratne et al., 2011). Ao levar em consideração dados de clima, planta, solo e manejo, o modelo AquaCrop permite simular a resposta produtiva de uma cultura sob diversas condições ambientais, incluindo manejos e cenários de mudanças climáticas (Steduto et al., 2012).

O AquaCrop exige uma quantidade relativamente pequena de dados, apresentando parâmetros de fácil compreensão e comandos de calibração intuitivos (Vanuytrecht et al., 2014). Trata-se de um modelo voltado não somente a cientistas, mas a usuários finais como consultores, agricultores e elaboradores de políticas públicas (Steduto et al., 2009).

O modelo AquaCrop demonstrou bom desempenho em simular a cobertura do dossel, biomassa, conteúdo de água no solo e produtividade de culturas como a soja (Adeboye et al., 2017; Silva et al., 2018), milho (Greaves; Wang, 2016), algodão (Li et al., 2019), sorgo (Masasi et al., 2019), trigo (Kale Celik et al., 2018), uva (Er-Raki et al., 2021), amendoim (Chibarabada et al., 2020) e espécies de feijão bambara (Mabhaudhi et al., 2014; Karunaratne et al., 2011), nas mais variadas condições de clima, solo e manejo hídrico. Entretanto, alguns autores detectaram baixo desempenho do modelo em realizar simulações para culturas submetidas a níveis moderados a severos de déficit hídrico (Hsiao et al. 2009; Ahmadi et al. 2015; Masasi et al., 2019; Adeboye et al., 2017; Greaves e Wang, 2016).

Sendo uma das mais importantes culturas produtoras de grãos em regiões áridas e semi-áridas (Chibarabada et al., 2017), a planta de amendoim (*Arachis hypogaea* L.) é a quarta oleaginosa mais cultivada no mundo devido ao seu alto teor de óleo, proteína, fibra e vitaminas (Cruz et al., 2021). De acordo com Cruz et al. (2021), desde que os níveis de temperatura e radiação sejam adequados ao amendoimzeiro, a irrigação é capaz de garantir alta produtividade de amendoim em qualquer época do ano (Cruz et al., 2021).

Para que o uso eficiente da irrigação nos cultivos de amendoim seja alcançado, é necessário o desenvolvimento de estratégias ajustadas à realidade das diferentes lavouras. Dessa forma, ao possibilitar simulações precisas do rendimento da cultura diante dos diferentes cenários de irrigação, o modelo AquaCrop poderá ser empregado para a elaboração de tais estratégias. No entanto, apesar dos estudos pioneiros realizados por Khov et al. (2017) e Chibarabada et al. (2020), dados sobre a calibração e avaliação do modelo AquaCrop para o amendoim, especialmente para cultivares de alto valor agrônômico, permanecem insuficientes.

Diante do exposto, este estudo objetivou: (i) calibrar os coeficientes fenológicos, morfológicos e fisiológicos de cultivares de amendoimzeiro representativas do sistema de produção brasileiro no modelo AquaCrop, e (ii) utilizar os coeficientes calibrados para testar o desempenho do modelo em simular a fração de cobertura do dossel, biomassa, produtividade, índice de colheita e armazenamento de água no solo para amendoimzeiro sob irrigação plena e deficitária na região nordeste do estado de São Paulo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cultura do amendoim

2.1.1. Origem, caracterização botânica, morfologia e fenologia

Nativo da América do Sul, o amendoimzeiro (*Arachis hypogaea* L.) se destaca pela sua importância econômica e social. Trata-se de uma leguminosa pertencente à família Fabaceae, sendo uma planta herbácea, de hábito de crescimento ereto a rasteiro e ciclo anual indeterminado (Gregory, 1980). O gênero *Arachis* L. é constituído por 81 espécies originárias do continente Sul-Americano, especialmente nos territórios onde hoje se situam o Brasil, Bolívia, Paraguai, Argentina e Uruguai (Krapovickas e Gregory, 2007; Valls e Simpson, 2005).

Dentre as espécies do gênero *Arachis* L., a espécie *A. hypogaea* L. (amendoim comercial) apresenta o maior destaque pela sua importância econômica. Trata-se de uma cultura de utilização versátil, servindo como matéria prima para a produção de

alimentos e biocombustível. A espécie *A. hypogaea* L. abrange as subespécies *hypogaea* e *fastigiata*. A subespécie *hypogaea* compreende as variedades botânicas *hypogaea* e *hirsuta*, enquanto que a subespécie *fastigiata* compreende as variedades *fastigiata*, *peruviana*, *aequatoriana* e *vulgaris* (Krapovickas e Gregory, 2007).

A planta de amendoim apresenta flores de cor amarela, emitidas a partir das axilas foliares, agrupadas em inflorescências constituídas de duas, três ou mais flores, que se abrem uma por vez ao longo do ramo principal ou de ramos secundários a depender da variedade e/ou grupo (Conagin, 1955; Santos et al., 2009). A flores do amendoimzeiro tem constituição própria para a autopolinização, que ocorre no mesmo dia em que a flor se abre, com o período de florescimento se iniciando entre quatro a seis semanas após a semeadura (Conagin, 1995).

Após a fertilização, o ovário se transforma em uma estrutura alongada e pontuda denominada de “ginóforo” ou “peg”, que é dotada de geotropismo positivo, penetrando o solo e se estabelecendo a uma profundidade de 5 a 10 cm, onde o desenvolvimento dos frutos é completado, num processo denominado de geocarpia (Conagin, 1995; Godoy et al., 2005). As sementes, que se constituem como as estruturas de maior interesse econômico são revestidas por tegumento que pode apresentar cor variada, especialmente bege ou vermelho para as plantas comercialmente mais empregadas (Santos et al., 2009). Na Figura 1 ilustra-se a planta de amendoim e os órgãos previamente descritos.

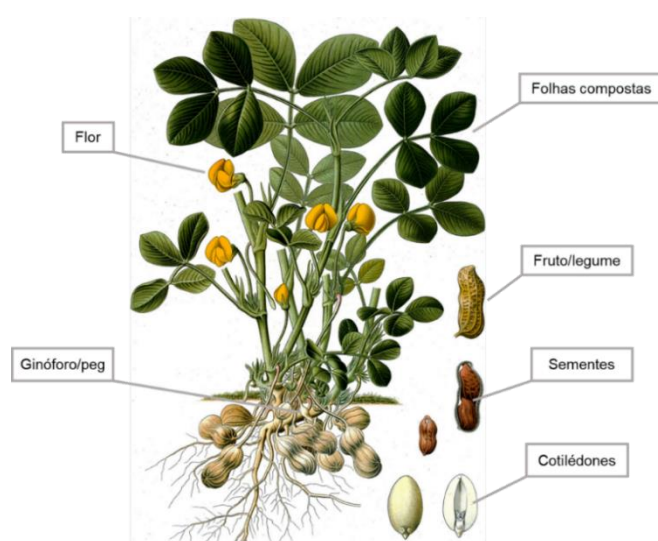


Figura 1. Características morfológicas da planta de amendoim. Adaptado de Wikihmong (2022).

Na classificação agronômica separam-se as cultivares comerciais de amendoazeiro de acordo com as suas características morfológicas e reprodutivas em três grupos: Valência, Virgínia e Spanish (Sholar et al., 1995). A diferenciação entre os grupos se dá, entre outras características, pelo hábito de crescimento (ereto, semiereto ou rasteiro), duração do ciclo, tipo de ramificação, tamanho das sementes e número de vagens por semente (Nakagawa e Rosolem, 2011).

As plantas dos grupos Valência e Spanish são descendentes da subespécie *fastigiata* e apresentam hábito de crescimento ereto ou semiereto, com ramificação esparsa de poucos ramos secundários, ciclo curto e flores na haste principal. De forma geral, as vagens do grupo Spanish comportam duas sementes de tamanho pequeno a médio, enquanto que as vagens do grupo Valência chegam a apresentar até quatro sementes. As cultivares do grupo Virgínia por sua vez apresentam características herdadas da variedade botânica *hypogaea*, subespécie *hypogaea*, o que lhes conferem hábito de crescimento rasteiro (prostrado), semiereto ou arbustivo, com ramificação profusa (desenvolvimento de ramos primários, secundários e terciários), ciclo longo, ausência de flores na haste principal e vagens com duas sementes (Santos, 2010; Carrega, 2017).

No Brasil, as cultivares predominantemente empregadas nos cultivos são as dos grupos Valência e Virgínia, principalmente pelo potencial produtivo e arquitetura das plantas, que possibilitam o emprego da colheita mecanizada (Godoy et al., 2005).

Semelhante à descrição dos estádios de desenvolvimento de culturas como a soja (*Glycine max* L. Merr.), algodão (*Gossypium hirsutum* L.), milho (*Zea mays* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.), Boote (1982) classificou os estádios de desenvolvimento do amendoazeiro e os agrupou conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Estágios de desenvolvimento do amendoazeiro (*Arachis hypogaea* L.). Adaptado de Boote (1982).

Estádio	Descrição abreviada	Descrição
Estágios vegetativos		
VE	Emergência	Cotilédones perto da superfície do solo, com partes da plântula visíveis.
V0		Cotilédones achatam e abrem na ou sob a superfície do solo.

V-1 a V-N	1 a enésima folha composta	Um a N nós desenvolvidos na haste principal (um nó é contado quando sua folha tetrafoliada está aberta ou desdobrada e seus folíolos estão planos).
Estágios reprodutivos		
R1	Início da floração	Uma flor aberta em qualquer nó da planta.
R2	Início da formação de “peg”/”ginóforos”	Um “peg”/”ginóforo” alongado (ginóforo).
R3	Início da formação de vagens	Um “peg”/”ginóforo” na terra com o ovário virado e inchado, com pelo menos duas vezes a largura do “peg”/”ginóforo”.
R4	Vagens cheias	Uma vagem totalmente expandida nas dimensões características da cultivar.
R5	Início da formação das sementes	Uma vagem expandida, na qual o crescimento do cotilédone da semente é visível quando cortada em seção atravessada com uma lâmina (passada a fase de endosperma líquido).
R6	Semente cheias	Uma vagem com cavidade aparentemente preenchida pelas sementes quando fresca.
R7	Início da maturação	Uma vagem mostrando a coloração natural visível ou com manchas no pericarpo ou testa.
R8	Maturação para colheita	2/3 a 3/4 de todas as vagens desenvolvidas mostrando coloração do pericarpo ou testa (a fração depende da cultivar, sendo mais baixa para os tipos Virgínia).
R9	Vagens acima do ponto de maturação	Uma vagem não danificada mostrando a coloração laranja-bronzeado da testa ou com deterioração natural do “peg”/”ginóforo”.

2.1.2. Levantamento da produção mundial e nacional de amendoim

A importância econômica do amendoim é refletida nos índices de produção da cultura ao redor do mundo. Os dados disponibilizados pela FAOSTAT (2022) indicam que o cultivo mundial de amendoim está em expansão, conforme pode ser observado entre os anos de 2015 a 2020, a área mundial cultivada passou de 26,51 milhões de hectares em 2015 para cerca de 31,57 milhões de hectares cultivados em 2020, um aumento de 19%, apesar da estagnação ocasionada em 2019 em relação ao ano anterior (Figura 2).

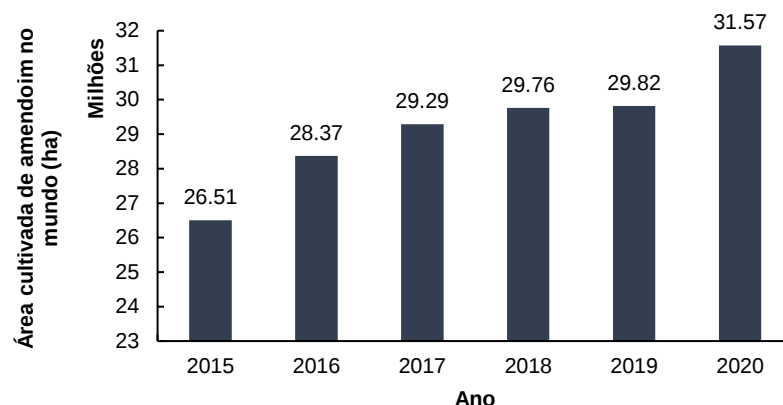


Figura 2. Área total mundial cultivada com amendoim: 2015 a 2020. Fonte: FAOSTAT (2022).

Dentre as maiores regiões produtoras, a Ásia e a África se consolidam nas primeiras posições do ranking (Figura 3), com a China se destacando como o maior país produtor de amendoim do mundo, respondendo, em 2020, por 33,5% da produção mundial, originando impressionantes 17,9 milhões de toneladas (Figura 3), que superam a somatória da produção de Índia, Nigéria e EUA juntos, que são, respectivamente, o segundo, o terceiro e o quarto maiores produtores globais, muito embora o Sudão tenha produzido volume equivalente à produção estadunidense.

No ranking global de produção de amendoim do ano de 2020, o Brasil classificou-se como o 13º maior produtor (FAOSTAT, 2022). Apesar de sua posição no ranking, o Brasil possui grande potencial para a expansão da produção de amendoim, pois apresenta ampla oferta de terras, clima adequado, cultivares adaptadas e tecnologias eficientes de manejo, com as taxas anuais de expansão dos cultivos de amendoim sendo influenciadas por incentivos econômicos e fiscais, além do potencial de mercado para a cultura. No entanto, apesar da baixa representatividade frente ao cenário global, estima-se, segundo Carrega (2019), que na safra 2018 a cultura tenha gerado receita de R\$ 1 bilhão para o Brasil, levando em conta toda a cadeia de produção desde o campo à industrialização.

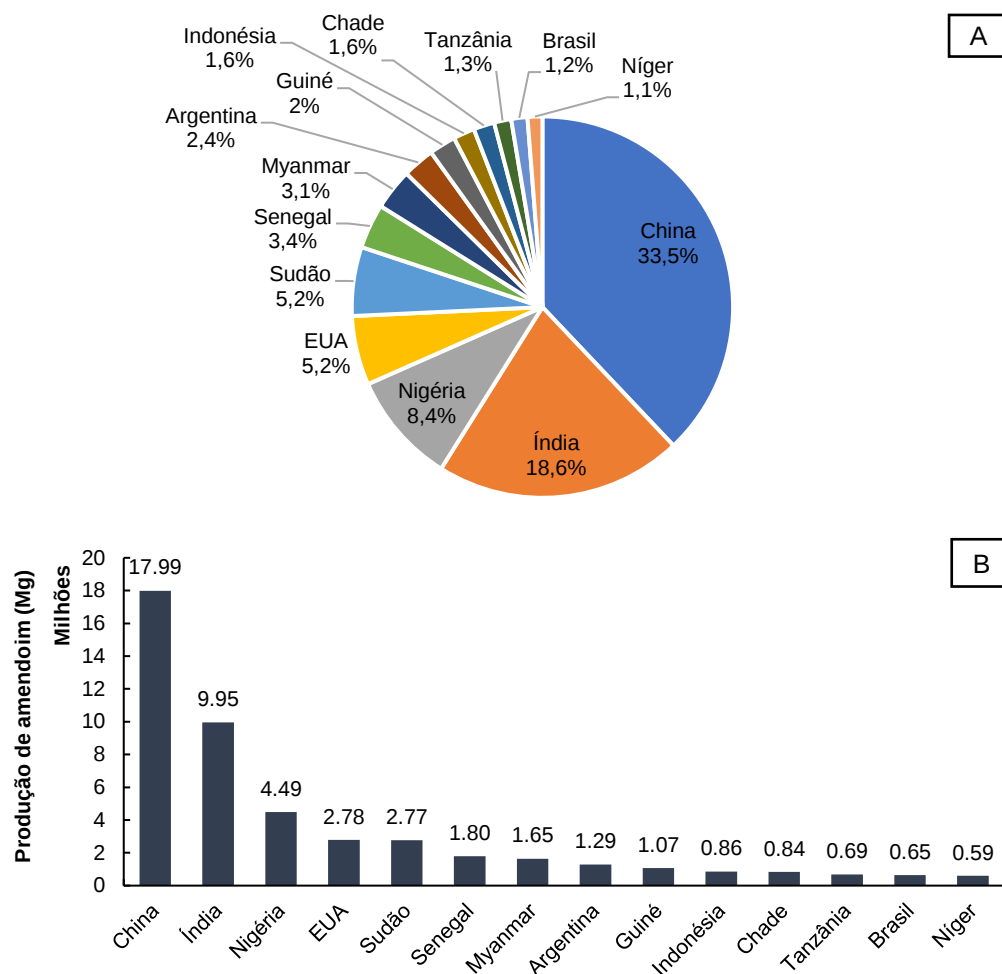


Figura 3. Participação dos 14 maiores países produtores de amendoim em relação à produção mundial da cultura em 2020 (A), e volume produzido por cada um destes países no mesmo ano (B). Fonte: FAOSTAT (2022).

Seguindo a tendência global de aumento da produção do amendoim, o Brasil vem apresentando expansão de seus cultivos (Figura 4). Na safra 2021, a área nacional cultivada com o amendoim foi de pouco mais de 181 mil hectares (IBGE, 2022), o que representou incremento de 35,23% em relação a 2016.

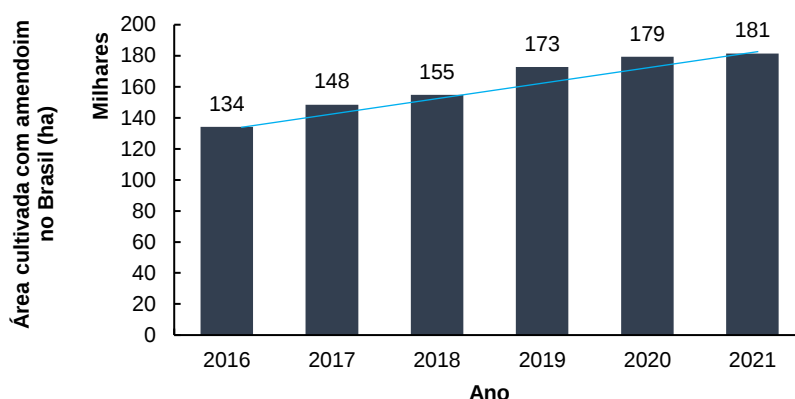


Figura 4. Área cultivada de amendoim no Brasil de 2016 a 2021. Fonte: IBGE (2022).

Concomitantemente à expansão da área cultivada, houve aumento da produção brasileira de amendoim no período 2016 a 2021, com a safra recorde tendo sido alcançada no ano de 2020, quando o país registrou produção de mais de 691 mil toneladas, um aumento de 56% em relação a 2016 (Figura 5). Na safra 2021 a produtividade brasileira das lavouras de amendoim foi de 3.670 kg ha⁻¹ (Figura 5), com o estado de Mato Grosso apresentando a maior produtividade nacional. Tais dados evidenciam que o país está avançando de forma pujante na produção de amendoim, o que é resultado do desenvolvimento de tecnologias de manejo e cultivares mais eficientes e adaptadas.

De acordo com Sampaio (2020), o mercado para a cultura está aquecido pela alta demanda nacional e internacional, o que resulta em cotações mais atrativas aos produtores brasileiros. Ainda de acordo com a autora, as exportações nacionais de amendoim se dão na forma de grão descascado e óleo, com a primeira forma representando mais de 80% das exportações, tendo como principais destinos a Rússia, Holanda e Argélia, enquanto que a produção de óleo é exportada principalmente para a China e Itália.

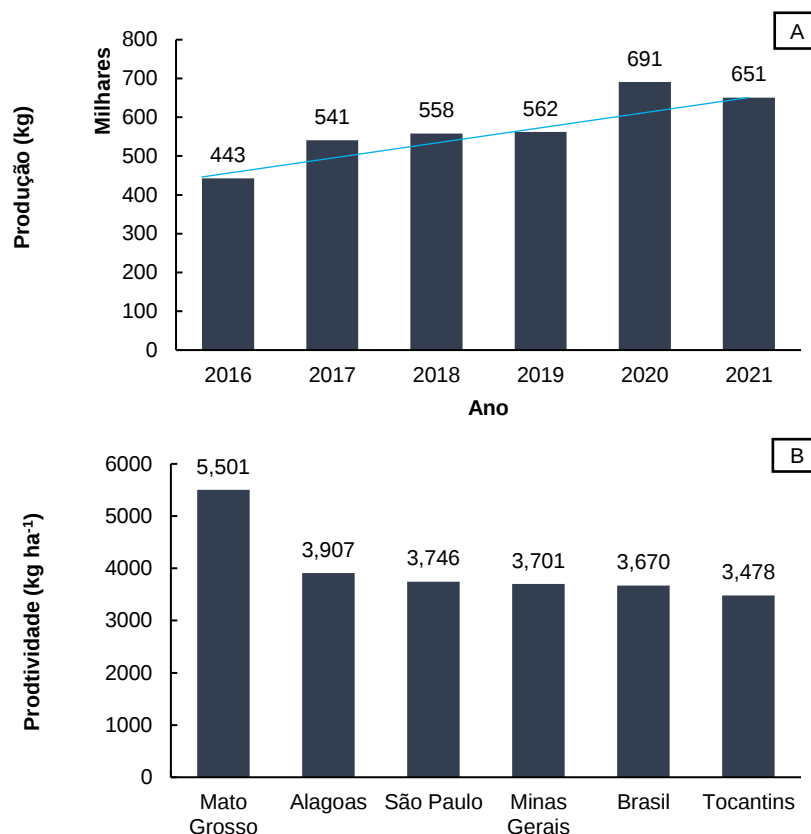


Figura 5. Produção nacional de amendoim de 2016 a 2021 (A), e produtividade média nacional (Brasil) e dos principais estados produtores do país (B), safra 2021. Fonte: IBGE (2022).

O estado de São Paulo é o maior produtor brasileiro de amendoim, concentrando 92,8% da produção nacional na safra 2021 (IBGE, 2021) e respondendo por 100% das exportações nacionais de grãos e óleo de amendoim (Sampaio e Fredo, 2019). No estado de São Paulo, o cultivo de amendoim se dá em duas safras: a primeira safra, denominada safra das águas, com janela de semeadura entre outubro a novembro, concentra cerca de 95% da produção; já a segunda safra, denominada de safra da seca ou safrinha, com janela de semeadura entre fevereiro a março, é responsável principalmente pela produção de sementes (Conab, 2018).

A produção paulista de amendoim se concentra nas regiões denominadas de Alta Mogiana e Alta Paulista, consideradas como os polos de produção de amendoim, englobando os municípios de Ribeirão Preto, Dumont, Jaboticabal, Sertãozinho, Tupã e Marília (SNA, 2017). Na região, o município de Jaboticabal se destaca frente aos demais, produzindo cerca de um quarto de toda a produção nacional de amendoim, tendo sido oficializado no ano de 2018 como a capital paulista do amendoim por meio

da Lei nº 16.640 de 05 de janeiro de 2018 (BRASIL, 2018), consolidando a cidade como o polo nacional de produção da cultura.

No estado de São Paulo, o amendoazeiro é empregado principalmente como cultura de sucessão à cana-de-açúcar para a renovação dos canaviais, embora o cultivo na entressafra seja uma alternativa para os produtores que desenvolvem outras atividades que não a canavieira e almejam aumentar seu retorno econômico (França et al., 2021). Conforme relata Coelho et al. (2017), uma das grandes dificuldades enfrentadas pelo produtor de amendoim é a obtenção de sementes. Dessa forma, os autores relatam que o período da safrinha é a época ideal para a produção de sementes, devido à baixa incidência de problemas fitossanitários em decorrência de condições climáticas desfavoráveis à incidência de pragas e doenças, e pelo beneficiamento das sementes próximo à safra de verão, garantindo sementes com maior vigor e germinação, além de proporcionar ao produtor maior retorno econômico devido à baixa oferta do produto no mercado.

No estado de São Paulo, os produtores de amendoim vêm empregando cultivares modernas do tipo Runner, com destaque para as cultivares IAC 503 e IAC 505, desenvolvidas pelo programa de melhoramento genético do Instituto Agronômico de Campinas (IAC). Ambas as cultivares vêm ganhando expressiva aceitação por parte dos produtores devido às suas características de moderada tolerância a doenças foliares e tolerância à seca, ciclo de 130 a 140 dias, hábito de crescimento rasteiro e produtividade potencial de até 6.500 kg ha⁻¹, produzindo sementes de alto teor oleico (70%), que apresentam maior estabilidade oxidativa e maior tempo de prateleira (Suassuna e Ferreira, 2014; Godoy et al., 2018).

2.2. Necessidade hídrica da cultura

Cerca de 80% da produção mundial de amendoim se dá em ambientes em que há a ocorrência de déficit hídrico durante o seu cultivo (Wright e Nageswara Rao, 1994). Esta constatação evidencia a tolerância da cultura mediante condições de deficiência hídrica, bem como revela um cenário promissor para a adoção da irrigação; uma prática com potencial de alavancar expressivamente a produtividade da cultura.

A tolerância da planta de amendoim à seca resulta da sua capacidade em manter um sistema radicular robusto, com o estresse hídrico estimulando o crescimento das radículas em camadas mais profundas (Abou Kheira, 2009). Além do sistema radicular, a planta de amendoim apresenta mecanismos metabólicos para resistir a condições de déficit hídrico, como a manutenção das taxas de transpiração e resistência estomática (Reddy et al., 2003).

A literatura apresenta faixas variadas de demanda hídrica para a planta de amendoim, dependendo das condições de solo e clima da região. Nesse sentido, Abou Kheira (2009) relatou que a gestão mais eficiente dos recursos hídricos pode ser atingida a partir da estimativa da demanda hídrica da cultura por meio do desenvolvimento de coeficientes de cultivo específicos para cada local, considerando as características fenológicas da cultivar. De forma geral, é estabelecido que a cultura necessita receber, ao longo de todo o ciclo, precipitação de 500 a 700 mm (Doorenbos e Kassam, 1979; Ahmad, 1999). Baldwin e Harrison (1996) observaram a faixa de necessidade hídrica do amendoimzeiro entre 508 a 635 mm. Silva (1997), nas condições climáticas do semiárido brasileiro, observaram que foram necessários 700 mm de água durante todo o ciclo da planta de amendoim para se atingir bons níveis de produtividade.

Em lavouras destinadas à produção de sementes de amendoim, sob condições de baixas precipitações, a irrigação é prática indispensável (Coelho et al., 2017). Ketring (1991), reportou a necessidade mínima de 500 mm de água para produzir sementes de amendoim com alto potencial de germinação e vigor, nas condições climáticas de Perkins, Oklahoma, EUA.

Apesar da supressão de água causar redução da produtividade em qualquer fase do ciclo do amendoimzeiro (Azevedo et al., 2014), a cultura é consideravelmente mais sensível ao déficit hídrico durante a floração e formação da produção (período reprodutivo) em comparação a fase vegetativa (Nakagawa e Rosolem, 2011), uma vez que a ocorrência do déficit hídrico no período de floração acarreta queda das flores e prejudica a polinização, e durante a formação da produção resulta em redução de massa de vagens (Pezzopane, 2009).

Estratégias de irrigação eficientes para a cultura do amendoim visando à economia de água têm sido desenvolvidas a partir da supressão hídrica durante a fase

vegetativa, o que, conforme observado por Abou Kheira (2009), resultou em sementes com maior massa unitária e aumento da produtividade da cultura. A ocorrência do déficit hídrico durante esta fase possibilita alcançar maior produtividade, maior eficiência do uso de água e melhor rendimento econômico (Ong, 1984).

2.3. O modelo AquaCrop

Doorenbos e Kassam (1979) demonstraram que a redução na produtividade de uma cultura está diretamente ligada à redução de suas taxas de evapotranspiração (ET_c). Sendo uma evolução direta desta abordagem, o modelo AquaCrop se diferencia por separar ET_c em transpiração (Tr) e evaporação (E), as quais representam, respectivamente, o consumo produtivo e não produtivo da água, gerando um modelo simplificado que estima o crescimento e a senescência do dossel, o acúmulo de biomassa e a produtividade da cultura (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009).

Na planta, a via por onde ocorre a transpiração, ou seja, os estômatos, é a mesma por onde CO₂ é capturado e utilizado para a produção de carboidratos por meio dos processos fotossintéticos, dessa forma, a transpiração é proporcional à produção de biomassa (Steduto et al., 2009; Vanuytrecht et al., 2014). A base do modelo AquaCrop pode ser representada pela seguinte equação (Equação 1):

$$B = WP^* \Sigma Tr \quad (1)$$

em que B é biomassa da parte aérea (t ha⁻¹), WP* é a produtividade da água normalizada (kg m⁻²) e ΣTr é somatória da transpiração da cultura ao longo do ciclo (mm).

No AquaCrop, a relação entre biomassa produzida e água consumida é normalizada pela somatória diária do quociente da transpiração da cultura pela evapotranspiração de referência (ET_o), levando em conta também a concentração de CO₂ na atmosfera, originando WP* (Equação 2). Esta relação apresenta

comportamento linear para diversas espécies e condições climáticas, tornando este um parâmetro conservativo (Steduto et al., 2007; Steduto et al. 2012).

$$WP^* = \left[\frac{B}{\Sigma \left(\frac{T_r}{ET_o} \right)} \right]_{[CO_2]} \quad (2)$$

Em culturas que produzem alto teor oleico e proteico, maior energia e maior gasto de assimilados fotossintéticos são empregados por unidade de biomassa produzida após a floração e durante o enchimento de grãos ou frutos, o que resulta em menor WP^* durante o período reprodutivo. Portanto, para se ajustar a estas culturas, o modelo AquaCrop emprega valor único de WP^* até a floração e, a partir de então, este valor pode ser reduzido gradualmente pelo usuário a fim de se contabilizar a composição da produção de forma mais assertiva (Steduto et al., 2012).

Para simular o desenvolvimento durante o ciclo e a produtividade final da cultura, o modelo AquaCrop emprega um processo de quatro etapas: (I) crescimento da cobertura do dossel (CC), (II) transpiração da cultura, (III) acúmulo de biomassa e (IV) produtividade (Y) (Steduto et al., 2009; Vanuytrecht et al., 2014). Estes processos são calculados em escala diária, considerando os diversos componentes do sistema solo-planta-atmosfera, conforme ilustrado na Figura 6, na qual estão apresentados de forma esquemática e resumida os processos empregados pelo modelo AquaCrop durante o desenvolvimento das simulações.

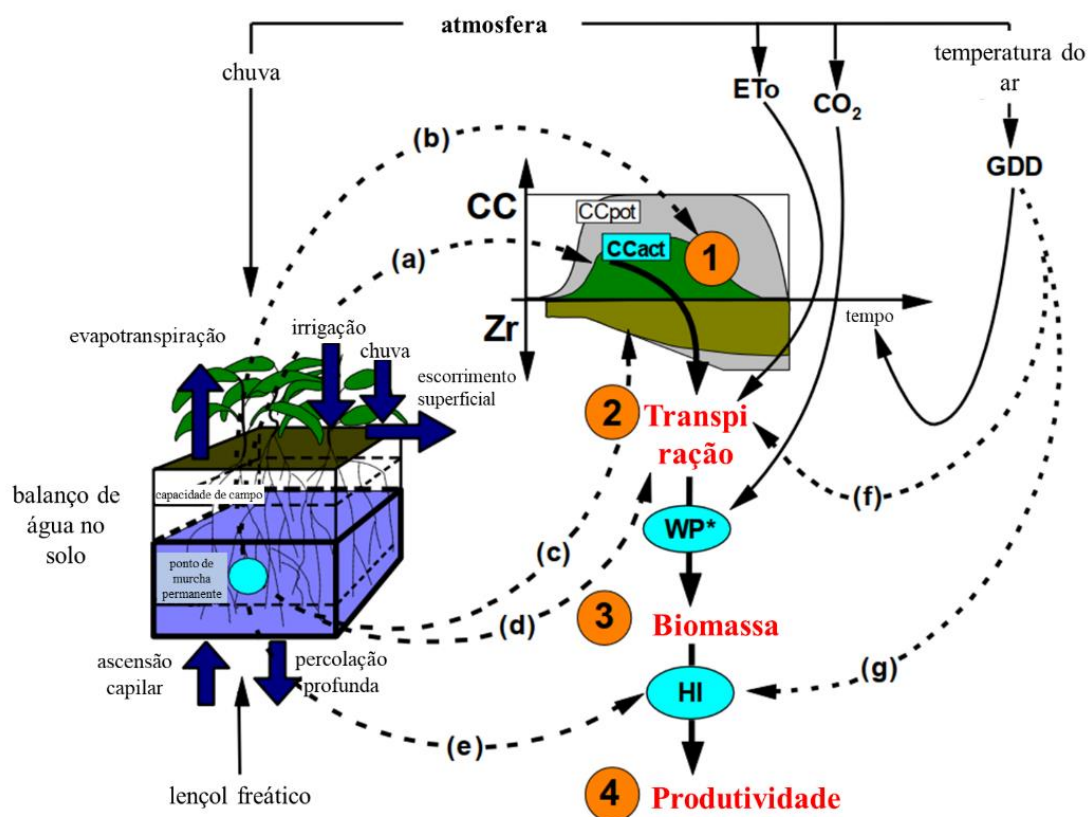


Figura 6. Procedimentos realizados pelo modelo AquaCrop nas 4 etapas e processos (setas pontilhadas) afetados pelo estresse hídrico (a - e) e estresse por temperatura (f - g). Zr é a profundidade de enraizamento. O estresse hídrico: (a) retarda a expansão do dossel, (b) acelera a senescência do dossel, (c) diminui o aprofundamento da raiz, mas apenas se severo, (d) reduz a abertura estomática e a transpiração e (e) afeta o índice de colheita (IC) (IC é citado no modelo como HI ; acrônimo em inglês para *harvest index*). O estresse de baixa temperatura (f) reduz a transpiração da cultura. O estresse por temperatura quente ou fria (g) inibe a polinização e reduz o IC . Adaptado de Raes (2017).

O AquaCrop é considerado um modelo a nível de dossel, pois simula o desenvolvimento da cultura pela expansão e envelhecimento do dossel, condutância estomática e senescência (Chibarabada et al., 2020). Portanto, a cobertura do dossel é uma variável de estado fundamental para a calibração do modelo AquaCrop. A evolução do desenvolvimento do dossel ao longo do ciclo da cultura é apresentada na Figura 7.

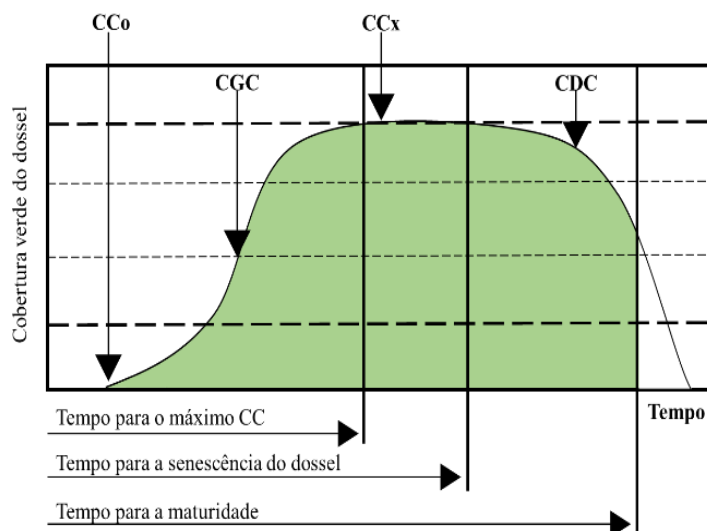


Figura 7. Evolução da cobertura do dossel durante o ciclo de cultivo. CCo - cobertura inicial do dossel no momento da emergência da cultura, CGC - taxa de crescimento, CCx - cobertura máxima e CDC - coeficiente de declínio do dossel. Adaptado de Steduto et al. (2009).

No modelo AquaCrop, CC é diretamente proporcional à T_r (Chibbarabada et al., 2020), e é calculado em escala diária, ajustado para a cobertura do dossel, conforme a seguir:

$$T_r = CC^* K_{C_{Tr,x}} ET_o \quad (3)$$

em que T_r é expresso em mm, CC^* é cobertura do dossel ajustada para efeitos microadvectivos (%) e $K_{C_{Tr,x}}$ é o valor máximo do coeficiente de transpiração da cultura (adimensional). A microadvecção corresponde ao calor sensível do solo proveniente da porção descoberta pelo dossel verde da cultura ($1-CC$), o que aumenta a energia disponível para T_r em relação a E . No modelo AquaCrop, o ajuste de CC para efeitos microadvectivos baseia-se nos dados experimentais de Adams et al. (1976) e Villalobos e Fereres (1990).

No modelo AquaCrop, os vários tipos de estresse são representados por coeficientes de estresse (K_s), que variam de 0 (sem estresse) a 1 (estresse total) e indicam o efeito e a intensidade relativa do estresse de acordo com a duração e estágio em que ocorre (Figura 8), resultando em: (a) redução da taxa de expansão do dossel, (b) alteração da taxa de senescência, (c) fechamento de estômatos e (d)

redução do índice de colheita (Steduto et al., 2012). Estes processos foram apresentados de forma esquemática previamente na Figura 6. O modelo AquaCrop é projetado para simular as respostas da cultura primeiramente em resposta à água e, posteriormente, à fatores como temperatura, aeração do solo, salinidade, nível de fertilidade do solo e concentração de CO₂ na atmosfera (Steduto et al., 2012).

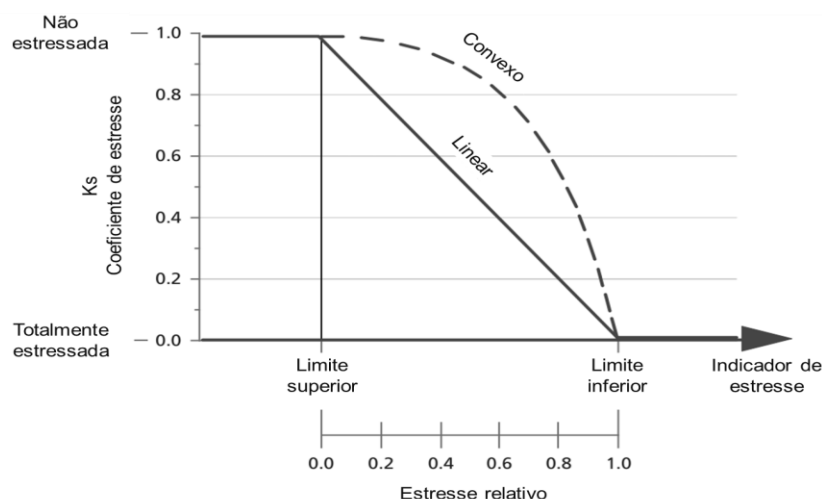


Figura 8. Relação entre nível de estresse estabelecido pelo usuário (estresse relativo) e coeficiente de stress (Ks) gerado no modelo AquaCrop. As relações podem ser lineares ou convexas. Fonte: Adaptado de Steduto et al. (2012).

Para calcular a produtividade da cultura, o modelo AquaCrop emprega o índice de colheita (IC), que é ajustado de acordo com a duração e intensidade do estresse ambiental, e o momento de sua ocorrência (por exemplo, durante a floração e/ou durante a formação da produtividade) (Steduto et al., 2009; Vanuytrecht et al., 2014), de acordo com a seguinte relação:

$$Y = f_{HI} HI_o B \quad (4)$$

em que Y é a produtividade (t ha⁻¹) e f_{HI} é o multiplicador de estresse que ajusta o índice de colheita de referência (HI_o) para o índice de colheita real (HI).

Nas simulações com o modelo AquaCrop, os dados de entrada são agrupados em forma de “projetos”, que reúnem os arquivos de clima, cultura, irrigação, campo, perfil do solo, lençol freático e condições iniciais. Estes arquivos englobam as características da cultura, clima, solo e manejo de irrigação adotadas nos

experimentos. A avaliação das simulações pode ser realizada no próprio modelo a partir da inserção de dados observados de cobertura do dossel, biomassa da parte aérea e conteúdo de água no solo.

As simulações do desenvolvimento dos cultivos geradas no modelo AquaCrop podem ser aplicadas em estudos de diferentes finalidades, podendo levar em consideração períodos de cultivos específicos ou escalas temporais mais amplas, empregando-se dados meteorológicos históricos para definir estratégias de manejo de irrigação, bem como estimar riscos de decréscimos de produtividade devidos às condições climáticas do local de estudo ou de cenários futuros de mudanças climáticas.

Mais detalhes sobre a arquitetura e processos de simulação utilizado pelo modelo podem ser acessados na série de três artigos publicados no lançamento do modelo (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009; Hsiao et al., 2009), bem como na publicação da FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66 “Crop Yield Response to Water” (Steduto et al., 2012) e no manual de referência do modelo (Steduto et al., 2012), que é atualizado regularmente conforme as alterações que o modelo recebe.

2.4. Utilização do modelo AquaCrop na cultura do amendoim

Pesquisas com o modelo AquaCrop evidenciaram bom desempenho deste na simulação dos componentes de desenvolvimento e de produção de leguminosas como a soja (*Glycine max*) (Adeboye et al., 2017; Silva et al., 2018), feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) (Costa et al., 2021), feijão bambara (*Vigna subterranea*) (Karunaratne et al., 2011; Mabhaudhi et al., 2014) e ervilha (*Pisum sativum*) (Paredes e Torres, 2017). Entretanto, a literatura evidencia que o modelo foi pouco explorado para o amendoimzeiro comercial (*Arachis hypogaea* L.). Dessa forma, até o momento, poucos trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de calibrar e testar o AquaCrop para a cultura, bem como o de aplicá-lo em estudos de riscos climáticos e determinação de manejo de irrigação.

O primeiro trabalho divulgado internacionalmente com o intuito de calibrar e validar o modelo AquaCrop para a cultura do amendoim foi desenvolvido na Ásia, por Khov et al. (2017), no qual foi avaliado a capacidade do modelo em simular a cobertura

do dossel, biomassa e produtividade da cultura do amendoim submetida a três regimes de irrigação, em solo remanescente de área de várzea, na região sul do Laos, onde cultivos de arroz são tipicamente empregados. Os autores observaram que o modelo simulou satisfatoriamente as variáveis analisadas em tratamento com turno de irrigação de 10 dias. Entretanto, o modelo não apresentou bom desempenho nas simulações referentes aos tratamentos de menor intervalo entre as irrigações, o que possivelmente resultou da dificuldade do modelo em simular o balanço hídrico do solo diante dos dados limitados de umidade e características físico-hídricas do solo em questão.

Após a publicação do artigo de Khov et al. (2017), apenas o trabalho Chibarabada et al. (2020) consta na literatura internacional, realizado na África do Sul, para calibrar e testar o modelo para cultivos de amendoimzeiro. No estudo, os pesquisadores detectaram resultados promissores do modelo AquaCrop na simulação da cobertura do dossel, biomassa, produtividade e evapotranspiração da cultura. Os autores relataram a importância do desenvolvimento de novas pesquisas de avaliação do modelo para a cultura em diferentes regiões, possibilitando sua utilização em pesquisas de avaliação da produtividade do amendoimzeiro em diferentes condições ambientais e de disponibilidade hídrica.

Apesar da importância econômica da cultura do amendoim para o estado de São Paulo, até o momento, não foram encontradas publicações nacionais referentes a calibração e teste do modelo AquaCrop para cultivares de amendoim representativas do sistema de produção nacional, com a presente pesquisa visando preencher esta lacuna.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Banco de dados e descrição da área experimental

O banco de dados empregado para a calibração e teste do modelo AquaCrop para o amendoimzeiro provém de três anos de experimentos conduzidos por França et al. (2021) e Bertino (2021). Nos experimentos, foram realizados 4 ciclos de cultivo

de amendoimzeiro nos anos de 2018, 2019 e 2020, conduzidos no período da safra da seca para a cultura no estado de São Paulo (segunda safra).

Os estudos foram conduzidos na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FCAV/Unesp), localizada em Jaboticabal, SP (latitude 21°14'45" S, longitude 48°17'05" O e altitude de 570 m) (Figura 9). De acordo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, tropical (Alvares et al., 2013), com invernos relativamente secos e verões chuvosos, com precipitação anual média de 1425 mm e temperatura média anual de 22 °C.

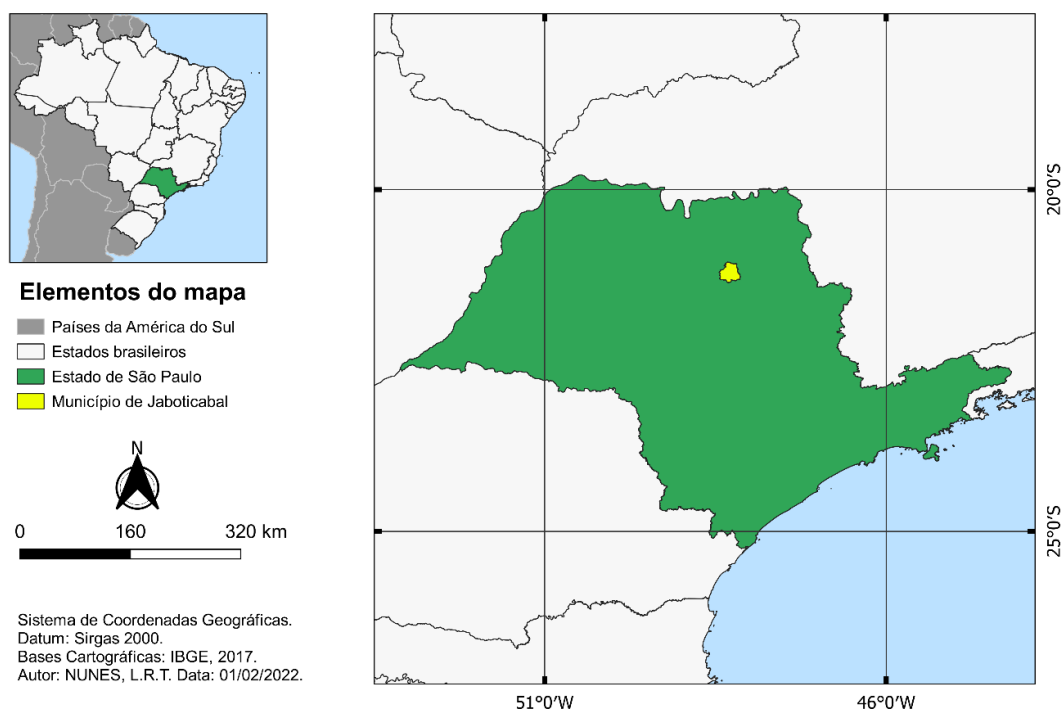


Figura 9. Localização geográfica da área de estudo destacando o município de Jaboticabal, SP.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho eutroférico típico, de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (Santos et al., 2018), e como Oxisol de acordo com o sistema americano de classificação de solos (Soil Survey Staff, 2014).

3.2. Estabelecimento da cultura

Foram utilizadas sementes de amendoim das cultivares IAC 505 (experimentos de 2018) e IAC 503 (experimentos de 2019 e 2020), do tipo Virginia Runner, com 80% de germinação, semeadas mecanicamente na densidade de 25 sementes m^{-1} e espaçamento de 0,9 m entre linhas, visando obter população final de 222.222 plantas ha^{-1} . Em 2018 dois ciclos foram realizados, com semeadura em 6 de fevereiro (2018 Fev) e 5 de março (2018 Mar), respectivamente. Para 2019 e 2020 as semeaduras ocorreram em 6 de março e 11 de março, respectivamente. A aplicação de fertilizantes seguiu as recomendações para a cultura na região (Ambrosano et al., 1997), baseando-se nas análises químicas do solo realizadas nos anos de cultivo (Tabela 1), aplicando-se nas semeaduras de 2018, 300 kg ha^{-1} da formulação 0-20-20 (N, P_2O_5 , K_2O), e em 2019 e 2020, 20 kg ha^{-1} de K_2O e 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 , em formas de cloreto de potássio e superfosfato simples como fontes, respectivamente.

Tabela 2. Atributos químicos do solo da área experimental (0-20 cm) antes e depois da adubação de semeadura. Jaboticabal, SP.

Ano	Camada (cm)	pH	M.O.	P_{resina}	S	H+Al	Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
		CaCl ₂	(g dm^{-3})	(mg dm^{-3})		(mmol _c dm^{-3})							%
2018	0-20	5,6	40	67	5	21	1	3,4	36	13	52,7	73,9	71
	20-40	5,8	40	68	5	20	1	3,2	36	11	50,3	70,4	71
2019	0-20	5,9	21	35	8	23	0	3,9	36	12	52,4	75,4	70
2020	0-20	6,1	23	72	3	15	0	3,5	48	12	63,9	79,1	81

M.O. = matéria orgânica; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases.

3.3. Tratamentos e delineamento experimental

Os experimentos foram conduzidos em delineamento de blocos em faixas, com 5 níveis de irrigação: L1, L2, L3, L4 e L5, com 4 repetições, totalizando 20 unidades experimentais (Figura 10). Nos dois experimentos de 2018, os níveis de irrigação corresponderam às reposições de 100% (L1), 94% (L2), 63% (L3), 27% (L4) e 8% (L5) da ETc acumulada da cultura, subtraída a precipitação, durante todo o ciclo de cultivo.

Nos experimentos conduzidos em 2019 e 2020, adotou-se irrigação plena (L1) em toda a área até o florescimento (R1), seguido da diferenciação dos tratamentos com reposições de 100% (L1), 81% (L2), 56% (L3), 29% (L4) e 10% (L5) da ETc acumulada, subtraída a precipitação.

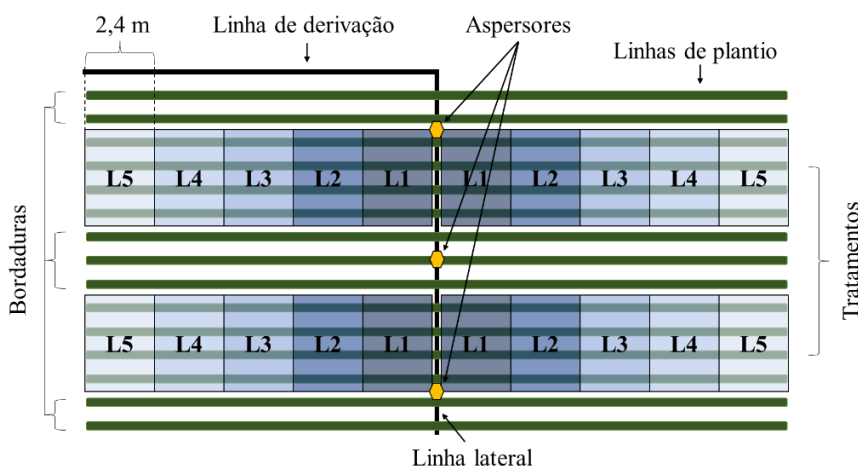


Figura 10. Representação da distribuição dos tratamentos na área experimental.

3.4. Manejo da irrigação

A demanda hídrica da cultura, correspondente à ETc, foi calculada diariamente pelo produto do coeficiente de cultivo (Kc inicial: 0,4, Kc médio: 1,15 e Kc final: 0,6) e a ETo, estimada pela equação de Penman-Monteith segundo a parametrização FAO-56 para a cultura do amendoim (Allen et al., 1998). As irrigações foram aplicadas quando a lâmina de ETc acumulada, subtraída a precipitação (P), se igualava ao valor de armazenamento de água facilmente disponível do solo (AFD), levando em conta o manejo de irrigação da lâmina L1 (sem estresse hídrico), conforme as seguintes relações:

$$Se: \sum(ETc - P) \simeq AFD = irrigar para se atingir \theta_{cc} (L1) \quad (5)$$

$$AFD = p (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) Z \quad (6)$$

em que AFD foi calculada em 25,2 mm, assumindo-se fração de depleção (p) igual a 0,7, profundidade do sistema radicular (Z) de 300 mm e umidades na capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) de 0,4 e 0,28 $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$, respectivamente (Tabela 3), conforme os dados físico-hídricos do solo da área experimental.

O gradiente das lâminas de irrigação aplicadas aos tratamentos foi obtido por sistema de aspersão em linha, com a utilização de aspersores Senninger Modelo 3023-2 com bocais $\frac{3}{4}$ " M 08Qx05, operados com pressão de 350 kPa (Figura 11). A distribuição da precipitação em função da distância da linha de aspersores foi determinada em teste de campo, posicionando-se os coletores perpendicularmente à linha de irrigação, com espaçamento de 1 m desde a linha de aspersores até o limite do raio de aplicação de irrigação (Figura 11). As lâminas de precipitação, irrigação e totais recebidos nos experimentos são apresentadas na Tabela 3.

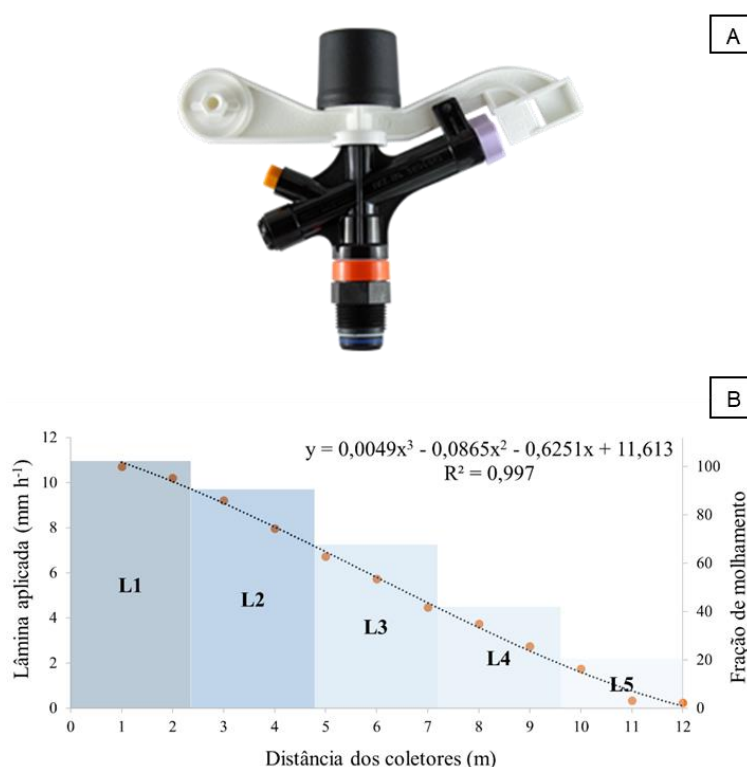


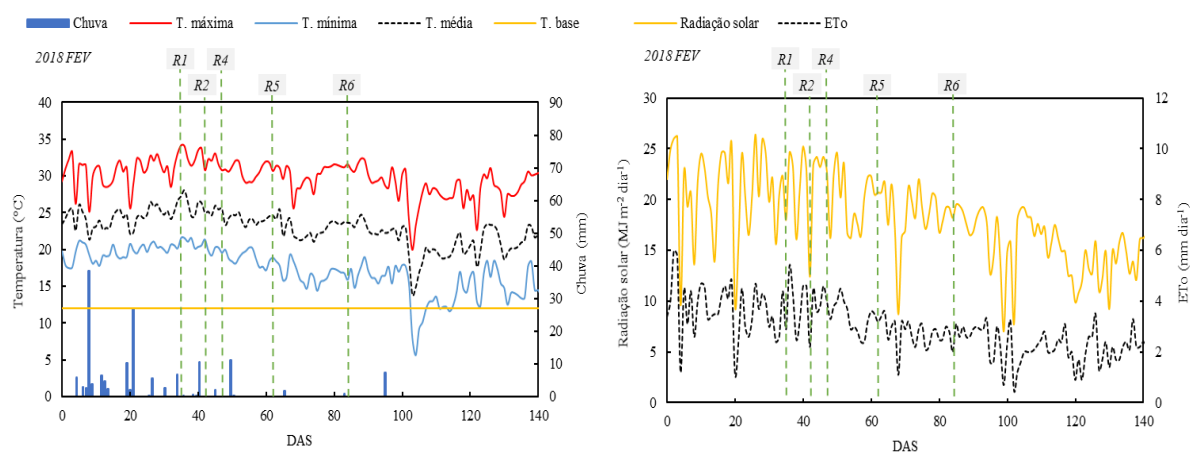
Figura 11. Modelo de aspersor empregado (A) (Fonte: Senninger, 2022) e distribuição da precipitação em função da distância da linha de aspersores (B).

Tabela 3. Precipitação (P), irrigação (I) e lâmina total (L), em mm, por tratamento aplicadas durante os ciclos de cultivo de amendoim.

Tratamento	2018 Fev			2018 Mar			2019			2020		
	P	I	L	P	I	L	P	I	L	P	I	L
L1		314	471		314	365		204	421		344	492
L2		275	432		275	326		170	387		278	426
L3	157	206	363	51	206	257	217	126	343	148	202	350
L4		124	281		124	175		79	296		121	269
L5		66	223		66	117		46	263		63	211

3.5. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos da estação meteorológica automática da FCAV/Unesp, localizada a 1 km da área experimental. Foram coletados dados diários de chuva (mm), umidade relativa média (UR), velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}), temperatura máxima, mínima e média do ar ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e ETo (mm dia^{-1}), calculado pelo método Penman-Monteith (Allen et al., 1998) (Figura 12).



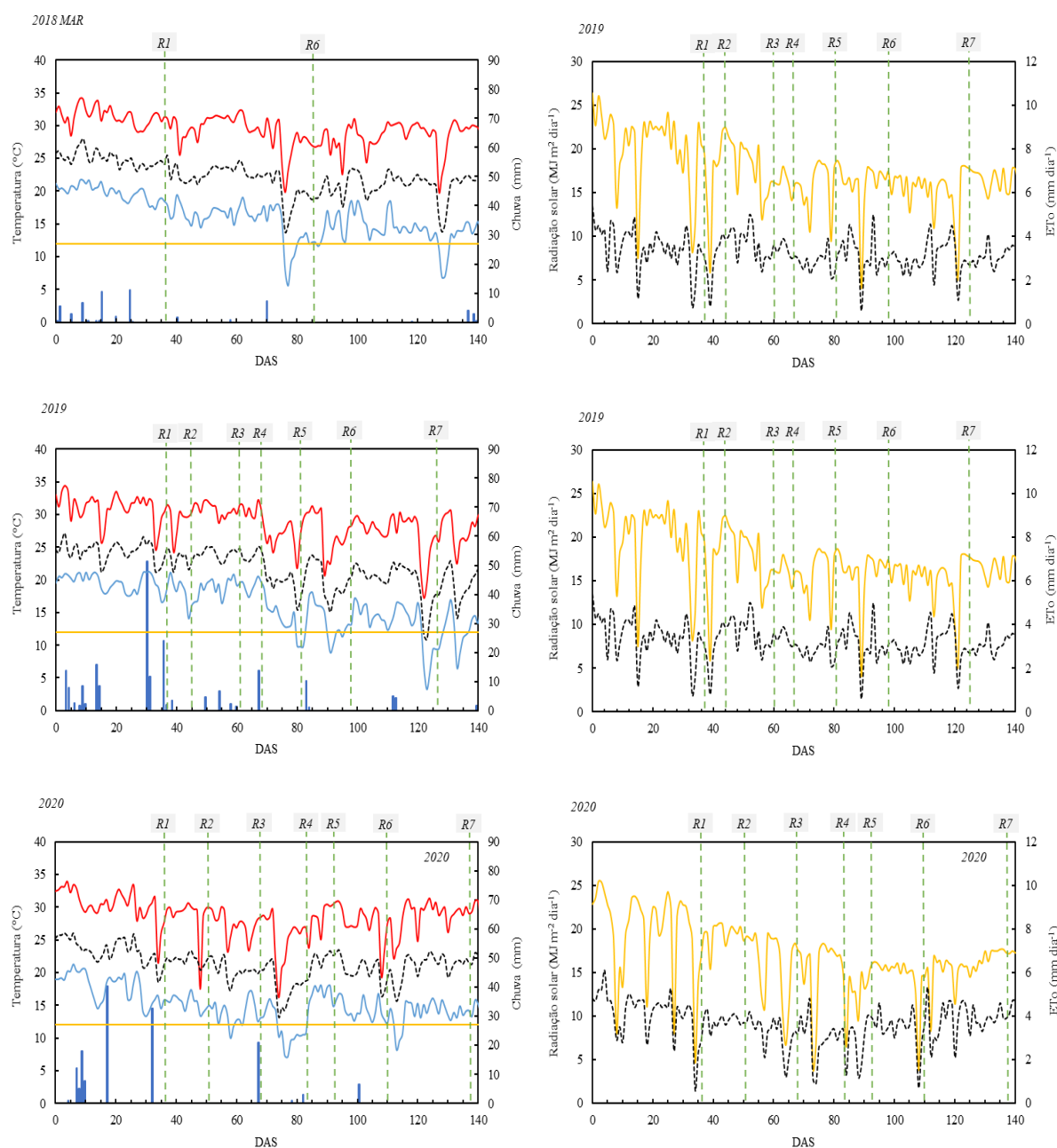


Figura 12. Condições meteorológicas na área experimental ao longo dos 4 ciclos de cultivo do amendoim. Jaboticabal, SP. As legendas alfanuméricas (R1, R2, etc.) representam os estádios fenológicos do amendoim de acordo com a escala de Boote (1982).

3.6. Dados do solo

As propriedades físico-hídricas do solo dos experimentos, correspondentes à textura do solo e umidades na saturação, capacidade de campo e ponto de murcha permanente, foram obtidas de análises prévias de um estudo conduzido no local

(Tabela 4) (Lopes, 2006). Durante os experimentos de 2019 e 2020, a umidade do solo foi mensurada em intervalos de 2 a 7 dias pela sonda HydroSense II (modelo HS2P) (Campbell Scientific, Inc.[®]), a qual emprega o princípio de medição por reflectometria no domínio do tempo (TDR) (Figura 13). As leituras foram realizadas em hastes de metal de 20 cm de profundidade, instaladas em cada unidade experimental. Dessa forma, foi possível acompanhar o armazenamento de água no solo (Aa) na camada de profundidade 0-20 cm.



Figura 13. Representação da sonda HydroSense II modelo HS2P empregada para as leituras de umidade de solo dos experimentos conduzidos em 2019 e 2020. Adaptado de Campbell Scientific (2022).

Tabela 4. Características físico-hídricas do solo da área experimental.

Profundidade (cm)	CAD (mm m ⁻¹)	Conteúdo de água no solo (cm ³ cm ⁻³)			Ksat (mm dia ⁻¹)
		θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{SAT}	
20	120	0,28	0,40	0,48	30
40	120	0,28	0,40	0,48	30
60	120	0,28	0,40	0,48	30

Fonte: Lopes (2006). CAD = Capacidade total de água no solo; θ_{PMP} = Umidade no ponto de murcha permanente; θ_{CC} = Umidade na capacidade de campo; θ_{SAT} = Umidade no ponto de saturação; Ksat = condutividade hidráulica saturada do solo.

3.7. Dados da cultura

A cobertura do dossel (CC) foi medida a cada 15 dias pelo aplicativo para smartphone CanopeoTM, programado pela Matlab (Mathworks, Inc., Natick, MA, EUA). O aplicativo utiliza imagens coloridas (faixa RGB) para quantificar a projeção da área verde do dossel da cultura no solo (Figura 14). As leituras não requerem calibração prévia e são apresentadas como uma imagem, na qual o dossel verde é exibido em pixels brancos e o solo em pixels pretos. Os resultados são quantificados em porcentagem de cobertura vegetal verde. As leituras foram realizadas posicionando

um smartphone de modo a enquadrar a imagem em um gabarito de 0,81 m² (0,9 x 0,9 m).

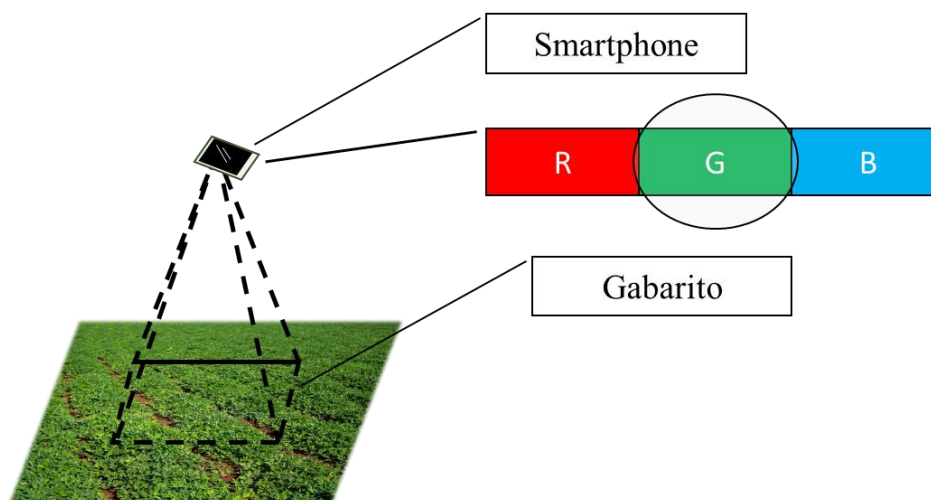


Figura 14. Representação do emprego do aplicativo Canopeo™ nas leituras da fração de cobertura do dossel realizadas ao longo dos experimentos.

As determinações de biomassa da parte aérea (B) ao longo do ciclo foram realizadas somente em 2019 e 2020 pela retirada, a cada 15 dias, de 4 plantas da área experimental, as quais foram separadas em parte aérea e vagens (a partir de R3, quando do início da formação das vagens), sendo submetidas à secagem em estufa de circulação forçada a 70 °C por 24 horas. Após a secagem os componentes foram pesados para a determinação de sua massa. A biomassa final (total ao fim do ciclo) (BF) e produtividade de vagens (PV) foram determinadas pela coleta de todas as plantas presentes em 3 metros na linha de cultivo em todos os ciclos, seguindo os procedimentos de secagem e pesagem já descritos. O índice de colheita (IC) foi calculado pela divisão da massa de vagens pela biomassa final, obtida ao fim do ciclo. O acompanhamento da fenologia da cultura foi realizado de acordo com a escala de Boote et. al. (1982).

3.8. Calibração, teste e avaliação do modelo

O arquivo com os coeficientes a serem calibrados para representar o desenvolvimento das cultivares de amendoim IAC 505 e IAC 503 no modelo AquaCrop (PeanutIAC.CRO) foi criado a partir de um arquivo de cultura para o feijoeiro

(Drybean.CRO), o qual já vem incluído nos arquivos base do *Software* AquaCrop v. 6.1, de maio de 2018, instalado no sistema operacional Windows 10, v. 20H2.

Visando o emprego dos dados que melhor representassem a resposta da planta de amendoim frente às diferentes condições de manejo de irrigação, para a calibração e teste do modelo foram considerados, de cada ciclo, apenas 3 tratamentos, sempre referentes às lâminas L1, L3 e L5 dos experimentos, correspondentes, respectivamente, as condições de ausência de déficit hídrico, déficit hídrico moderado e déficit hídrico severo para a cultura.

Para a calibração dos coeficientes da cultura no modelo AquaCrop foram empregados dados dos tratamentos referentes à irrigação plena (L1) de todos os 4 ciclos de cultivo da cultura. Inicialmente, os coeficientes de fenologia, crescimento e senescência do dossel, WP* recomendado e o índice de colheita foram incluídos no arquivo de cultura do AquaCrop, utilizando os dados de campo obtidos no tratamento L1 do experimento de 2019. A escolha deste tratamento, dentre os demais, para iniciar os procedimentos de calibração, foi devida à maior quantidade de variáveis biométricas medidas em campo, à ausência de estresse hídrico por ser conduzido com irrigação plena, e pelo menor estresse térmico ocorrido durante o ciclo de cultivo, principalmente em relação ao experimento de 2020. Em seguida, procedeu-se à calibração dos coeficientes da cultivar considerando os dados do tratamento L1 dos demais ciclos (2018 Fev, 2018 Mar e 2020).

O processo de calibração consistiu em ajustar, iterativamente, os coeficientes da cultivar de modo a minimizar os desvios entre os resultados das simulações e os dados observados de fenologia, crescimento do dossel e produtividades de biomassa e de vagens. Com os coeficientes das cultivares IAC 503 e IAC 505 calibrados para ausência de déficit hídrico, seguiu-se com a calibração do modelo utilizando os tratamentos dos experimentos de 2019 com irrigação deficitária (L3 e L5). As datas de ocorrência dos estádios e duração das fases fenológicas, de crescimento do dossel e de produção foram preenchidas no formulário do arquivo de cultura, sendo, posteriormente, convertidas em soma de graus-dia (GD) a partir da semeadura, assumindo-se temperatura base (Tb) igual a 12 °C (Leong e Ong, 1983; Mohamed et al., 1988). A produção de biomassa afetada pela salinidade e fertilidade do solo não foram considerados.

Com os coeficientes das cultivar IAC 503 e IAC 505 calibrados, procedeu-se ao teste do modelo com o conjunto de dados independentes (não utilizados no processo de calibração), correspondentes aos tratamentos sob irrigação deficitária (L3 e L5) dos ciclos de cultivo dos experimentos de 2018 Fev, 2018 Mar e 2020.

Tanto na calibração, quanto no teste, o modelo foi avaliado quanto a sua capacidade de simular, para o amendoazeiro, as variáveis: cobertura do dossel (CC), biomassa da parte aérea ao longo do ciclo (B) (Mg ha^{-1}) (apenas para os ciclos 2019 e 2020), biomassa final (BF) (Mg ha^{-1}), índice de colheita (IC) (apenas para os ciclos 2019 e 2020), produtividade (PV) (Mg ha^{-1}) e armazenamento de água no solo (Aa) (mm) (apenas para os ciclos 2019 e 2020). Na Figura 15 está apresentado um esquema resumido dos procedimentos adotados, dos dados de entrada e de saída empregados no processo de calibração e teste do modelo AquaCrop para o amendoazeiro.

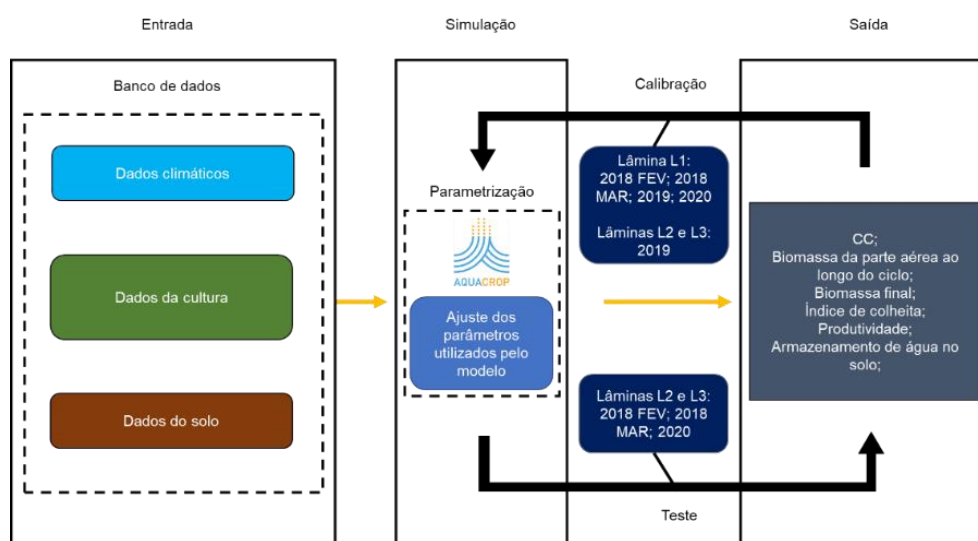


Figura 15. Resumo das etapas de calibração e teste do modelo AquaCrop para o amendoazeiro empregadas na pesquisa.

A exceção do coeficiente de determinação (R^2) (Equação 7), os índices estatísticos utilizados para avaliar o desempenho do modelo nas fases de calibração e teste foram correspondentes aos utilizados originalmente no AquaCrop, os quais são: raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 8), raiz do erro quadrático médio normalizado (CV(RMSE)) (Equação 9), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (EF)

(Equação 10) e índice de concordância de Willmott (d) (Equação 11), conforme descrito por Raes et al. (2018).

$$R^2 = \left[\frac{\sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{(\sum (O_i - \bar{O})^2) \sum (S_i - \bar{S})^2}} \right] \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum (S_i - O_i)^2}{n}} 100 \quad (9)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (11)$$

em que: O_i é o valor observado, $\bar{O}$ é a média dos valores observados, S_i é o valor simulado, $\bar{S}$ é a média dos valores simulados.

O coeficiente de determinação indica a concordância entre dados observados e simulados. O RMSE mede a magnitude média da diferença entre previsões e observações, variando de 0 a infinito positivo, sendo expresso nas mesmas unidades da variável estudada, valores próximos a 0 indicam boa concordância. O CV(RMSE) apresenta o mesmo princípio do RMSE, no entanto, os valores são expressos em ordem de porcentagem. O coeficiente EF determina a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variância das observações (Nash e Sutcliffe, 1970) e pode variar de menos infinito a 1. Um EF 1 indica que a combinação entre o modelo e as observações é perfeita, um EF de 0 significa que as previsões do modelo são tão precisas quanto a média dos dados observados e um EF negativo ocorre quando o média das observações é uma previsão melhor do que o modelo. O índice d indica o grau em que os dados observados são aproximados dos dados simulados e varia entre 0 e 1, com 0 indicando nenhuma concordância e 1 indicando uma concordância

perfeita entre os dados previstos e observados. A Tabela 5 apresenta a classificação dos valores dos índices estatísticos empregados na pesquisa.

Tabela 5. Classificação quanto aos valores dos índices estatísticos utilizados na análise de desempenho do modelo AquaCrop (Raes et al., 2018).

Classificação	Índice				
	^(a) R ²	^(b) RMSE	CV(RMSE)	EF	<i>d</i>
Muito bom	> 0,9	--	≤ 5%	≥ 0,8	≥ 0,9
Bom	0,9 – 0,7	--	6 – 15%	0,6 – 0,79	0,8 – 0,89
Moderadamente bom	0,7 – 0,5	--	16 – 25%	0,4 – 0,59	0,65 – 0,79
Moderadamente ruim	--	--	26 – 35%	0 – 0,39	0,5 – 0,64
Ruim	< 0,5	--	36 – 45%	(-10) – 0	0,25 – 0,49
Muito ruim	--	--	> 46%	< (-10)	< 0,25

^(a)R² = baseado em Chibarabada et al. (2020); ^(b)RMSE = valores de RMSE são expressos na mesma unidade da variável analisada, portanto, para fins gerais, a diferença entre valor observado e simulado (%) foi empregada para uma classificação semelhante à de CV(RMSE).

O desempenho geral do modelo foi considerado bom quando ao menos 3 dos índices estatísticos empregados apresentaram resultados moderadamente bons ou muito bons. Foi calculado as variações percentuais entre os valores observados e simulados de B final e Y a partir da Equação 12. Seguindo o estabelecido por Farahani et al. (2009) e Steduto et al. (2009), variações relativas ≤ 10% foram consideradas precisas, variações ≤ 20% foram consideradas aceitáveis e variações > 20% foram consideradas imprecisas.

$$\text{Variação (\%)} = \left(\frac{100 \times \text{Simulado}}{\text{Observado}} \right) - 100 \quad (12)$$

4. RESULTADOS

4.1. Calibração do modelo AquaCrop

4.1.1. Ajuste dos coeficientes

Para a calibração do modelo Aquacrop, inicialmente foi determinada a temperatura base (T_b) para a contabilização da soma térmica em graus-dia (GD), a

partir dos dados de temperatura ao longo dos ciclos, considerando-se o desvio médio como parâmetro de determinação da T_b (Tabela 6). Dessa forma, a T_b foi ajustada em 12 °C, a qual apresentou o menor desvio médio dentre as temperaturas base testadas, que situaram-se entre 6 °C e 18 °C (variando em 1 °C de unidade) (Figura 16).

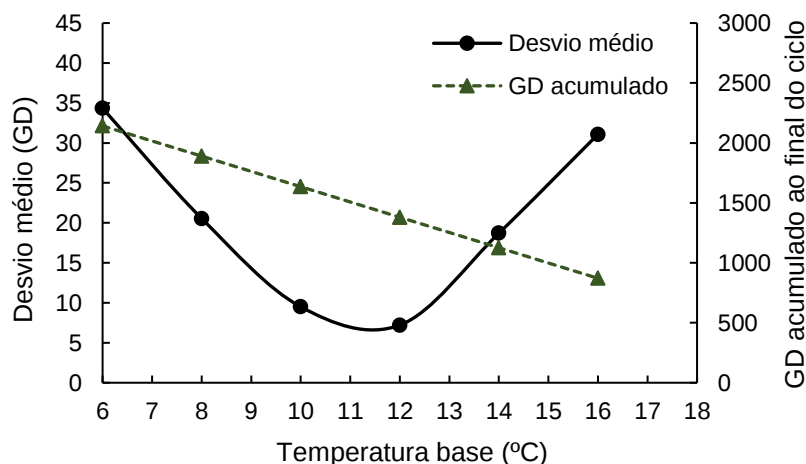


Figura 16. Desvio médio obtido para valores de temperatura base (T_b) e graus-dia (GD) acumulado ao fim do ciclo do amendoimzeiro para os respectivos valores de T_b . Cultivares IAC 505 e IAC 503. Jaboticabal, SP.

Os coeficientes biométricos e fenológicos empregados para a calibração estão apresentados na Tabela 6. Considerando a população de plantas em 222.2 plantas ha^{-1} , ausência de estresses ocasionados por deficiência hídrica, fertilidade do solo não limitante, não considerando efeitos da salinidade, e T_s em 30 °C, o tempo para a emergência das plântulas foi de 91 GD, a taxa de expansão do dossel (CGC) foi de 0,648% GD^{-1} , contabilizando, desde a semeadura 1.042 GD para atingir a cobertura máxima do dossel (CCx), que foi de 87%. A cobertura inicial do dossel (CCo) foi de 2,22%, considerando a área por planta inicial de 10 cm^2 . Aos 1079 GD iniciou-se a fase de senescência do dossel, a uma taxa de declínio (CDC) de -0,789% GD^{-1} . A floração iniciou-se aos 464 GD, com duração de 354 GD, e a maturidade fisiológica ocorreu aos 1.034 GD, resultando no período de formação da produção de 839 GD. A profundidade máxima de raízes de 50 cm foi atingida aos 1042 GD. A taxa de extração de água ao longo do sistema radicular efetivo foi de 40%, 30%, 20% e 10% a cada $\frac{1}{4}$ de profundidade (cm) do sistema radicular.

O coeficiente de cultivo de transpiração máximo ($K_{cTr,x}$) foi estabelecido em 1,05. O $K_{cTr,x}$ é, aproximadamente, equivalente ao coeficiente de cultura basal (K_c) na meia estação para diferentes culturas, conforme apresentado por Allen et al. (1998), entretanto, o modelo AquaCrop contabiliza a proporção entre transpiração e cobertura do dossel. Dessa forma, o $K_{cTr,x}$ equivale ao K_c atingido apenas quando a planta atinge a sua máxima cobertura do dossel, sem sofrer estresses (Raes et al., 2018). Após atingir a CCx, a cultura entra em fase de senescência, reduzindo o seu dossel e, conseqüentemente, sua capacidade de transpiração e produção de biomassa. Para se ajustar a esta condição, a taxa de redução de $K_{cTr,x}$ durante a senescência foi estabelecida em 0,3% dia⁻¹.

Tabela 6. Coeficientes biométricos e fenológicos empregados na calibração das cultivares de amendoim IAC 503 e IAC 505 para o modelo AquaCrop. Jaboticabal, SP.

Coeficiente	Unidade	Valor
Desenvolvimento do dossel*		
População de plantas	Plantas ha ⁻¹	222.200
Área por planta	cm ²	10
Cobertura inicial do dossel (CCo)	%	2,22
Cobertura máxima do dossel (CCx)	%	87
Tempo para a emergência	GD	91
Tempo para CCx	GD	1.042
Taxa de expansão do dossel (CGC)	% GD ⁻¹	0,648
Tempo para a senescência do dossel	GD	1.069
Taxa de declínio do dossel (CDC)	% GD ⁻¹	-0.789
Floração, formação da produção e raízes*		
Tempo para a floração	GD	464
Duração da floração	GD	354
Tempo para formação da produção	GD	839
Tempo para maturidade	GD	1.334
Profundidade efetiva máxima das raízes	m	0,50
Tempo para máxima profundidade de raízes	GD	1042
Evapotranspiração*		

Coeficiente de cultivo de transpiração máximo ($K_{CTr,x}$)	--	1,05
Redução de $K_{CTr,x}$ com a senescência	% dia ⁻¹	0,300
Padrão de extração de água a cada ¼ da profundidade efetiva das raízes	%	40;30;20;10

Produção*

Produtividade da água normalizada (WP*)	g m ⁻²	16
Período de determinação do índice de colheita (HI)	GD	839
WP* ajustada para a formação da produção	% da WP*	95
HI de referência (HIo)	%	60

Estresse hídrico

Expansão do dossel

Tolerante ao estresse hídrico

<i>p</i> superior	--	0,30
<i>p</i> inferior	--	0,80
Fator forma	--	2,5
Ajuste para ETo	mm dia ⁻¹	5

Fechamento estomático

Moderadamente sensível ao estresse hídrico

<i>p</i> superior	--	0,55
Fator forma	--	3
Ajuste para ETo	mm dia ⁻¹	5

Senescência precoce do dossel

Extremamente tolerante ao estresse hídrico

<i>p</i> superior	--	0,80
Fator forma	--	2,5
Ajuste para ETo	mm dia ⁻¹	5

Estresse por aeração

Moderadamente tolerante ao alagamento

Volume remanescente de poros livres de água no solo	%	5
---	---	---

Ajuste do Índice de colheita ao estresse hídrico

Antes da floração

Efeito positivo do estresse hídrico em HI	%	3
---	---	---

Durante a floração – falha na polinização

Moderadamente tolerante ao estresse hídrico

<i>p</i> superior	--	0,88
<i>Durante a formação da produção</i>		
<i>Efeito positivo em HI como resultado do estresse hídrico afetando expansão foliar</i>		
Nenhum	%	0
<i>Efeito negativo em HI como resultado do estresse hídrico induzindo o fechamento estomático</i>		
Muito forte	%	100
Efeito geral no HI	%	10
Estresse térmico		
<i>Desenvolvimento</i>		
Temperatura limite inferior - Tb	°C	12
Temperatura limite superior -Tx	°C	30
<i>Transpiração</i>		
Faixa de redução por frio	°C	0 a 20
<i>Polinização</i>		
Polinização afetada pelo estresse por calor	°C	40 a 45
Polinização afetada pelo estresse por frio	°C	0 a 5

*Sob condições de ausência de déficit hídrico, fertilidade do solo não limitante e sem considerar efeitos da salinidade. GD = Graus-dia; *p* = Limite de depleção de água no solo; HI = Índice de colheita (Harvest index).

A produtividade da água normalizada (WP*) foi de 16 g m⁻², considerando a faixa de valores de WP* de 15 a 20 g m⁻² indicado para culturas C3 pelo próprio modelo. Conforme Raes et al. (2018), WP* expressa a biomassa acima do solo (g ou kg) produzida a cada m² ou ha por mm de água transpirada. O ajuste da WP* para a formação da produção foi determinado em 95%, o que significa uma redução da WP* em 5% durante este período, oriundo do maior gasto energético das plantas para a formação de sementes de alto teor oleico como o amendoim. O índice de colheita de referência (HIo) foi de 60%.

Os coeficientes relacionados à resposta da cultura às condições hídricas do solo são agrupados em cinco seções, as quais: expansão do dossel, fechamento estomático, senescência precoce do dossel, estresse por aeração e índice de colheita. Conforme apresentado na Tabela 6, os coeficientes expansão do dossel foram classificados como “tolerante ao estresse hídrico”, de forma a representar a tolerância

do amendoazeiro a tal stress, com limite superior e inferior de depleção de água no solo (p superior e p inferior), de 0,30 e 0,80, respectivamente, e fator forma (ajuste da curva) em 2,5.

Para o fechamento estomático, a cultivar foi classificada como “moderadamente sensível ao estresse hídrico”, com p superior em 0,55 e fator forma de 3. Para a senescência precoce do dossel, a classificação adotada foi “extremamente tolerante ao estresse hídrico”, com p superior em 0,80 e fator forma de 2,5. A tolerância da cultura ao alagamento (condições de baixa aeração) correspondeu a classificação “moderadamente tolerante ao estresse hídrico”, com volume remanescente de poros livres de água no solo de 5% (a partir do qual o estresse ocorre proporcionalmente a cada diminuição deste volume). Para a expansão do dossel, fechamento estomático e senescência precoce do dossel o ajuste para ETo foi estabilizado em 5 mm dia⁻¹.

O ajuste do índice de colheita ao estresse hídrico engloba efeitos positivos e/ou negativos da ocorrência de estresse hídrico de acordo com o período do desenvolvimento da cultura em que o estresse ocorre, os quais: antes da floração, durante a floração e durante a formação da produção (Raes et al., 2018). Para o período antes da floração, o efeito positivo da ocorrência do estresse hídrico no IC foi de 3%, sendo empregada a classificação “moderadamente tolerante ao estresse hídrico” quanto à ocorrência do estresse hídrico ocorrido durante a floração, com p superior de 0,88. Durante a formação da produção, o efeito positivo no IC como resultado do estresse hídrico afetando a expansão foliar foi tido como “nenhum” (0%), entretanto, o efeito negativo no IC como resultado do estresse hídrico induzindo o fechamento estomático foi classificado como “muito forte” (100%). O incremento máximo de IC pelo efeito geral da ocorrência de estresse hídrico foi de 10%.

O modelo AquaCrop também contabiliza efeitos ocasionados pelo estresse térmico ao longo do desenvolvimento, transpiração e polinização da cultura. As temperaturas correspondentes a T_b e T_s foram previamente descritas. A redução da transpiração ocasionada pelo frio correspondeu a faixa de 0 °C a 20 °C, sendo está a faixa máxima disponibilizada pelo modelo. Para a polinização afetada pelo estresse por calor a faixa correspondente é 40 °C a 45 °C, enquanto que para a polinização afetada pelo estresse por frio a faixa é 0 °C a 5 °C.

4.1.2. Irrigação plena

Utilizando como critério a variação entre valores observados e simulados, foi possível notar que o modelo simulou de forma precisa a maturidade fisiológica (estádio R7) para todos os ciclos, em especial para os ciclos 2018 Fev e 2018 Mar (Tabela 7).

Tabela 7. Variação (Var (%)) entre a fenologia observada (Obs) e simulada (Sim) pelo modelo AquaCrop para a cultura do amendoim, cultivares IAC 503 e IAC 505, sob irrigação plena (L1). Jaboticabal, SP.

Ciclo	Fenologia (DAS)					
	Florescimento			Maturidade fisiológica		
	Obs	Sim	Var (%)	Obs	Sim	Var (%)
2018 Fev	34	38	11,8	117	118	0,9
2018 Mar	36	38	5,6	124	125	0,8
2019	32	39	21,9	126	128	1,6
2020	31	42	35,5	133	140	5,3

DAS = Dias após a semeadura.

Para o período de surgimento da floração (florescimento), foi notada precisão aceitável para o ciclo 2018 Fev e imprecisão para as simulações dos ciclos 2019 e 2020, em que o modelo superestimou o período de surgimento da floração em 21,9% e 35,5%, respectivamente. Vale ressaltar que os valores de ocorrência dos eventos fenológicos simulados na Tabela 7 apresentaram-se iguais para todos os tratamentos em cada ciclo.

Durante a fase de calibração, para as condições de irrigação plena (L1), o modelo AquaCrop simulou a fração de cobertura do dossel (CC) das cultivares de amendoim IAC 505 e IAC 503 de forma precisa, com os índices estatísticos apresentando, para todos os ciclos, classificação “bom” a “muito bom” ($R^2 = 0,92 - 0,98$; RMSE = 9% – 6,2%; CV(RMSE) = 14,9% – 11,3%; EF = 0,84 – 0,92; $d = 0,96 - 0,98$) (Figura 17).

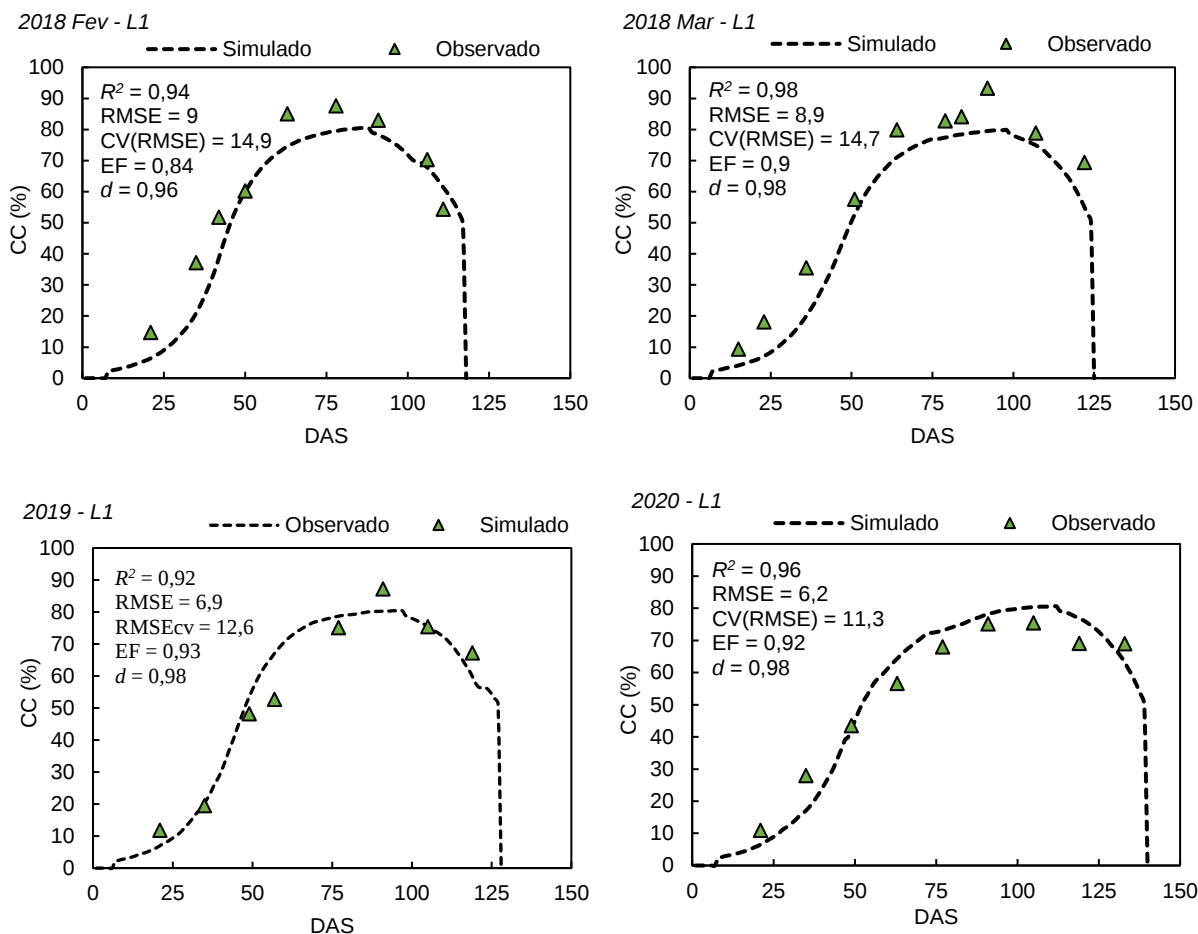


Figura 17. Cobertura do dossel (CC) ao longo do ciclo observada e simulada pelo modelo AquaCrop para o amendoineiro sob irrigação plena (L1) durante a fase de calibração. Cultivar IAC 503. Jaboticabal, SP.

Nas simulações de biomassa da parte aérea ao longo do ciclo (B) na fase da calibração para as condições de irrigação plena (L1) (Figura 18), o modelo apresentou variabilidades no desempenho, com os índices resultando em faixa de classificação “moderadamente bom” a “muito bom” para o ciclo 2019 ($R^2 = 0,92$; $RMSE = 0,6 \text{ Mg ha}^{-1}$; $CV(RMSE) = 19,6\%$; $EF = 0,92$; $d = 0,98$) e classificação “ruim” a “muito bom” para o ciclo 2020 ($R^2 = 0,74$; $RMSE = 0,9 \text{ Mg ha}^{-1}$; $CV(RMSE) = 37,1\%$; $EF = 0,71$; $d = 0,92$). Para o ciclo 2020, o índice $CV(RMSE)$, de classificação “ruim”, demonstra considerável variação entre os valores observado e simulados de B, com esta variação acentuando-se ao final deste ciclo. Como B não foi mensurado ao longo dos ciclos de 2018, não foi possível analisar o desempenho do modelo em simular B para estes ciclos.

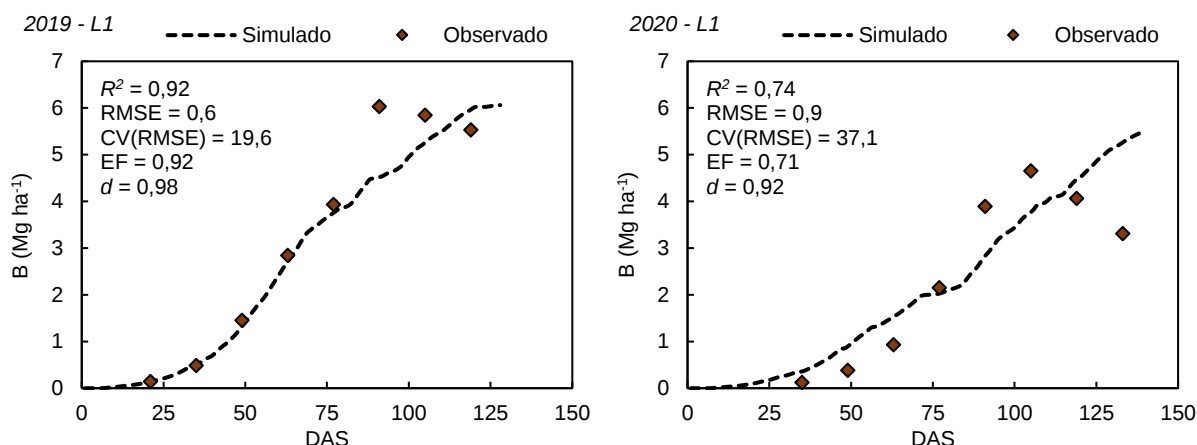


Figura 18. Biomassa da parte aérea ao longo do ciclo (B) observada e simulada pelo modelo AquaCrop para o amendoazeiro sob irrigação plena (L1) durante a fase de calibração. Cultivar IAC 503. Jaboticabal, SP.

Para a produtividade de vagens (PV), B final e IC da fase da calibração para as lâminas L1, as variações entre valores observados e simulados pelo modelo AquaCrop (Tabela 8) apresentaram classificações que variaram entre precisas e imprecisas. Para PV, as simulações foram: precisa no ciclo 2018 Fev, imprecisa no ciclo 2018 Mar, precisa no ciclo 2019 e imprecisa no ciclo 2020. Para a B final a simulação foi precisa para o ciclo 2019 e aceitável para o ciclo 2020, enquanto que para IC, o modelo resultou em simulação precisa no ciclo 2019 e imprecisa no ciclo 2020.

Tabela 8. Variação (Var (%)) entre a produtividade de vagens (PV), biomassa final (BF) e índice de colheita (IC) observado (Obs) e simulado (Sim) pelo modelo AquaCrop para o amendoazeiro, cultivares IAC 505 e IAC 503. Fase de calibração, sob lâmina de irrigação plena (L1). Jaboticabal. SP.

Ciclo	Tratamento	PV (Mg ha ⁻¹)			BF (Mg ha ⁻¹)			IC		
		Obs	Sim	Var (%)	Obs	Sim	Var (%)	Obs	Sim	Var (%)
2018 Fev	L1	4,01	3,98	-1	--	6,62	--	--	0,60	--
2018 Mar		4,98	3,70	-26	--	5,73	--	--	0,62	--
2019		3,72	3,72	0	5,86	6,06	3	0,59	0,61	4
2020		2,60	3,32	28	4,74	5,49	16	0,39	0,60	55

Para as simulações do armazenamento de água no solo (Aa) na camada 0-20 cm na fase de calibração, o modelo AquaCrop não apresentou bom desempenho para o ciclo 2019, com resultando em índices de classificação “ruim” a “moderadamente ruim”, com o valor negativo do índice EF indicando que indicando que a simulação foi

tão precisa quanto a média das leituras de Aa observadas (Figura 19). Para o ciclo 2020, entretanto, o modelo apresentou bom desempenho, possibilitando simulação consideravelmente mais precisa do que o ciclo anterior, com os índices demonstrando classificação “moderadamente bom” a “bom”.

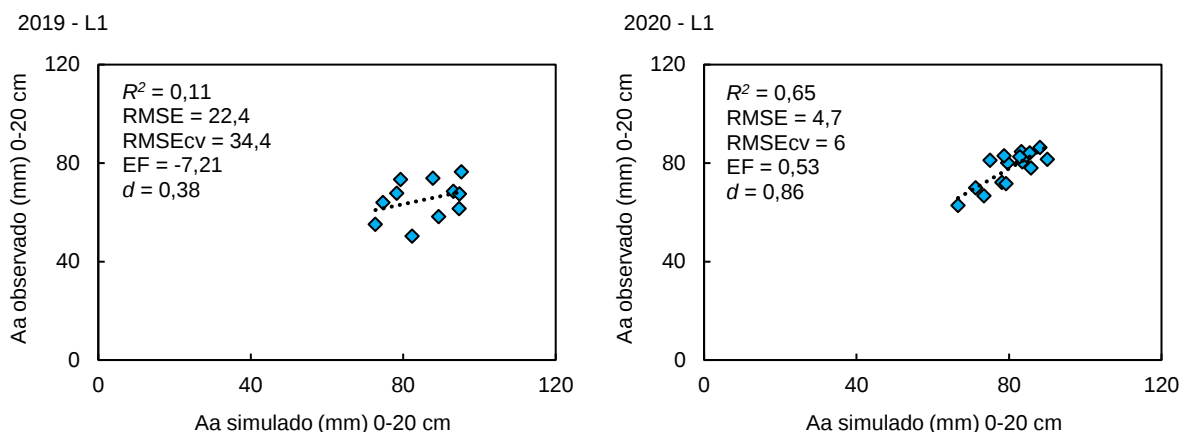


Figura 19. Armazenamento de água no solo (Aa) na camada 0-20 cm de profundidade observado e simulado pelo AquaCrop. Fase de calibração, lâmina plena (L1). Jaboticabal, SP.

4.1.3. Irrigação deficitária

Nas simulações referentes a fase de calibração para as lâminas deficitárias (L3 e L5), o modelo AquaCrop apresentou bom desempenho e precisão para todas as variáveis analisadas. Para CC, as simulações foram classificadas em “moderadamente bom” a “muito bom” ($R^2 = 0,92 - 0,94$; RMSE = 9,4% – 8,8%; CV(RMSE) = 20% – 17,2%; EF = 0,81 – 0,87; $d = 0,96 - 0,97$), conforme demonstrado na Figura 20. Foi notada tendência de superestimativa da CC entre os 50 e 75 DAS para ambos os tratamentos, sendo mais acentuada em L3, onde os dados observados demonstram uma possível redução na taxa de expansão do dossel neste período, a qual não foi simulada pelo modelo.

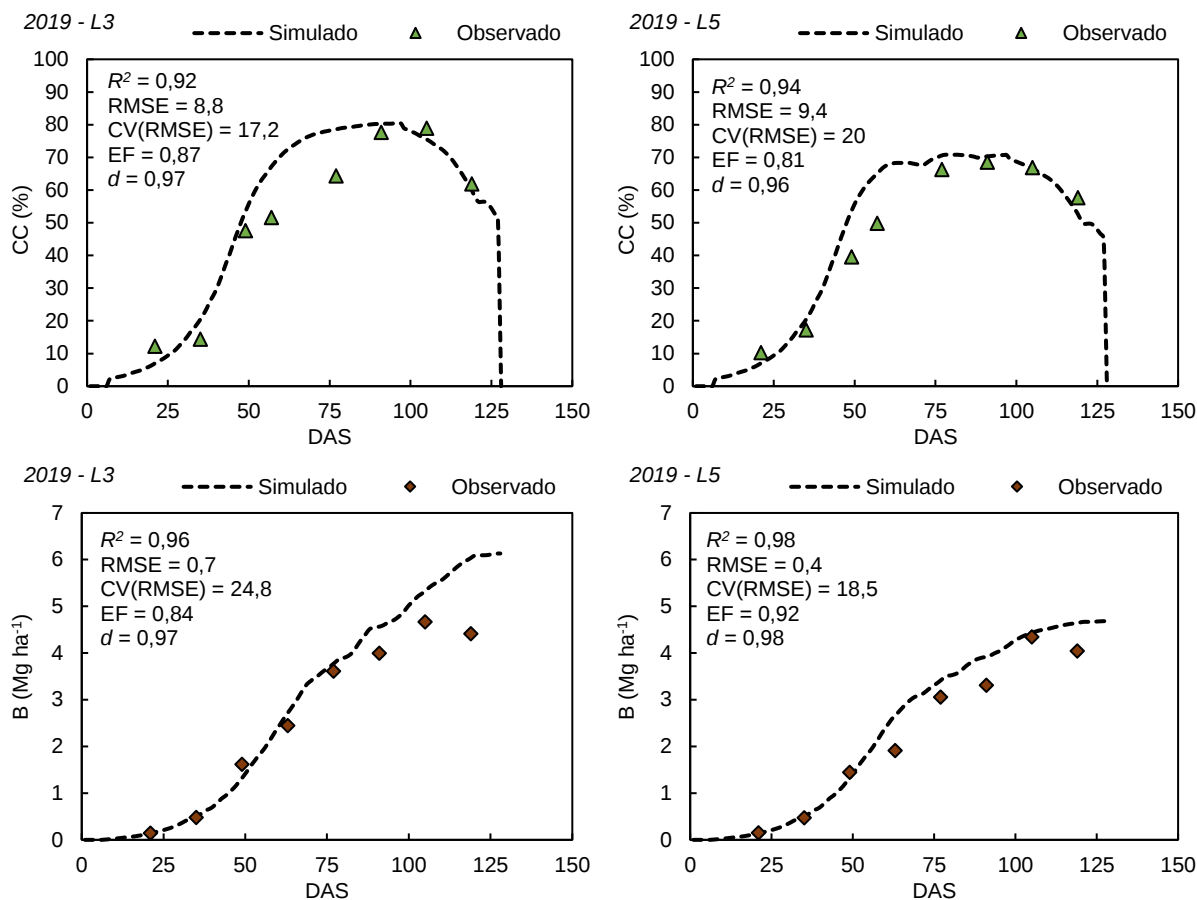


Figura 20. Cobertura do dossel (CC) e biomassa da parte aérea ao longo do ciclo (B) observada e simulada pelo modelo AquaCrop para o amendoazeiro sob lâminas de irrigação deficitárias (L3 e L5) durante a fase de calibração, ciclo 2019 (cultivar IAC 503). Jaboticabal, SP.

Conforme também pode ser notado na Figura 20, para a variável B, os resultados das simulações puderam ser classificados em “moderadamente bom” a “muito bom” ($R^2 = 0,92 - 0,94$; $RMSE = 9,4\% - 8,8\%$; $CV(RMSE) = 20\% - 17,2\%$; $EF = 0,81 - 0,87$; $d = 0,96 - 0,97$). O melhor desempenho foi observado para as condições de L5, em que o modelo não superestimou B de forma acentuada ao final do ciclo à semelhança do que ocorreu nas simulações para L3.

O modelo AquaCrop foi preciso nas simulações de PV e B final para as condições das lâminas deficitárias L3 e L5 (Tabela 9). Destaca-se a boa performance do modelo nesta fase da calibração, em que foi notado diferenças na ordem de 1% a no máximo 13% entre os valores observados e simulados.

Tabela 9. Variação (Var (%)) entre a produtividade de vagens (PV), biomassa final (BF) e índice de colheita (IC) observado (Obs) e simulado (Sim) pelo modelo AquaCrop para o amendoimzeiro. Fase de calibração, lâminas de irrigação deficitárias (L3 e L5), ciclo 2019 (IAC 503). Jaboticabal. SP.

Ciclo	Tratamento	PV (Mg ha ⁻¹)			BF (Mg ha ⁻¹)			IC		
		Obs	Sim	Var (%)	Obs	Sim	Var (%)	Obs	Sim	Var (%)
2019	L3	3,743	3,762	1	6,022	6,131	2	0,60	0,61	2
	L5	2,856	2,483	-13	4,716	4,682	-1	0,58	0,53	-8

O bom desempenho geral do modelo durante as simulações da fase de calibração, tanto para condições de irrigação plena, quanto para condições de irrigação deficitária, indicou que os coeficientes do modelo para as cultivares de amendoimzeiro IAC 505 e IAC 503 foram devidamente calibrados, permitindo o avanço para a fase de teste.

As simulações de armazenamento de água (Aa) para as condições de deficiência hídrica durante a fase de calibração estão apresentadas na Figura 21. O modelo não apresentou bom desempenho para as condições do tratamento L3, com todos os índices estatísticos empregados recebendo a classificação “ruim”. O modelo superestimou o Aa, em média, em 38,4% (CV(RMSE)), com o índice EF, a semelhança do observado para L1 no mesmo ciclo (2019), indicando que os valores gerados nas simulações foram tão precisos quanto a média dos dados de As observados. Um melhor desempenho do modelo foi observado para L5, onde pode ser classificado como bom, resultando em índices de melhor classificação.

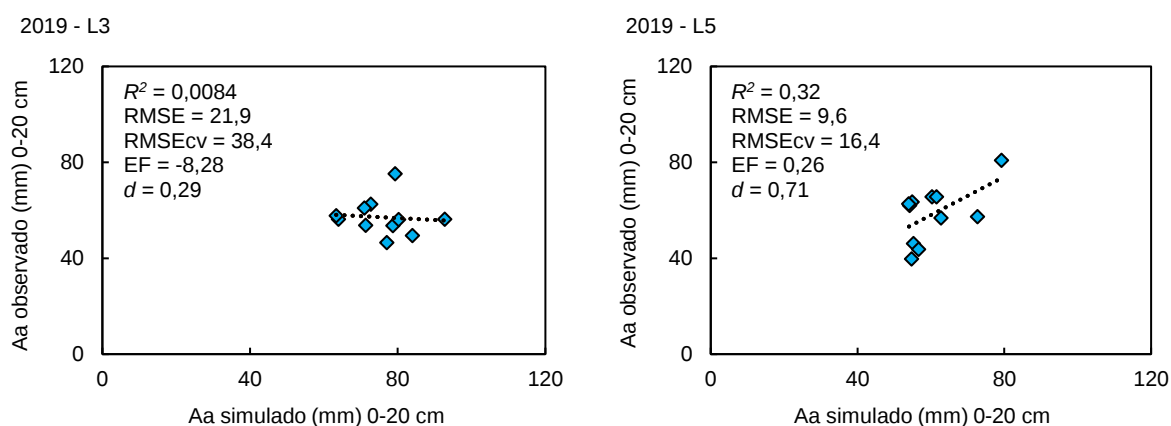
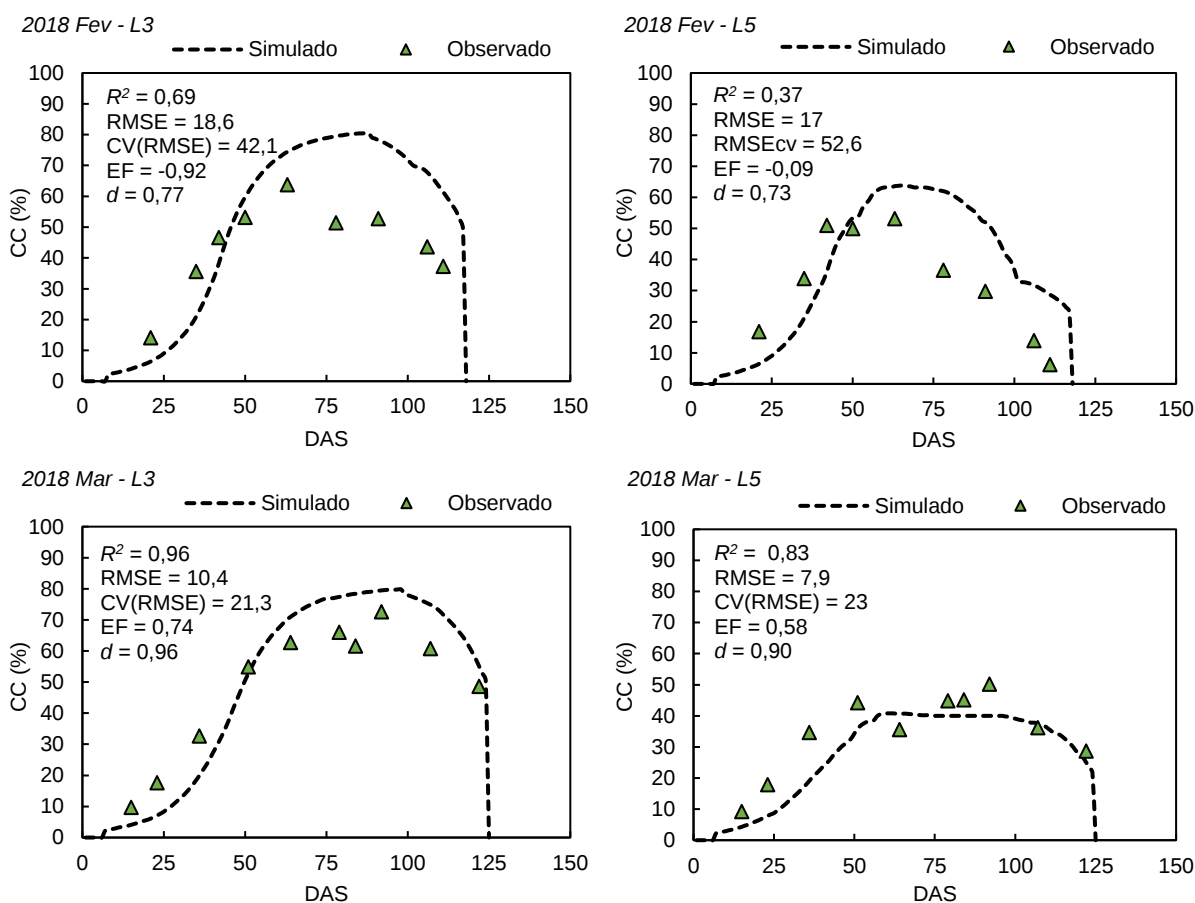


Figura 21. Armazenamento de água no solo (Aa) na camada 0-20 cm de profundidade observado e simulado pelo AquaCrop. Fase de calibração, lâminas de irrigação deficitárias (L3 e L5). Jaboticabal, SP.

4.2. Teste do modelo AquaCrop

Para o ciclo 2018 Fev, o modelo apresentou menor desempenho em simular CC (Figura 22), resultando em simulações de classificação “ruim” pela maioria dos índices ($R^2 = 0,37 - 0,69$; $RMSE = 18,6\% - 17\%$; $CV(RMSE) = 52,6\% - 42,1\%$; $EF = -0,92 - -0,09$; $d = 0,73 - 0,77$). Entretanto, para o ciclo 2018 Mar, o modelo apresentou bom desempenho em simular CC para as condições dos tratamentos L3 e L5 ($R^2 = 0,83 - 0,96$; $RMSE = 10,4\% - 7,9\%$; $CV(RMSE) = 23\% - 21,3\%$; $EF = 0,58 - 0,74$; $d = 0,90 - 0,96$). Para as simulações de CC do ciclo 2020, o modelo AquaCrop apresentou bom desempenho para ambas as condições dos tratamentos L3 e L5, possibilitando a obtenção de valores próximos ao observado, com índices de classificação “bom” a “muito bom” ($R^2 = 0,94$; $RMSE = 10\% - 8,4\%$; $CV(RMSE) = 19,8\% - 17,2\%$; $EF = 0,72 - 0,78$; $d = 0,95 - 0,96$).



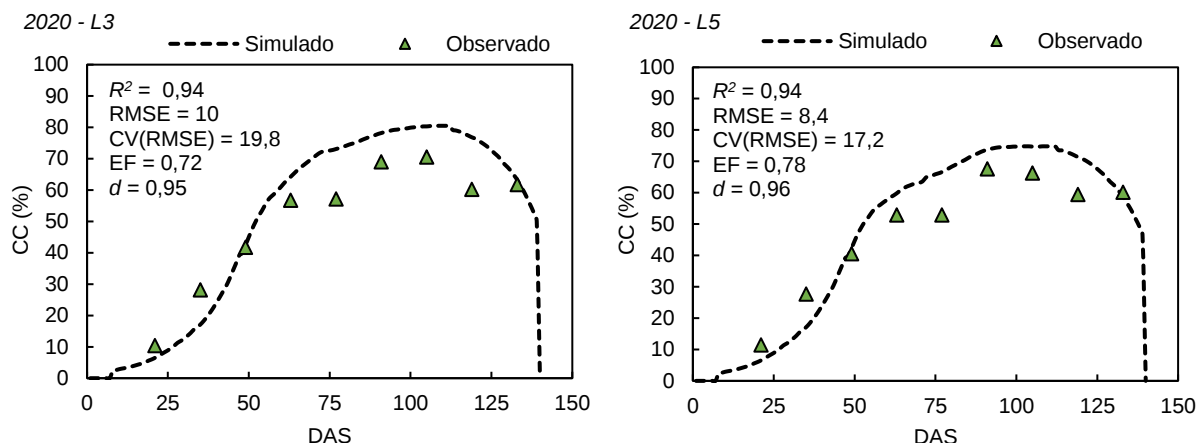


Figura 22. Cobertura do dossel (CC) observada e simulada pelo modelo AquaCrop para o amendoimzeiro sob lâminas de irrigação deficitárias (L3 e L5) durante a fase de teste, cultivares IAC 503 e IAC 505. Jaboticabal, SP.

O modelo apresentou bom desempenho geral nas simulações de biomassa da parte aérea para os tratamentos L3 e L5 (Figura 23). Entretanto, para o tratamento L3, houve superestimação de B ao final do ciclo, o que contribuiu significativamente para o maior valor de RMSE e CV(RMSE) obtidos, de classificação “muito ruim”, com os demais índices, contudo, classificando-se como moderadamente bons a bons ($R^2 = 0,81$; RMSE = 1 Mg ha⁻¹; CV(RMSE) = 49%; EF = 0,44; $d = 0,89$). Para o tratamento L5, o modelo apresentou maior precisão em simular B comparado à L3, com a classificação dos índices sendo “moderadamente bom” a “muito bom” ($R^2 = 0,92$; RMSE = 0,5 Mg ha⁻¹; CV(RMSE) = 22,5%; EF = 0,89; $d = 0,97$).

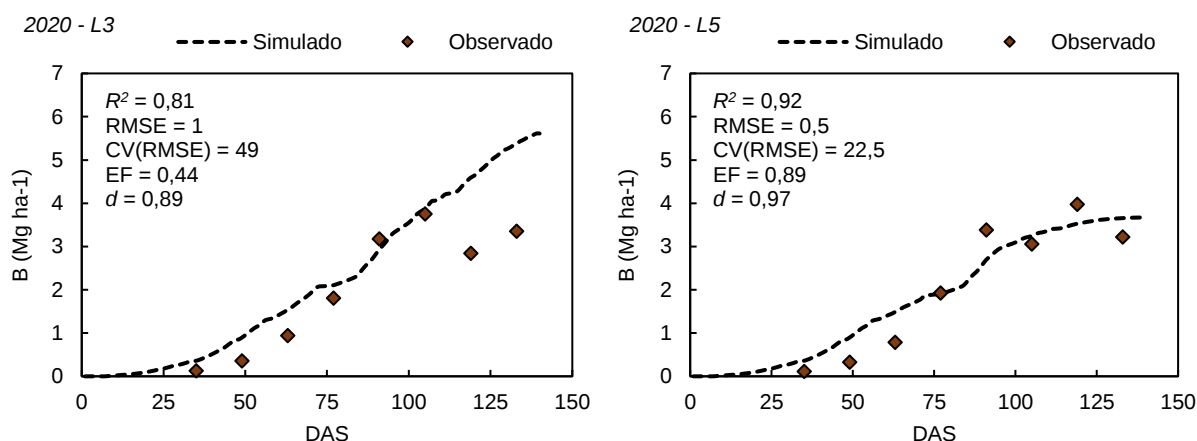


Figura 23. Biomassa da parte aérea ao longo do ciclo (B) observada e simulada pelo modelo AquaCrop para o amendoimzeiro sob lâminas de irrigação deficitárias (L3 e L5) durante a fase de teste, cultivares IAC 503 e IAC 505. Jaboticabal, SP.

Para a variável PV, no ciclo 2018 Fev, o modelo apresentou ampla faixa de variação entre os tratamentos, resultando em simulação precisa para L3 e imprecisa para L5, com variação de 6,97% e -52,09%, respectivamente (Tabela 10). Para o ciclo 2018 Mar, o modelo desempenhou resultado semelhante, contudo, com maior faixa de variação entre as lâminas, simulando PV de forma precisa para L3 (-0,51) e imprecisa para L5 (-70,55), que apresentou a maior variação entre os demais ciclos e tratamentos. No ciclo 2020, o modelo foi impreciso em simular PV para o tratamento L3 e de precisão aceitável para o tratamento L5.

Para as simulações de B final na fase de teste (disponível apenas para o ciclo 2020), o modelo foi impreciso para ambos os tratamentos, L3 e L5, superestimando B final em 42,7% em L3 e subestimando a variável em 23,36% em L5. Por fim, para as simulações do IC, o modelo AquaCrop foi impreciso para L3 e apresentou precisão aceitável para L5 (Tabela 10). A exceção do ciclo 2020, foi notado, durante a fase de teste, para as variáveis apresentadas na Tabela 10, melhor desempenho do modelo nas simulações referentes aos tratamentos de menor estresse hídrico (L3) em relação aos tratamentos de maior estresse hídrico (L5) para o amendoineiro.

Tabela 10. Variação (Var (%)) entre a produtividade de vagens (PV), biomassa final (BF) e índice de colheita (IC) observado (Obs) e simulado (Sim) pelo modelo AquaCrop para o amendoineiro, cultivares IAC 505 e IAC 503. Fase de calibração, lâminas de irrigação deficitárias (L3 e L5). Jaboticabal. SP.

Ciclo	Tratamento	PV (Mg ha ⁻¹)			BF (Mg ha ⁻¹)			IC		
		Obs	Sim	Var (%)	Obs	Sim	Var (%)	Obs	Sim	Var (%)
2018 Fev	L3	3,74	4,00	6,97	--	--	--	--	--	--
	L5	2,32	1,11	-52,09	--	--	--	--	--	--
2018 Mar	L3	3,74	3,72	-0,51	--	--	--	--	--	--
	L5	2,86	0,84	-70,55	--	--	--	--	--	--
2020	L3	2,40	3,39	41,42	4,67	6,67	42,70	0,44	0,60	37,27
	L5	2,05	1,75	-14,88	3,91	3,00	-23,36	0,43	0,48	10,47

Semelhante ao observado para as fases de calibração, o modelo apresentou simulações variabilidades na precisão entre os tratamentos para as simulações de Aa na fase de teste (Figura 24). Para as condições de L3, o modelo não apresentou bom desempenho, com R² baixo, de classificação “ruim”, com o modelo superestimando Aa em 22,4% ao longo do ciclo da cultura (CV(RMSE)), com EF indicando que a média

dos valores observados apresenta precisão equivalente ao modelo. Para as condições de L5, no entanto, o modelo AquaCrop apresentou bom desempenho, com os índices sendo classificados como “moderadamente bom” a “bom”, com alto R^2 e baixo RMSE.

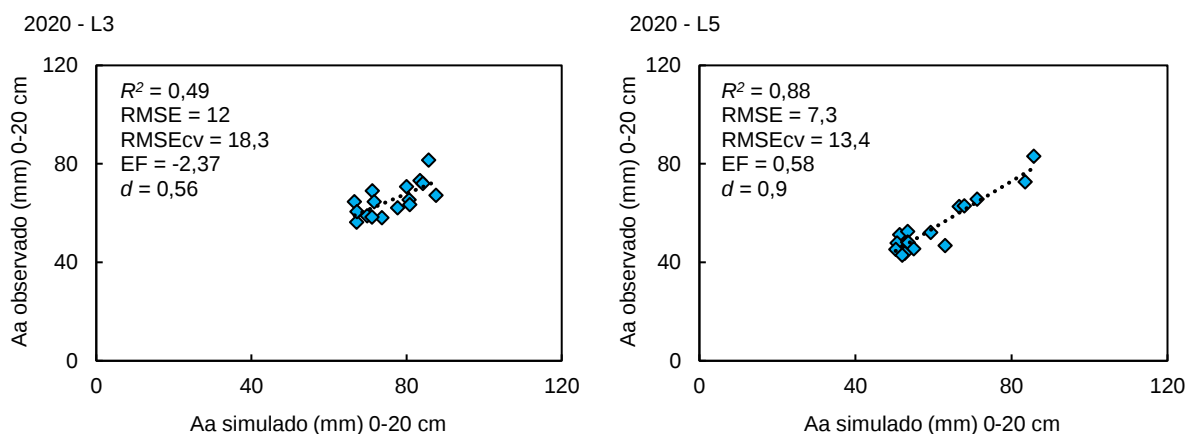


Figura 24. Armazenamento de água no solo (Aa) na camada 0-20 cm de profundidade observado e simulado pelo AquaCrop. Fase de teste (L1). Jaboticabal, SP.

5. DISCUSSÃO

A calibração dos índices apresentada no presente estudo refletem o melhor ajuste alcançado entre os valores observados e simulados para as variáveis analisadas do amendoazeiro (Tabela 6). A parametrização do modelo AquaCrop aplicada à esta pesquisa baseou-se nas características de fenologia, desenvolvimento, produtividade e resposta ao estresse hídrico da cultura do amendoim observadas nos experimentos e presentes na literatura para a cultura (Santos et al., 2009; Nakagawa e Rosolem, 2011; Silva et al., 2019; Khov et al., 2017; Chibarabada et al., 2020).

Conforme citado anteriormente, até o momento a literatura apresenta somente dois trabalhos de divulgação internacional em que o modelo AquaCrop foi analisado para a cultura do amendoim, sendo estes as publicações de Khov et al. (2017) e Chibarabada et al. (2020). Vale destacar que apenas no trabalho de Chibarabada et al. (2020) são apresentados os índices calibrados para a cultura e seus respectivos valores.

Os coeficientes obtidos no presente estudo possuem valor ou classificação semelhante aos calibrados por Chibarabada et al. (2020) (Tabela 11). Para os demais índices, o melhor ajuste do modelo foi obtido a partir do uso de valores e classificações diferentes ao estimado por estes autores. Tal divergência provavelmente é resultado das diferenças genéticas e de manejo aplicadas entre as plantas de amendoim estudadas nestes experimentos, o que reforça a necessidade de calibração diferenciada do modelo AquaCrop para possibilitar simulações mais precisas de cultivares representativas do sistema de produção brasileiro.

Tabela 11. Coeficientes de valor ou classificação semelhantes aos empregados por Chibarabada et al. (2020) na calibração e teste do modelo AquaCrop para a cultura do amendoim.

Coeficiente	Valor ou classificação empregada	
	Nesta pesquisa	Chibarabada et al. (2020)
Tempo para CCx	1.042 GD	1.040 GD
CDC	-0,789% GD ⁻¹	-0,683% GD ⁻¹
WP*	16 g m ⁻²	15 g m ⁻²
Fechamento estomático em resposta ao estresse hídrico	Moderadamente sensível	Moderadamente sensível
Estresse por falta de aeração (alagamento)	Moderadamente tolerante	Moderadamente tolerante

CCx = máxima cobertura do dossel (%); GD = graus-dia; CDC = taxa de declínio do dossel; WP* = produtividade de água normalizada.

Khov et al. (2017), analisando o modelo AquaCrop para o amendoimzeiro sob as condições de área de várzea, obteve melhor ajuste empregando WP* de 13 g m⁻², consideravelmente inferior ao valor de WP* aplicado nesta pesquisa (16 g m⁻²). Entretanto, os autores citam que empregaram uma cultivar de amendoimzeiro desconhecida, estimada como sendo do grupo Valência, que expressou produtividades muito inferiores às observadas aqui pelas cultivares empregadas nos experimentos de 2018, 2019 e 2020 (grupo Virgínia), justificando o maior valor de WP* observado para as condições desta pesquisa. Chibarabada et al. (2020) não informaram a cultivar de amendoimzeiro empregada no estudo, entretanto, o valor de WP* de 15 g cm⁻² empregado por tais autores se assemelha ao utilizado nesta pesquisa (16 g m⁻²). Vale ressaltar que, à semelhança de Khov et al. (2017), a produtividade do amendoimzeiro empregado por Chibarabada et al. (2020) é menor do

que a observada para as cultivares de amendoim empregadas nos experimentos deste trabalho.

O modelo AquaCrop apresentou bom desempenho em simular CC e B ao longo da fase de calibração, com os índices estatísticos classificando-se entre “moderadamente bons” a “muito bons” para praticamente todos os ciclos, com a única exceção sendo os índices RMSE e CV(RMSE) para B no ciclo 2020, tratamento L1, que foram classificados como “ruins”. Estes resultados indicam que a calibração do modelo foi ajustada e precisa. Para a fase de teste, entretanto, foi notado menor desempenho do modelo AquaCrop nas simulações das variáveis em análise para o amendoimzeiro, em especial para os ciclos de 2018. Para o armazenamento de água no solo (Aa), o modelo apresentou dificuldades em manter bom desempenho ao longo das fases de calibração e teste.

No ciclo 2018 Fev, de acordo com França et al. (2018), foi notada alta incidência de mancha-preta, causada pelo fungo *Cercosporidium personatum*, o que resultou em prejuízos ao desenvolvimento da cultura, com a severidade do ataque se intensificando para os tratamentos de maior deficiência hídrica a partir do estágio R6. Segundo Clevenger et al. (2018), a mancha-preta é uma das principais doenças fúngicas responsáveis pelas perdas na produção mundial de amendoim. O modelo AquaCrop não simula efeitos de pragas e doenças ocorrentes às culturas (Steduto et al., 2012). Portanto, as superestimativas de CC ao longo do ciclo 2018 Fev para a fase de teste, em especial para L3 (Figura 22), provavelmente resultam da não quantificação pelo modelo AquaCrop dos efeitos ocasionados pela presença de mancha-preta, uma vez que o modelo não foi elaborado para este propósito. A ocorrência desta praga foi consideravelmente menor no ciclo 2018 Mar, o que possibilitou bom desempenho do modelo em simular CC para este ciclo, pois a cultura não sofreu grandes interferências de eventos os quais o modelo não está apto a simular.

Apesar da boa precisão do modelo AquaCrop em simular PV para as condições de L3 dos ciclos 2018 Fev e 2018 Mar, o modelo foi impreciso em simular PV para L5 em ambos os ciclos (Tabela 10), embora a níveis de precisão aceitáveis em 2019 e 2020. Neste sentido, pesquisadores relataram baixa acurácia do modelo em simular a produtividade das culturas sob condições severas de déficit hídrico (Masasi et al.,

2019; Adeboye et al., 2017; Greaves e Wang, 2016; Zeleke et al., 2011), com o modelo AquaCrop apresentando tendência em subestimar a biomassa das culturas diante de condições de baixo volume hídrico aplicado.

Ahmadi et al. (2015) observaram que o modelo subestimou a produção de biomassa do milho sob condições de estresse hídrico moderado a severo. Karunaratne et al. (2011), ao avaliarem o modelo AquaCrop para diferentes espécies de feijão bambara submetidas à irrigação completa e deficitária, observaram que o modelo subestimou a biomassa nos tratamentos com baixa umidade do solo. Os autores indicaram em seu trabalho que o coeficiente de estresse hídrico do modelo é muito severo. Hsiao et al. (2009) citaram os possíveis motivos de subestimativa do acúmulo de biomassa, que pode ser resultado de WP^* muito baixo, transpiração (Tr) subestimada ou uma superestimação do fechamento dos estômatos por estresse hídrico.

Conforme anteriormente citado, o valor de WP^* adotado nesta calibração chega a ser superior ao adotado para a cultura em estudos anteriores (vide Khov et al., 2017 e Chibarabada et al., 2020), e apesar do fechamento estomático ter sido adotado como “moderadamente sensível ao estresse hídrico” (Tabela 6), durante a fase de calibração para condições de deficiência hídrica, o índice não implicou em grandes alterações nos resultados das simulações (baixa sensibilidade), resultando em menor precisão do modelo para valores maiores. De acordo com Steduto (2012), Tr é um parâmetro conservativo, sendo quantificado a partir de $K_{cTr,x}$. Nesta pesquisa, o valor de $K_{cTr,x}$ adotado possibilitou os melhores resultados para a produção de biomassa nas condições de ausência de déficit hídrico na fase de calibração.

Chibarabada et al. (2020) observaram que o AquaCrop superestimou ET_c a partir de elevados valores de Tr , o que ocasionou em subestimação da cobertura do dossel nos cenários simulados. Os autores concluíram que há a necessidade de melhorar o coeficiente de transpiração da cultura ($K_{cTr,x}$) no modelo AquaCrop. Nesta pesquisa, a Tr não foi mensurada ao longo dos experimentos, portanto, não foi possível avaliar o desempenho do modelo em simulá-la e determinar se havia super ou subestimação de seus valores.

Os valores de produtividade e acúmulo de biomassa observados em campo nos ciclos de 2018 refletem a capacidade do amendoazeiro em tolerar às condições

de seca. Tal tolerância é amplamente difundida na literatura, tendo como principais causas a capacidade do amendoim em manter um sistema radicular viável e profundo durante condições de déficit hídrico (Abou Kheira, 2009), bem como a regulação das taxas de transpiração e abertura estomática realizadas pela cultura diante de tais condições (Reddy et al., 2003).

O baixo desempenho do modelo nas simulações de Aa durante a fase de calibração para o ciclo 2019 (todos os tratamentos), em contraste com os resultados das simulações de Aa para 2020, não afetaram negativamente o desempenho do modelo nas simulações dos demais componentes avaliados para 2019. Para a fase de teste, o modelo apresentou melhor desempenho, com valores RMSE de 12 mm e 7,3 mm, respectivamente, para L3 e L5 (ciclo 2020). Tanto para fase de calibração, quanto para fase de teste, as simulações apresentaram tendência de superestimação.

Masasi et al. (2019) avaliando o modelo AquaCrop para o sorgo sob diferentes regimes de irrigação nas condições das planícies altas do Centro e do Sul do Texas (EUA), observaram que o modelo simulou Aa em diferentes níveis de precisão, apresentando valores de super ou subestimação, desempenhando melhor para condições de solo com menor teor de umidade; situação semelhante à observada nesta pesquisa. Uma das causas de superestimação de Aa pelo modelo advém da suposição simplificada adotada em AquaCrop de que a drenagem é zero quando Aa é igual ou abaixo da umidade de capacidade de campo do solo, conforme relatam Raes et al. (2009) e Hsiao et al. (2009).

Hsiao et al. (2009), em estudo de calibração e teste do modelo AquaCrop para o milho submetido a níveis de irrigação, na região de Davis, Califórnia, EUA, citaram como uma das possíveis causas para explicar as discrepâncias entre valores observados e simulados de teor de água no solo, as variações espaciais das características físico-hídricas do solo na região de estudo, uma vez que os autores adotaram o mesmo conjunto de características de água no solo em todas as simulações. Tal condição também pode explicar os resultados obtidos nesta pesquisa, em que, conforme demonstrado na Tabela 4, também foi aplicado em todas as simulações o mesmo conjunto de características de água no solo, disponibilizado pelo banco de dados empregado.

O AquaCrop é um modelo “movido a água”, e o desempenho da simulação da produtividade e biomassa depende da simulação precisa da absorção de água pelas raízes, com o modelo não levando em conta condições específicas das raízes nas versões atuais (Ahmadi et al., 2015). Ainda de acordo com os autores, é sugerido que as próximas versões do AquaCrop sejam aprimoradas pela inclusão de informações de calibração sobre o padrão de crescimento da raiz no solo.

As simulações de CC, B e B final para o ciclo 2020, tanto na fase de teste (ausência de estresse hídrico), quanto na fase de calibração (presença de estresse hídrico) demonstraram boa precisão do modelo. Entretanto, para PV, o modelo foi impreciso para L3 (superestimação) e apresentou precisão aceitável para L5, sendo este o único ciclo em que as simulações para L5 foram de melhor precisão do que para L3. Para o ciclo 2020, as menores taxas de acúmulo de biomassa e produtividade do amendoimzeiro observada em campo em relação aos demais ciclos, muito provavelmente está relacionada às baixas temperaturas que ocorreram ao longo do cultivo para este ano.

A Figura 12 evidencia a ocorrência de um ciclo mais prolongado em 2020, resultado das baixas temperaturas em estádios sensíveis à formação da produção da cultura, correspondentes a R2 e R3, em que ocorrem, respectivamente, a formação do ginóforo e início da formação das vagens. Conforme relata Mortley et al. (2004), o amendoimzeiro é sensível às baixas temperaturas, podendo ocorrer inibição da floração e da produção de ginóforos entre os 16 °C e 20 °C, justificando a faixa de redução da transpiração por frio adotada na calibração (Tabela 6). O frio também ocasiona inibição do crescimento como resultado da desaceleração das atividades metabólicas da planta, especialmente para a assimilação de carbono (Bagnall et al., 1988), o que consequentemente pode ter diminuído a taxa de expansão do dossel, produção de biomassa e produtividade da cultura no ciclo 2020. Condição semelhante foi observado por Khov et al. (2017), que relataram a incidência de baixas temperaturas do ar (em torno de 10 °C) durante a floração do amendoimzeiro, o que prejudicou a floração e desenvolvimento da cultura, reduzindo os níveis de produtividade.

De acordo com anunciado por Bueno (2020), o ano de 2020 foi reconhecido oficialmente pela Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (sigla em inglês: NOAA) e pela Agência Australiana Bureau de Meteorologia (sigla em

inglês: BOM) como ano de ocorrência de La Niña, um fenômeno meteorológico que resulta, no Brasil, em menor incidência de chuvas na região Sul e em volume de chuvas acima da média na região Norte, bem como contribui para a queda das temperaturas do ar no Sudeste e região Central do país. Desta forma, as temperaturas mais amenas observadas em 2020 muito provavelmente resultam dos efeitos do La Niña na região.

Os efeitos negativos causados por baixas temperatura são considerados a partir de duas abordagens no modelo AquaCrop. A primeira diz respeito à fenologia da cultura ao considerar o tempo térmico em graus-dia, dessa forma, poderão haver atrasos quanto ao tempo normalmente necessário pela cultura para a expansão/declínio do dossel e ocorrência dos estádios fenológicos; florescimento e maturação fisiológica. A segunda maneira é pela quantificação direta dos efeitos do frio ao ser empregado um coeficiente de estresse pelo frio (K_{sb}), que varia de 0 (limite inferior, estresse total) a 1 (limite superior, ausência de estresse), afetando diretamente a produção diária de B, bem como PV ao afetar a polinização (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009). Os efeitos da primeira abordagem resultaram nos atrasos da floração apresentados na Tabela 7 para os ciclos 2019 e 2020, em especial para 2020, apesar de ter superestimado o período para a cultura, resultando em simulações imprecisas.

Apesar do estresse por baixas temperaturas ser levado em consideração no modelo, a estratégia adotada demonstrou não ser suficientemente sensível em simular os efeitos negativos que as baixas temperaturas causaram ao amendoazeiro no ciclo 2020, o que resultou em superestimação B final e PV.

Outro ponto que merece destaque diz respeito ao ajuste do índice de colheita realizado pelo modelo. Conforme relata Raes et al. (2009) e Steduto et al. (2009), o índice de colheita é ajustado quase que exclusivamente pelo estresse hídrico, com o efeito da temperatura o influenciando apenas na falha de polinização causada por altos ou baixos valores, que reduzem o número de flores e, conseqüentemente, o número de frutos. Dessa forma, a abordagem acaba por não captar os efeitos negativos que as baixas temperaturas ocasionam na cultura quando ocorrem em outros estádios que não a floração. Portanto, o bom desempenho do modelo para o ciclo 2020 em simular CC, contrastando com os valores superestimados de B final,

PV e IC, apesar da boa concordância para com os valores de B, indicam que provavelmente o modelo não conseguiu se ajustar à dinâmica de acúmulo de biomassa da cultura diante da ocorrência de estresse por frio.

A possível solução para que o modelo AquaCrop capte com maior precisão os efeitos das baixas temperaturas na planta seria a implementação de opções de calibração para o estresse por baixas temperaturas semelhantes às opções presentes para o estresse hídrico, possibilitando o estabelecimento de limites superiores e inferiores de temperatura quanto ao fechamento estomático e expansão do dossel, bem como o ajuste de IC para o estresse térmico à semelhança dos ajustes disponíveis para o estresse hídrico, o que poderá ser incluso em novas versões do modelo, que é constantemente atualizado.

De forma geral, o modelo AquaCrop apresentou desempenho promissor em simular o desenvolvimento e produtividade do amendoimzeiro, cultivares IAC 505 e IAC 503 nas condições apresentadas nesta pesquisa. Vale ressaltar que modelos como o AquaCrop são uma representação matemática simplificada de processos de natureza complexa, e que as equações, inevitavelmente, resultaram eventualmente em obtenção de simulações de menor precisão da realidade.

Os resultados observados nesta pesquisa indicam o potencial do emprego do modelo AquaCrop em estudos de viabilidade/zoneamento e elaboração de estratégias de manejo de irrigação para a cultura do amendoim nas condições do sistema produtivo brasileiro. Entretanto, novas pesquisas deverão ser realizadas, avaliando o modelo para outras cultivares, diferentes localidades e épocas de cultivo, a fim de contribuir para o desenvolvimento e plena utilização do modelo AquaCrop para a cultura do amendoim.

6. CONCLUSÕES

A calibração do modelo AquaCrop possibilitou simulações precisas de tempo para a maturidade fisiológica, fração de cobertura do dossel, biomassa da parte aérea ao longo do ciclo e biomassa final do amendoimzeiro, entretanto, o modelo apresentou menor desempenho em simular a produtividade de vagens e índice de colheita da cultura mediante condições de alta deficiência hídrica e ocorrência de praga. O

modelo apresentou menor acurácia nas simulações de armazenamento de água no solo.

A alta incidência de mancha-preta no ciclo 2018 Fev resultou em menor precisão nas simulações da fração de cobertura do dossel, uma vez que o modelo AquaCrop não foi projetado para simular o efeito do ataque de pragas e doenças.

Para os ciclos de 2018, o modelo AquaCrop apresentou simulações imprecisas da fração de cobertura do dossel e produtividade de vagens ao superestimar os efeitos da ocorrência de deficiência hídrica no amendoineiro, embora as simulações na fase de calibração tenham resultado em bom desempenho para tais condições.

O modelo AquaCrop apresentou menor desempenho nas simulações de tempo para a floração, produtividade de vagens e índice de colheita no ciclo 2020, em que foram observadas quedas acentuadas de temperatura no período de florescimento do amendoineiro no campo, afetando o desenvolvimento e produtividade da cultura, evidenciando que os mecanismos adotados pelo modelo para simular estresse por baixas temperaturas não possibilitaram bom ajuste para as condições experimentais desta pesquisa.

O modelo AquaCrop apresentou bom potencial em simular o desenvolvimento e produtividade da cultura do amendoim, especialmente para condições de suprimento hídrico adequado. Novas pesquisas deverão ser realizadas a fim de avaliar o modelo para diferentes cultivares/variedades de amendoineiro, bem como para outras épocas, regiões e condições de manejo representativas do sistema de produção nacional da cultura do amendoim.

REFERÊNCIAS

Adams JE, Arkin GFJ, Ritchie T (1976) Influence of row spacing and straw mulch on first stage drying. **Soil Science Society of America Journal** 40: 436-442. Doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000030035x>

Ambrosano EJ, Tanaka RT, Mascarenhas HAA, Raij BV, Quaggio JA, Cantarela H (1997) Leguminosas e oleaginosas. In.: Raij BV, Cantarela H, Quaggio JÁ, Furlani AMC (Eds.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação IAC, p. 189-202.

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56**. Roma: FAO, 300p.

Ahmadi SH, Mosallaeepour E, Kamgar-Haghighi AA, Sepaskhah AR (2015) Modeling maize yield and soil water content with aquacrop under full and deficit irrigation managements. **Water Resources Management** 29: 2837-2853. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0973-3>

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22:711-728. Doi: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Adeboye OB, Schultz B, Adekalu KO, Prasad K (2017) Modelling of response of the growth and yield of soybean to full and deficit irrigation by using AquaCrop. **Irrigation and Drainage** 66:192-205. Doi: <https://doi.org/10.1002/ird.2073>

Azevedo BM, Sousa GG, Paiva TFP, Mesquita JBR, Viana TVA (2014) Manejo da irrigação na cultura do amendoim. **Magistra** 26:11-18.

Ahmad A (1999) Yield response of groundnut grown under rainfed and irrigated conditions. In.: Kirda C, Moutonnet P, Hera C, Nielsen DR (Eds.) **Crop Yield Response to Deficit Irrigation**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 128-135.

Abou Kheira AA (2009) Macromanagement of deficit-irrigated peanut with sprinkler irrigation. **Agricultural Water Management** 92:1409-1420. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.05.002>

Boote KJ (1982) Growth stages of peanut (*Arachis hypogaea* L.). **Peanut Science** 9:35-40. Doi: <https://doi.org/10.3146/i0095-3679-9-1-11>

Bagnall DJ, King RW, Farquhar GD (1988) Temperature-dependent feedback inhibition of photosynthesis in peanut. **Planta** 175:348-354. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF00396340>

Baldwin JA, Harrison KA (1996) Determining water use in peanut production. **Irrigation Journal** 46:18-21.

Brilli L, et al. (2017) Review and analysis of strengths and weaknesses of agro-ecosystem models for simulating C and N fluxes. **Science of the Total Environment**. 598:445-470. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.208>

BRASIL. Lei nº 16.640, de 05 de janeiro de 2018. Declara o município de Jaboticabal "Capital do Amendoim" no estado.

Bueno P (2020) **2020 é oficialmente um ano de La Niña**. Meteored. Disponível em: <2020 é oficialmente um ano de La Niña (tempo.com)>. Acesso em 23 fev. 2022.

Bertino AMP (2021) **Irrigação deficitária na cultura do amendoim – avaliando nutrição e produção agrônômica na segunda safra**. Tese (doutorado em Agronomia (Ciência do Solo)) – Unesp, Jaboticabal.

Conagin CHTM (1955) Morfologia da flor e formação do fruto no amendoim cultivado (*Arachis hypogaea*, L.). **Bragantia** 14:259-266. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051955000100024>

Coelho AP, Faria RT, Dalri AB (2017) Ecofisiologia e irrigação do amendoim cultivado na segunda safra. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science** 10:119-126. Doi: <https://doi.org/10.5935/PAeT.V10.N2.13>

Costa MS, Mantovani EC, Jesus FLF, Sanches AC, Silva JLB, Santos JEO (2021) Uso do software AquaCrop para simular a resposta do feijão à diferentes regimes de irrigação. *Irriga* 1:557-572. Doi: <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v1n3p557-572>

Carrega WC (2017) **Deficiência hídrica em genótipos de amendoim**. 107 f. Tese (Doutorado em Agronomia (Produção Vegetal)) – Unesp. Jaboticabal.

Clevenger J, Chu Y, Chavarro C, Botton S, Culbreath A, Isleib TG, Holbrook CC, Ozias-Akins P (2018) Mapping late leaf spot resistance in peanut (*Arachis hypogaea*) using QTL-seq reveals markers for marker-assisted selection. **Frontiers in plant Science** 9:1-10. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00083>

Carrega WC (2019) Introdução. In.: **AREA A cultura do amendoim e seus reflexos econômicos, sociais e técnicos**. Jaboticabal: AREA, p. 11-12.

Chibarabada TP, Modi AT, Mabhaudhi T (2017) Expounding the value of grain legumes in the Semi- and Arid tropics. *Sustainability* 9:60. Doi: <https://doi.org/10.3390/su9010060>

CONAB (2018) Acompanhamento da safra brasileira de grãos – Safra 2017/18 – Décimo primeiro levantamento. CONAB v. 5. n. 11.

Chibarabada TP, Modi AT, Mabhaudhi T (2020) Calibration and evaluation of aquacrop for groundnut (*Arachis hypogaea*) under water deficit conditions. **Agricultural and Forest Meteorology** 281:107850. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107850>

Cruz RIF, Silva GF, Silva MM, Silva AHS, Júnior JAS, Silva EFF (2021) Productivity of irrigated peanut plants under pulse and continuous dripping irrigation with brackish water. **Revista Caatinga** 34:208-218. Doi: <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n121rc>

Campbell Scientific, Inc. Product Manual: HS2 and HS2P (HydroSense II) 2011–2020. Online: <https://s.campbellsci.com/documents/au/manuals/hs2.pdf>

Doorenbos J, Kassam AH (1979) **Yield response to water - FAO irrigation and drainage paper 33**. Roma: FAO, 193p.

Er-Raki S, Bouras E, Rodriguez JC, Watts CJ, Lizarraga-Celaya C, Chehbouni A (2021). Parameterization of the AquaCrop model for simulating table grapes growth and water productivity in an arid region of Mexico. **Agricultural Water Management** 245:106585. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106585>

Farahani HJ, Izzi G, Oweis TY (2009) Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal* 101:469–476. Doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0182s>

França PNO, Carrega WC, Faria RT, Coelho AP (2018) Incidência de *Cercosporidium personatum* em amendoim submetido a irrigação plena e deficitária. In: XV ENCONTRO SOBRE A CULTURA DO AMENDOIM. **Anais eletrônicos...** Campinas, 2018. Disponível em: <<https://proceedings.science/encontro-amendoim-2018/papers/incidencia-de-cercosporidium-personatum-em-amendoim-submetido-a-irrigacao-plena-e-deficitaria>>. Acesso em: 25 jan. 2022. Doi: <https://doi.org/10.17648/amendoim-2018-93820>

França PNO, Faria RTF, Carrega WC, Coelho AP, Godoy IJ, Palaretti LF (2021) Peanut (*Arachis hypogaea* L.) yield under irrigation levels in off-season cultivation. **Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias** 52:1-13. Doi: <https://doi.org/10.48162/rev.39.006>

FAOSTAT (2022) Crops and livestock products. Roma: FAO. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> Aceso em: 27 jan. 2022.

Gregory WC, Krapovickas A, Gregory MP (1980) Struture, variation, evolution and classification in *Arachis*. In.: Summerfield RJ, Bunting AH (Eds.) **Advances in Legume Science**. Richmond: Royal Botanic Gardens, Kew, p. 469-481.

García-Vila M, Fereres E (2012) Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. **European Journal Agronomy** 36:21-31. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.08.003>

Godoy IJ, Moraes SA, Zanotto MD, Santos RC (2005) Melhoramento do Amendoim. In: Borém A (Ed. Org.) **Melhoramento de Plantas: Culturas Agrônômicas**. Viçosa: UFV.

Godoy IJ, Moraes ARA, Santos JF, Michelotto MD, Bolonhezi D, Freitas RS, Cavichioli JC, Carvalho CRL, Martins ALM (2018) Cultivares de amendoim alto oleicos: uma inovação para o mercado produtor e consumidor brasileiros. **O agrônomo**. Disponível em: <<http://oagronomico.iac.sp.gov.br/?p=1148>>. Acesso em 27 jan. 2022.

Greaves GE, Wang Y (2016) Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. **Water** 8:557. Doi: <https://doi.org/10.3390/w8120557>

Hsiao TC, Heng L, Steduto P, Rojas-Lara B, Raes D, Fereres E (2009). AquaCrop- The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal** 101:448-459. Doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>

IBGE (2022) Sistema IBGE de recuperação automática. IBGE. Disponível em: <<https://sistema.bibliotecas-bdigital.fgv.br/bases/sidra-sistema-ibge-de-recuperacao-automatica>>. Acesso em: 26 jan. 2022.

Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA, Wilkens PW, Singh U, Gijsman AJ, Ritchie JT (2003). The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy** 18:235–265. Doi: [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)

Leong SK, Ong CK (1983) The Influence of Temperature and Soil Water Deficit on the Development and Morphology of Groundnut (*Arachis hypogaea* L.). **Journal of Experimental Botany** 34:1551-1561. Doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/34.11.1551>

Lopes AS (2006) **Manejo do solo e da irrigação na cultura do feijoeiro sob pivô central**. 141 f. Tese (Doutorado em Agronomia(Produção Vegetal)) – Unesp.

Li F, Yu D, Zhao Y (2019) Irrigation scheduling optimization for cotton based on the AquaCrop model. **Water Resources Management** 33:39-55. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2087-1>

Ketring DL (1991) Physiology of oil seeds: IX. Effects of water deficit on peanut seed quality. **Crop Science** 31:459-463. Doi: <https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100020047x>

Krapovickas A, Gregory WC (2007) Taxonomia del genero *Arachis* (Leguminosae). **Bonplandia** 16:1-205.

Karunaratne AS, Azam-Ali SN, Izzi G, Steduto P (2011) Calibration and validation of FAO-AquaCrop model for irrigated and water deficient bambara groundnut. **Experimental Agriculture** 47:509-527. Doi: <https://doi.org/10.1017/S0014479711000111>

Khov S, Vote C, Hornbuckle J, Inthavong I, Oeurng C, Sengxua P, Sihathap V, Song L, Eberbach P (2017) Calibration and validation of AquaCrop for irrigated peanut (*Arachis hypogaea*) in lowland rice systems of southern Laos. In.: 22nd INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION. **Anais eletrônicos...** Hobart: Australian Society for Operations Research, p. 223-229. Disponível em: <https://researchoutput.csu.edu.au/ws/portalfiles/portal/22455965/21034780_publish_ed_paper.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2022.

Kale Celik S, Madenoglu S, Sonmez B (2018) Evaluating AquaCrop model for winter wheat under various irrigation conditions in Turkey. **Journal of Agricultural Sciences** 24:205-217. Doi: <https://doi.org/10.15832/ankutbd.446438>

Mortley DG, Bonsi CK, Hill WA, Morris CE (2004) Temperature influences yield, reproductive growth, harvest index, and oil content of hydroponically grown 'Georgia red' peanut plants. **HortScience** 39:975-978.

Masasi B, Taghvaeian S, Gowda PH, Warren J, Marek G (2019) Simulating soil water content, evapotranspiration, and yield of variably irrigated grain sorghum using AquaCrop. **Journal of the American Water Resources Association** 55:976-993. Doi: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12757>

Ong CK (1984) The influence of temperature and water deficits on the partitioning of dry matter in groundnut (*Arachis hypogaea* L.). **Journal of Experimental Botanic** 35:746–755. Doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/35.5.746>

Reddy TY, Reddy VR, Anbumozhi V (2003) Physiological responses of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) to drought stress and its amelioration: a critical review. **Plant Growth Regulation** 41:75-88. Doi: <https://doi.org/10.1023/A:1027353430164>

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E (2009) AquaCrop: The FAO crop model to simulate yield response to water. II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal** 101:438-447. Doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E (2018) Reference Manual: Chapter 2 – AquaCrop, Version 6.0 – 6.1. Roma: FAO. Disponível em: <<https://www.fao.org/documents/card/en/c/BR267E>>. Acesso em: 15 out. 2021.

Sholar J, Mazingo RW, Beasley JPJ (1995) Peanut Cultural Practices. In.: Pattee HE, Stalker HT (Eds.) **Advances in Peanut Science**. American Peanut Research and Education Society Inc. p. 354-382.

Silva LC (1997) **Respostas ecofisiológicas e desempenho agrônômico do amendoim cv. BR1 submetido a diferentes lâminas e intervalos de irrigação**. 127 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande.

Steduto P, Hsiao TC, Fereres E (2007) On the conservative behaviour of biomass water productivity. **Irrigation Science** 25:189–207. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0064-1>

Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E (2009) AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal** 101:426-437. Doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>

Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D (2012) Crop yield response to water - FAO Irrigation and Drainage Paper 66. Roma: Fao. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/i2800e/i2800e00.htm>>. Acesso em: 17 nov. 2021.

Soil Survey Staff (2014) Keys to soil taxonomy. Washington DC: USDA-Natural Resources Conservation Service, 372p.

Silva VPR, Silva RA, Maciel GF, Braga CC, Júnior JLCS, Souza EP, Almeida RSR, Silva MT, Holanda RM (2018) Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. **Ciência Rural** 48: e20161118. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20161118>

Silva RP, Santos AF, Carrega WC (Eds.) (2019) Avanços na produção de amendoim. Jaboticabal: Funep, 214p.

Santos RC, Freire RMM, Suassuna TMF (Eds.) (2009) Amendoim: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: EMBRAPA, 240p.

SNA (2017) SP produz 90% da safra de amendoim estimada em 433 mil toneladas. Disponível em: <<https://www.sna.agr.br/sp-produz-90-da-safra-de-amendoim-estimada-em-433-mil-toneladas/>>. Acesso em: 21 jan. 2022.

Santos MA (2010) Produção de cultivares decumbentes de amendoim submetidas a distintos espaçamentos. **Revista Caatinga** 23:149-154.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbrreras JF, Coelho MR, Almeida JA, Filho JCA, Oliveira JB, Cunha TJF (2018) Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa, 356p.

Suassuna TMF, Ferreira DS (2014) Sistemas de produção Embrapa: sistema de produção de amendoim. Embrapa Algodão. Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistema%2Fproducao%2F6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=3803&p_r_p_-996514994_topicId=3448>. Acesso em: 12 jan. 2022.

Sampaio RM, Fredo CE (2019) O amendoim paulista e suas características de produção, socioeconômicas e tecnológicas. In.: Jammal DG (Rev.) **A cultura do amendoim e seus reflexos econômicos, sociais e técnicos**. Jaboticabal: AREA, p. 13-25.

Sampaio RM (2020) Amendoim: exportações em alta frente às expectativas construídas pela pandemia. **Revista Canavieiros**. Disponível em: <<https://www.revistacanavieiros.com.br/amendoim-exportacoes-em-alta-frente-as-expectativas-construidas-pela-pandemia>>. Acesso em: 21 jan. 2022.

SENNINGER (2022) Série 30. Disponível em: <<https://www.senninger.com/pt/product/serie-30>>. Acesso em: 01 mar. 2022.

Pezzopane JRM (2009) Amendoim. In.: Monteiro JEBA (Ed.) **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, p. 53-61.

Paredes P, Torres MO (2017) Parameterization of AquaCrop model for vining pea biomass and yield predictions and assessing impacts of irrigation strategies considering various sowing dates. **Irrigation Science**. 35:27-41. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0520-x>

Mohamed HA, Clark JA, Ong CK (1988) Genotypic differences in the temperature responses of tropical crops: I. Germination characteristics of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) and pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.). **Journal of Experimental Botany** 39:1121-1128. Doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/39.8.1121>

Mabhaudhi T, Modi AT, Beletse YG (2014) Parameterization and testing of AquaCrop for a south african bambara groundnut landrace. **Agronomy Journal** 106:243-251. Doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0355>

Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual model. Part 1 - A discussion of principles. **Journal of Hydrology** 10:282-290. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

Nakagawa J, Rosolem CA (2011) O amendoim: tecnologia de produção. Botucatu: FEPAF, 325p.

Villalobos FJ, Fereres E (1990) Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. **Agronomy Journal** 82:1153-1159. Doi: <https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200060026x>

Valls JFM, Simpson CE (2005) New species of *Arachis* L. (*Leguminosae*) from Brazil, Paraguay and Bolivia. **Bonplandia** 14:35-63. Doi: <http://dx.doi.org/10.30972/bon.141-21387>

Vanuytrecht E, Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Heng LK, Vila MG, Moreno PM (2014) AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. **Environmental Modelling & Software**. 62:351-360. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>

Wright GC, Nageswara Rao RC (1994) Groundnut water relations. In.: Smartt J (Ed.) **The Groundnut Crop. A Scientific Basis for Improvement**. Londres: Springer, p. 281-335.

Wikihmong (2022) Peanut. Disponível em: <<https://wikihmong.com/en/Peanut>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

Zeleeke KT, Luckett D, Cowley R (2011) Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. **Agronomy Journal** 103:1610-1618. Doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0150>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo AquaCrop demonstrou ser um modelo robusto e com ótimo potencial para ser empregado em estudos de avaliação de estratégias de manejo de irrigação para a cultura do amendoim nas condições do sistema nacional de cultivo. O presente trabalho constitui-se de pesquisa pioneira a nível nacional, apresentando resultados com os quais os autores visam nortear futuras pesquisas, que deverão ser desenvolvidas avaliando o modelo da FAO para outras regiões e sistemas de cultivo do amendoim no Brasil. Espera-se que, além da consolidação dos mecanismos que proporcionaram o bom desempenho observado, esta pesquisa contribua para eventuais melhorias no modelo a partir da superação de suas limitações, conforme apontadas neste trabalho.