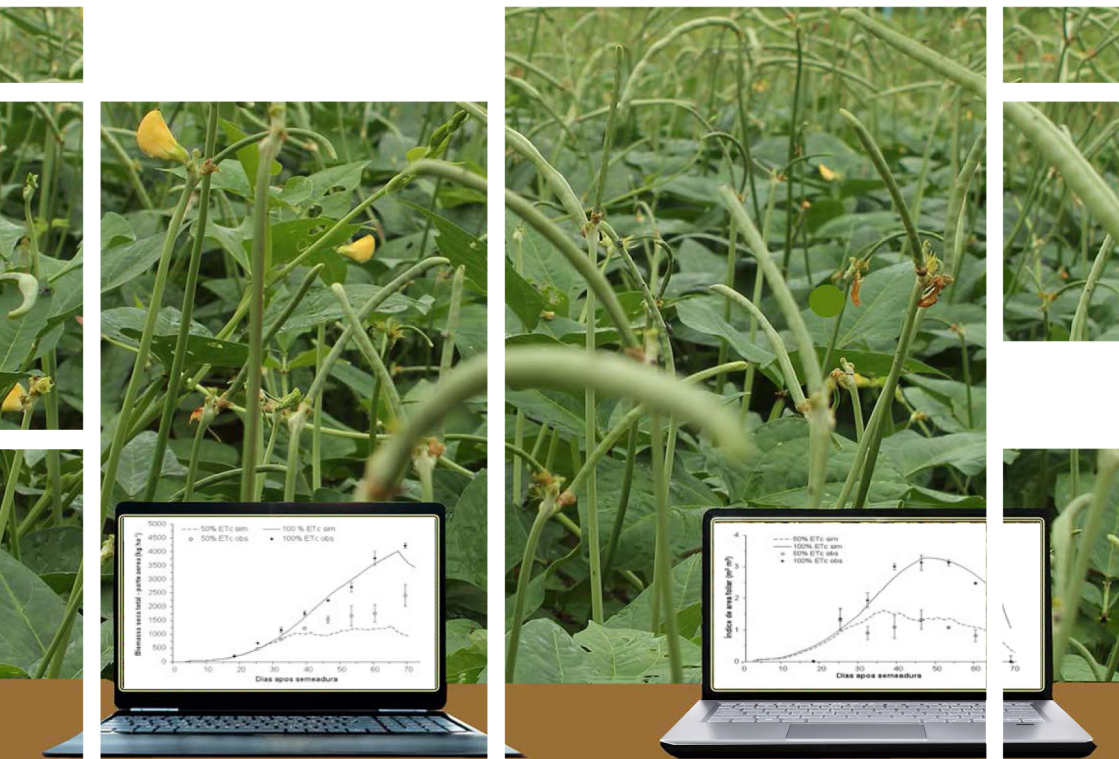


Calibração do Modelo CROPGRO-cowpea para Simulação do Crescimento e Rendimento de Grãos de Feijão-caupi com e sem Deficit Hídrico



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Meio-Norte
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
149**

**Calibração do Modelo CROPGRO-
cowpea para Simulação do Crescimento
e Rendimento de Grãos de Feijão-
caupi com e sem Deficit Hídrico**

*Edson Alves Bastos
Aderson Soares de Andrade Júnior
Ramon Amaro de Sales
Ruan Luís Santana Bezerra
Santiago Vianna Cuadra
Fernando Antônio Macena da Silva*

***Embrapa Meio-Norte
Teresina, PI
2023***

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na Embrapa Meio-Norte

Av. Duque de Caxias, 5.650,
Bairro Buenos Aires
Caixa Postal 01
CEP 64008-480, Teresina, PI
Fone: (86) 3198-0500
Fax: (86) 3198-0530

www.embrapa.br/meio-norte
Serviço de Atendimento ao Cidadão (SAC)
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
da Unidade Responsável

Presidente
Braz Henrique Nunes Rodrigues

Secretário-Executivo
Jeudys Araújo de Oliveira

Membros: *Lígia Maria Rolim Bandeira, Orlane da Silva Maia, Maria Eugênia Ribeiro, Kaesel Jackson Damasceno Silva, Ana Lúcia Horta Barreto, José Oscar Lustosa de Oliveira Júnior, Marcos Emanuel da Costa Veloso, Flávio Favaro Blanco, Francisco de Brito Melo, Izabella Cabral Hassum, Tânia Maria Leal, Francisco das Chagas Monteiro, José Alves da Silva Câmara.*

Supervisão editorial
Lígia Maria Rolim Bandeira

Revisão de texto
Francisco de Assis David da Silva

Normalização bibliográfica
Orlane da Silva Maia

Editoração eletrônica
Jorimá Marques Ferreira

Foto da capa
Maria Eugênia Ribeiro

1ª edição
1ª impressão (2023): formato digital

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Meio-Norte

Calibração do modelo CROPGRO-cowpea para simulação do crescimento e rendimento de grãos de feijão-caupi com e sem deficit hídrico / Edson Alves Bastos... [et al.]. – Teresina : Embrapa Meio-Norte, 2023.

PDF (24 p.) : il. ; 16 cm x 22 cm. – (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Meio-Norte, ISSN 1413-1455 ; 149).

1. Zoneamento agrícola. 2. Zoneamento climático. 3. Modelo de simulação. 4. ZARC. 5. DSSAT. 6. *Vigna unguiculata*. I. Bastos, Edson Alves. II. Embrapa Meio-Norte. III. Série.

CDD 630.2516 (21. ed.)

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução.....	8
Métodologia.....	10
Resultados e Discussão	16
Conclusões.....	22
Referências	23

Calibração do Modelo CROPGRO-cowpea para Simulação do Crescimento e Rendimento de Grãos de Feijão-caupi com e sem Deficit Hídrico

Edson Alves Bastos¹

Aderson Soares de Andrade Júnior¹

Ramon Amaro de Sales²

Ruan Luís Santana Bezerra³

Santiago Vianna Cuadra⁴

Fernando Antônio Macena da Silva⁵

Resumo – O objetivo desta pesquisa foi calibrar o modelo CROPGRO-cowpea do DSSAT para possibilitar, futuramente, o desenvolvimento de uma metodologia técnico-científica para a elaboração de zoneamento agrícola de risco climático baseada em um índice de produtividade climática para a cultura do feijão-caupi. Para realizar a simulação do crescimento e desenvolvimento do feijão-caupi, foi realizado um experimento de campo, onde se avaliaram parâmetros de crescimento (índice de área foliar e biomassa da parte aérea) e o rendimento de grãos da variedade de feijão-caupi BRS Tumucumaque em dois regimes hídricos (50% e 100% da ETc). Com base nos dados de umidade do solo e medidas biométricas coletadas neste experimento, procedeu-se à calibração do modelo CROPGRO-cowpea. O teor de água no solo foi monitorado no campo e simulado pelo modelo, considerando as profundidades de 0,0 m a 0,3 m e de 0,3 m a 0,6 m para os regimes

¹Engenheiro-agrônomo, doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI

²Engenheiro-agrônomo, mestre em Produção Vegetal, doutorando em Fitotecnia pela UFV, Viçosa, MG

³Engenheiro-agrônomo, Universidade Federal do Piauí, Teresina, PI

⁴Meteorologista, doutor em Meteorologia Aplicada, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

⁵Engenheiro-agrônomo, doutor em Engenharia Agrícola, pesquisador da Embrapa Cerrado, Brasília, DF

hídricos de 50% e de 100% da ETC. Em relação à cultura, foram simulados as datas de florescimento e da maturidade fisiológica, o acúmulo de matéria seca, o índice de área foliar e a produtividade de grãos. Para avaliar o desempenho do modelo CROPGRO-cowpea na simulação do feijão-caupi, foram utilizados a raiz quadrada do erro médio (RMSE), o índice de concordância de Willmott (d), o erro percentual absoluto médio (MAPE) e o coeficiente de determinação (R^2). Os resultados evidenciaram que o modelo CROPGRO-cowpea foi calibrado com ajustes consistentes nas simulações do teor de água no solo, da biomassa aérea total, do índice de área foliar e da produtividade de grãos. Conclui-se que o modelo pode ser utilizado para aprimorar a metodologia do zoneamento agrícola de risco climático baseada em um índice de produtividade climática para a cultura do feijão-caupi.

Termos para indexação: Modelagem; *Vigna Unguiculata*; ZARC; DSSAT.

Calibration of the CROPGRO-cowpea Model for Simulating Cowpea Growth and Grain Yield with and Without Water Deficit

Abstract – The objective of this research was to calibrate the DSSAT CROPGRO-cowpea model in order to develop a technical-scientific methodology for the elaboration of agricultural zoning of climate risk based on a climate productivity index for the cowpea crop. To simulate the growth and development of cowpea, a field experiment was carried out, evaluating growth parameters (leaf area index and aerial biomass) and grain yield of the cowpea crop, BRS Tumucumaque variety, under two water regimes (50% and 100% of crop evapotranspiration - ETC). Based on soil moisture data and biometric measurements collected in this experiment, the CROPGRO-cowpea model was calibrated. Soil water content was monitored during the experiment and simulated by the model, considering depths from 0 to 0.3m and from 0.3m to 0.6m for water regimes of 50% and 100% ETC. In relation to the crop, the dates of flowering and physiological maturity; dry matter accumulation, leaf area index and grain yield were simulated. To evaluate the performance of the CROPGRO-cowpea model in the simulation of cowpea, the square root of the mean error (RMSE), the Willmott concordance index (d), the mean absolute percentage error (MAPE) and the determination coefficient (R^2) were used. The results show that the CROPGRO-cowpea model was calibrated with consistent adjustments in the simulations of soil water content, aerial biomass, leaf area index and grain yield, and can be used to improve the methodology of agricultural climate risk zoning based on a climate productivity index for the cowpea crop.

Keywords: Modeling; *Vigna Unguiculata*; ZARC; DSSAT.

Introdução

O feijão-caupi [(*Vigna unguiculata* (L.) Walp.)] ou feijão-de-corda é o segundo tipo de feijão mais cultivado no Brasil e de grande importância para as regiões Norte e Nordeste do Brasil, com franca expansão na região Centro-Oeste, gerando emprego e renda nessas regiões. No entanto a produtividade dessa cultura ainda é considerada baixa devido a fatores edafoclimáticos limitantes na maioria das áreas de cultivo e ao baixo uso de tecnologias pela cadeia produtiva.

Ressalte-se, porém, que já existem diversas tecnologias relacionadas ao sistema de produção do feijão-caupi, destacando-se as variedades melhoradas resistentes a doenças e com elevada qualidade de grãos; arranjos de plantas modernos e mais produtivos; doses adequadas de adubação; controle fitossanitário; entre outras (Bastos, 2017). A utilização dessas tecnologias, no entanto, ainda não é garantia de elevadas produtividades de grãos nos cultivos de sequeiro, em decorrência da possibilidade de ocorrência de déficit hídrico por conta da má distribuição das chuvas.

A imprevisibilidade da variabilidade do clima, notadamente das precipitações, configura-se como a principal causa de risco de insucesso, não só do cultivo do feijão-caupi, mas da exploração das principais culturas agrícolas. Estudo realizado pelo Banco Mundial, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento e Embrapa indica que o Brasil perde no setor agropecuário mais de R\$ 11 bilhões ao ano devido a riscos diversos que poderiam ser geridos de forma mais eficaz (Arias et al., 2015). Em muitas regiões do globo, mais de 60% da variabilidade e risco de produção agrícola são causados pela variabilidade climática (Ray et al., 2015), uma vez que os agricultores exercem pouco ou nenhum controle sobre fenômenos naturais como secas, geadas, onda de calor, vendavais e granizo (Monteiro, 2009).

Para reduzir os riscos de insucesso na lavoura decorrente das adversidades climáticas, o agricultor deve seguir o calendário de semeadura indicado pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC). Por meio do

ZARC, é possível definir quais as regiões e épocas do ano mais adequadas ao cultivo de diversas espécies vegetais, entre elas o feijão-caupi, levando-se em consideração parâmetros como adaptação de cultivares em diferentes ambientes, precipitação pluvial e evapotranspiração, cujos fatores estão diretamente ligados aos caracteres biométricos observados nas culturas durante todo seu ciclo de desenvolvimento.

São evidentes os avanços alcançados com os trabalhos de zoneamentos agrícolas anteriores, que atenderam a uma grande demanda existente e possibilitaram significativa redução das perdas na agricultura brasileira, mediante indicação de épocas de semeadura mais favoráveis às principais culturas. No entanto a metodologia do ZARC ainda apresenta algumas limitações como a definição de ciclos fenológicos fixos, independentemente da época de semeadura e da região do País, sem levar em conta o conceito de rendimento e das exigências térmicas das culturas. Além disso, não é considerado o rendimento da cultura em função de diferentes níveis de manejo. O uso de modelos de crescimento de cultura pode ser muito útil para aprimorar a metodologia do ZARC, permitindo estabelecer diferentes níveis de probabilidade de acordo com a previsibilidade dos rendimentos da cultura.

Esses modelos são importantes para simular diferentes manejos de solo, culturas e cenários climáticos, com o objetivo de desenvolver as estratégias mais adequadas e específicas do local (Rezzoug et al., 2008; Ngwira et al., 2014). O modelo DSSAT é um dos mais difundidos no mundo, testado para diversas culturas, entre elas o feijão-caupi, como demonstrado por Lima Filho et al. (2013), Vieira et al. (2020) e Woli et al. (2022). Todavia cada cultivar precisa ser avaliada de maneira única, visto que ela tem características morfofisiológicas que podem diferir.

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi calibrar o modelo CROPGRO-cowpea do DSSAT para possibilitar, futuramente, o desenvolvimento de uma metodologia técnico-científica para a elaboração de zoneamento agrícola de risco climático baseada em um índice de produtividade climática para a cultura do feijão-caupi.

Metodologia

Para realizar a simulação do crescimento e desenvolvimento do feijão-caupi, foi realizado um experimento de campo, onde se avaliaram parâmetros de crescimento e de rendimento de grãos da variedade de feijão-caupi BRS Tumucumaque com e sem deficiência hídrica. Posteriormente, com base nos dados observados desse experimento, procedeu-se à calibração do modelo CROPGRO-cowpea da plataforma DSSAT.

Experimento de campo

O experimento foi conduzido no período de 23 de julho a 19 de outubro de 2021, no campo experimental da Embrapa Meio-Norte, em Teresina, PI (5°02'13"S; 42°47'52,7"W; 74 m). O clima do município é C1sA'a', de acordo com a classificação climática de Thornthwaite e Mather, caracterizado como subúmido seco, megatérmico, com superavit moderado de água no verão, médias anuais de temperatura e de pluviosidade de 28,2 °C e 1.328,4 mm, respectivamente (Bastos; Andrade Júnior, 2021). Os valores de precipitação e de temperatura ocorridos durante o experimento estão apresentados na Figura 1.

Foram cultivadas duas faixas (10 m x 50 m), semeadas com a cultivar BRS-Tumucumaque em dois regimes hídricos (50% e 100% da evapotranspiração da cultura). O espaçamento adotado foi de 0,5 m entre fileiras de plantas, com densidade de 200.000 plantas por hectare. Cada faixa foi dividida ao meio para coleta de dados relacionados à biometria da planta e às variáveis de produção (Figura 2).

Utilizou-se o sistema de irrigação por aspersão, com os aspersores espaçados de 12 m x 12 m e bocais de 4,4 mm e 3,2 mm. A diferenciação das lâminas de irrigação iniciou a partir dos 14 dias após a semeadura, para permitir que a germinação e o desenvolvimento inicial das plantas ocorressem de maneira uniforme. O manejo das lâminas de irrigação foi realizado com base na evapotranspiração de referência (ET_o), estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO (Allen et al., 1998), cujos dados necessários aos cálculos foram obtidos a partir da estação agrometeorológica automática de Teresina, PI, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

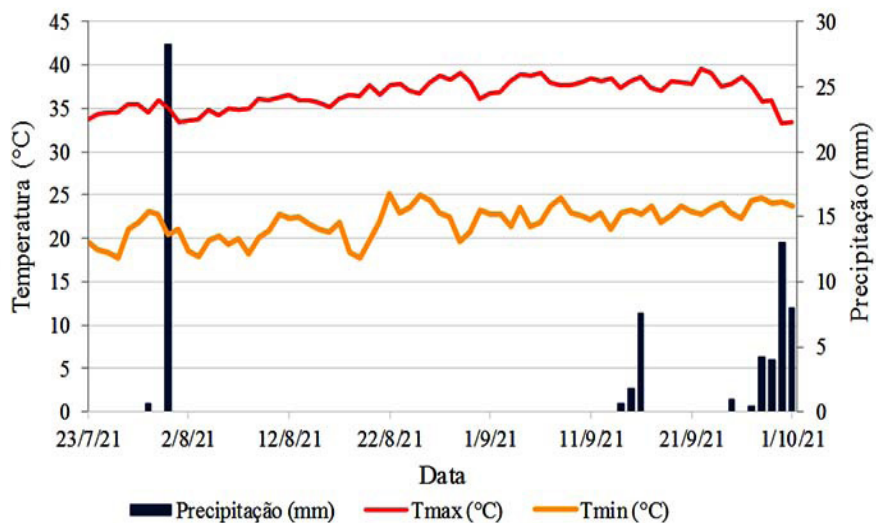


Figura 1. Valores da temperatura do ar e da precipitação ocorridos durante o período experimental.

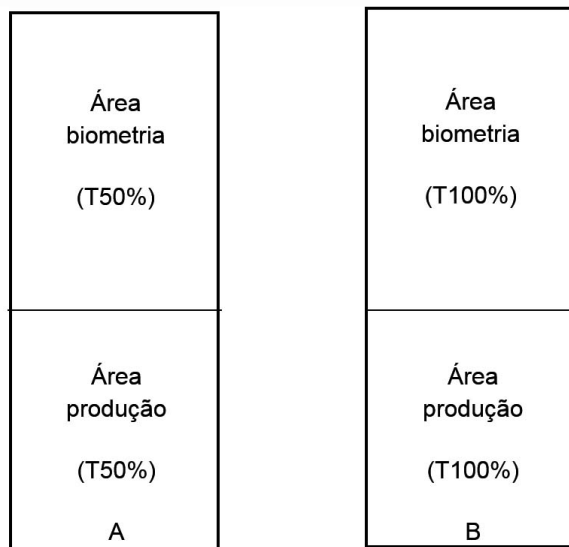


Figura 2. Esquema da divisão das faixas experimentais destinadas à biometria e aos componentes de produção. A - 50% da ETc e B - 100% da ETc.

O monitoramento do teor de água no solo foi realizado por meio de sensores de umidade modelo CS616, que captam umidade volumétrica em profundidade de até 0,3 m, conectados a um datalogger modelo CR1000x .

Para o monitoramento da uniformidade de distribuição da água e da lâmina de irrigação aplicada, foram instalados coletores espaçados de 3 m x 3 m em cada um dos regimes hídricos.

Na Tabela 1, são apresentados a granulometria do solo, o pH, o fator de crescimento radicular e os indicadores de armazenamento de água no solo. Todos esses parâmetros são requeridos pelo modelo DSSAT.

Foi observada a fenologia da planta (surgimento da primeira flor e maturidade fisiológica) e, semanalmente, avaliadas a matéria seca e a área foliar, em seis repetições para cada regime hídrico. Por ocasião da colheita, mediu-se a produtividade de grãos e foram colhidas as vagens de duas fileiras de plantas, com 5 m de comprimento, em seis repetições.

Tabela 1. Resumo das características físico-hídricas do solo da área experimental, Embrapa Meio-Norte, Teresina, Piauí.

Camada	Profundidade (m)	areia			silte		argila		pH	Ds	CO (%)	SRGF	PMP	CC	SAT
		(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	H ₂ O	g (cm ⁻³)									
1	0,00-0,20	670	130	200	200	6,25	1,49	0,289	1	0,092	0,202	0,35			
2	0,20-0,30	540	200	260	260	6,13	1,89	0,197	0,8	0,093	0,201	0,35			
3	0,30-0,40	550	230	220	220	6,21	2,04	0,224	0,7	0,091	0,204	0,32			
4	0,40-0,60	550	230	220	220	6,21	2,04	0,220	0,5	0,093	0,210	0,31			
5	0,60-0,80	550	230	220	220	6,21	2,04	0,221	0,0	0,091	0,208	0,31			
6	0,80-0,150	550	230	220	220	6,21	2,04	0,222	0,0	0,092	0,201	0,31			

Ponto de murcha permanente (PMP); capacidade de campo (CC); saturação (SAT); fator de crescimento radicular do solo (SRGF); e carbono orgânico (CO).

Calibração do modelo

A calibração consiste em se modificarem os parâmetros do modelo para a obtenção dos melhores ajustes entre os dados simulados e os observados (Jones et al., 1987; Hoogenboom et al., 1992).

Para calibrar o modelo, foram criados arquivos de solo, de clima e de espécie a partir de dados locais observados. Procedeu-se aos ajustes do teor de água no solo para as profundidades de 0,0 m a 0,3 m e de 0,3 m a 0,6 m para os regimes hídricos de 50% e de 100% da ETC.

Em relação à cultura, inicialmente ajustaram-se as datas de florescimento e de maturidade fisiológica. Posteriormente, procedeu-se aos ajustes do acúmulo de matéria seca, do índice de área foliar e da produtividade de grãos. Durante a calibração, foram atribuídos valores aos parâmetros da planta (Tabela 2) e o modelo foi executado várias vezes até que os valores simulados de biomassa, de índice de área foliar, de fenologia e de produtividade de grãos estivessem bem próximos dos observados.

Tabela 2. Valores finais dos coeficientes do feijão-caupi na fase de calibração do modelo CROPGRO-cowpea para Teresina, PI, 2021.

Característica	Definição	Unidade	BRS-Tumucumaque
CSDL	Comprimento crítico do dia abaixo do qual o desenvolvimento reprodutivo progride não alterado	horas	13,10
PPSEN	Inclinação da resposta relativa do desenvolvimento ao fotoperíodo	1/hora	0,294
EM-FL	Tempo termal entre a emergência das plantas e aparência das flores (R1)	dias fototérmicos	20,00
FL-SH	Tempo termal entre a primeira flor e a primeira vagem (R3)	dias fototérmicos	4,00
FL-SD	Tempo termal entre a primeira flor e a primeira semente (R5)	dias fototérmicos	6,00

Continua...

Tabela 2. Continuação.

Característica	Definição	Unidade	BRS-Tumucumaque
SD-PM	Tempo termal entre a primeira semente (R5) e a maturidade fisiológica (R7)	dias fototérmicos	13,0
FL-LF	Tempo termal entre a primeira flor (R1) e o final da expansão foliar	dias fototérmicos	18,0
LFMAX	Taxa máxima de fotossíntese foliar a 30 °C. 350 vpm CO ₂ e alta luminosidade	mg CO ₂ / m ² /s	0,900
SLAVR	Área foliar específica da cultivar em condições de crescimento padrão	cm ² / g	210,0
SIZLF	Tamanho máximo da folha estendida (trifólio)	cm ²	220,0
XFRT	Fração máxima de crescimento diário que é particionado para semente+vagem	g/g	0,600
WTPSD	Peso máximo por semente	g	0,600
SFDUR	Duração do enchimento de sementes nas condições normais de crescimento	dias fototérmicos	17,0
SDPDV	Média de sementes por vagem em condições normais de crescimento	Sementes/vagem	6,00
PODUR	Tempo necessário para a cultivar atingir o crescimento potencial das vagens	dias fototérmicos	11,0
THRSH	Porcentagem de debulha	semente/(semente + casca)	95,0
SDPRO	Fração de proteína nas sementes	g(proteína)/g (semente)	0,300
SDLIP	Fração de óleo nas sementes	g(óleo)/g (semente)	0,065

Análise de dados

O desempenho do modelo CROPGRO-cowpea na simulação do feijão-caupi foi avaliado usando-se a raiz quadrada do erro médio (RMSE), o índice de concordância de Willmott (d) (Willmott, 1982), o erro percentual absoluto médio (MAPE) e o coeficiente de determinação (R^2). Para o índice de concordância, um valor de $d \geq 0,9$ é considerado concordância “excelente”; $0,8 \leq d < 0,9$ é considerado concordância “boa”; $0,7 \leq d < 0,8$ é considerado concordância “razoável”; e $d < 0,7$ é considerado concordância “ruim”, ao comparar os valores simulados e medidos (Liu et al., 2013; He et al., 2018).

Resultados e Discussão

Calibração do modelo CROPGRO-cowpea

Estimativa da umidade do solo

Na Figura 2, é apresentada a evolução do conteúdo total de água do solo modelado e observado nas profundidades 0,0 m a 0,3 m e de 0,3 m a 0,6 m em dois regimes hídricos, 50% ETc e 100% ETc. Nos primeiros 40 dias, o modelo tendeu a superestimar a água do solo nas profundidades de 0,0 m a 0,3 m e de 0,3 m a 0,6 m no regime com deficit hídrico de 50% (Figuras 2A e 2B), conforme confirmado pelo MAPE (Tabela 4). Por outro lado, a estimativa do teor de água no solo para o regime hídrico de 100% ETc foi bem próxima dos valores observados nas duas profundidades avaliadas, conforme Figuras 2C e 2D, e menores valores de MAPE, que variaram de 9,04 a 13,4 (Tabela 3).

As estatísticas de desempenho do modelo em cada condição de água no solo e profundidades são mostradas na Tabela 3. As simulações do modelo mostraram elevados ajustes, com R^2 que variou de 0,73 a 0,97 em ambos os tratamentos (50% e 100% ETc),

indicando que, nos dois regimes hídricos, o modelo explicou 73% a 97% da variabilidade no conteúdo de água do solo. A concordância dos dados foi boa $0,8 \leq d < 0,9$ para o tratamento 100% ETc em ambas as profundidades; razoável para o tratamento 50% ETc na profundidade 0,0 m 0,3 m e ruim na profundidade 0,3 m a 0,6 m (Tabela 3). Esses ajustes estão compatíveis com os obtidos por Vieira et al. (2020) na fase de calibração do modelo AquaCrop para o feijão-caupi cultivado em diferentes regimes hídricos, com R^2 que variou de 0,74 a 0,97 e índice d que variou de 0,92 a 0,99 para os tratamentos de 100% e de 50% de reposição hídrica, respectivamente.

Esses índices estatísticos permitem inferir um desempenho satisfatório do modelo na estimativa do teor de água no solo, notadamente para o regime com maior disponibilidade de água no solo.

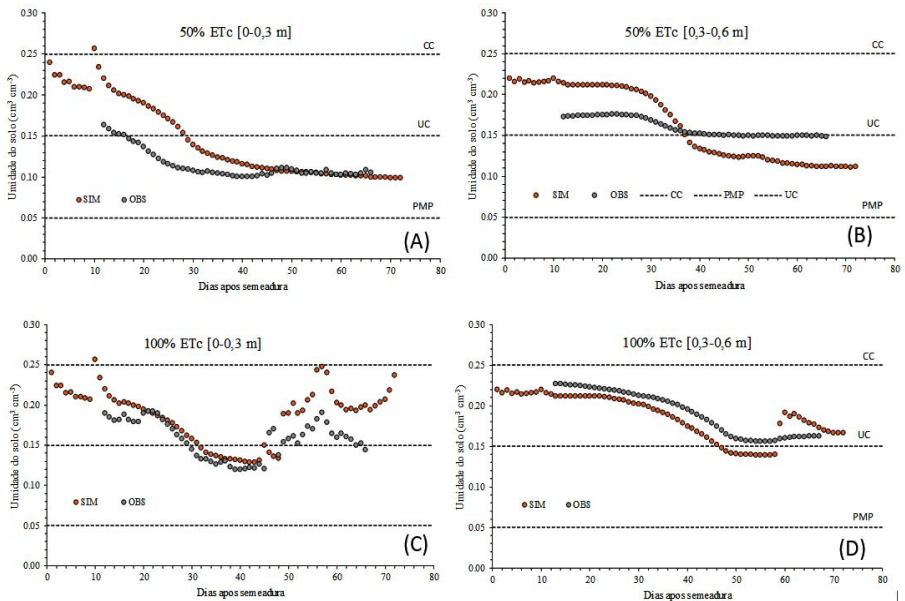


Figura 2. Valores de umidade do solo em dois regimes hídricos e duas profundidades para o feijão-caupi na fase de calibração do modelo CROPGRO-cowpea para Teresina, PI, 2021.

Tabela 3. Comparação estatística do conteúdo total de água do solo observado e simulado nas camadas 0,0 m a 0,3 m e 0,3 m a 0,6 m na fase de calibração do modelo CROPGRO-cowpea para Teresina, PI, 2021.

Tratamento	0,0 – 0,3 m			0,3 – 0,6 m		
	R ²	MAPE (%)	d	R ²	MAPE (%)	d
50% ETc	0,82	18,8	0,73	0,97	17,9	0,67
100% ETc	0,73	13,4	0,80	0,73	9,04	0,89

Estimativa dos eventos fenológicos

Os valores observados e simulados da fenologia da cultivar BRS-Tumucumaque nos dois regimes hídricos avaliados, nas condições de solo e clima de Teresina, encontram-se na Tabela 4. Pode-se constatar que o modelo simulou satisfatoriamente a emergência das plantas, o surgimento da primeira flor e a maturidade fisiológica, com diferenças que variaram de 0 a 2 dias. Lima Filho et al. (2013), ao calibrarem o modelo CROPGRO-cowpea para o Recôncavo Baiano, obtiveram uma diferença de zero dia entre os valores observados e simulados dos eventos fenológicos.

Tabela 4. Valores dos eventos fenológicos do feijão-caupi na fase de calibração do modelo CROPGRO-cowpea para Teresina, PI, 2021.

Evento fenológico	BRS-Tumucumaque					
	Sim (50%)	Obs (50%)	Dife- rença	Sim (100%)	Obs (100%)	Dife- rença
Emergência	4	5	1	4	5	1
1ª flor	35	37	2	35	35	0
Maturidade fisiológica	65	65	0	67	65	-2

¹Sim: simulado; Obs: Observado; 50% e 100% correspondem aos tratamentos com 50% e 100% de reposição da evapotranspiração, respectivamente.

Estimativa da matéria seca

Os dados de matéria seca da parte aérea do feijão-caupi observados foram comparados com os valores estimados pelo modelo CROPGRO-cowpea em dois regimes hídricos (Figura 3). Percebe-se um crescimento lento da biomassa durante a fase vegetativa e exponencial até o surgimento das vagens, concordando com os resultados obtidos por Lima Filho et al. (2013) e Vieira et al. (2020). Os valores máximos simulados para os respectivos tratamentos 50% ETc e 100% ETc foram de 2.414 kg ha⁻¹ e 4.218 kg ha⁻¹, alcançados aos 70 dias após a semeadura (Figura 3A), compatíveis com os resultados de Lima Filho et al. (2013) que encontraram os maiores valores simulados de biomassa (3.043 kg/ha) aos 68 dias.

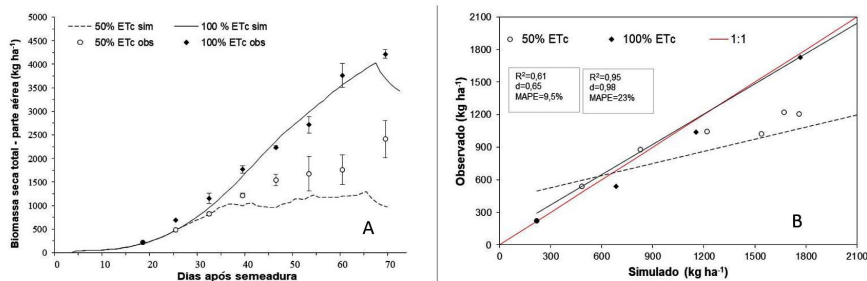


Figura 3. Valores de biomassa da parte aérea de dois regimes hídricos no feijão-caupi, na fase de calibração do modelo CROPGRO-cowpea para Teresina, PI, 2021.

Nessa Figura, percebe-se que, durante a fase vegetativa, que se estende aproximadamente até os 40 dias após a semeadura, verifica-se que os valores estimados de matéria seca da parte aérea foram muito próximos nos dois regimes hídricos. No entanto as diferenças entre os valores observados e simulados foram maiores durante o período reprodutivo. De acordo com Bastos (1999), na fase reprodutiva, surgem as flores, as vagens e as sementes, o que torna o sistema mais complexo e mais difícil de ser representado com precisão, pois a partição dos fotoassimilados, antes direcionada apenas para raízes, folhas e colmos, tem de ser alocada também aos órgãos reprodutivos. Por isso as chances de erro acabam sendo maiores.

De modo geral, observa-se que o modelo apresentou elevados ajustes na estimativa da biomassa, notadamente para o tratamento 100% ETc, constatado pelo elevado coeficiente de determinação (R^2) 0,95 (Figura 3B). Além disso, o valor do erro percentual absoluto médio (MAPE) foi baixo (9,5%), enquanto no tratamento 50% ETc o valor do erro foi maior, chegando a 23,0% (Figura 3B). Esses resultados estão compatíveis com aqueles obtidos por Vieira et al. (2020), que obtiveram excelentes ajustes na simulação de biomassa de feijão-caupi em diferentes regimes hídricos, com R^2 que variou de 0,97 a 0,99 e erro quadrado médio de 5% a 20%.

Estimativa do índice de área foliar

Os valores de índice de área foliar (IAF) observados e simulados para a cultivar BRS-Tumucumaque em dois regimes hídricos, 50% ETc e 100% ETc, no município de Teresina, PI, 2021, estão apresentados na Figura 4. Nos dois regimes hídricos, o modelo mostrou bons ajustes na estimativa do IAF, constatado pelos elevados valores de R^2 , que variaram de 0,75 a 0,89, pelos baixos valores de MAPE, que apresentaram variação de 7,26% a 9,84%, e pelo índice de concordância, classificado como boa ($d = 0,85$ e $0,96$), conforme Liu et al. (2013) e He et al. (2018).

Lima Filho et al. (2013), na fase de calibração do modelo CROPGRO para o feijão-caupi, também obtiveram bons ajustes na simulação do índice de área foliar da variedade BRS Guariba, em que a diferença entre os valores máximos de IAF observados e simulados foi de apenas 6,8%, coeficiente de determinação R^2 de 0,926, índice de concordância de Willmott de 0,965 e erro absoluto médio (EAM) de -0,186.

É notório que o tratamento com 50% ETc apresentou menor área foliar (Figura 4 A), indicando que houve uma quantidade de água muito aquém da necessidade da cultura. Esse déficit hídrico limita a emissão de folhas e o seu tamanho, a fim de reduzir a perda de água. Geralmente, as plantas

expostas ao estresse hídrico têm menor evapotranspiração, o que leva ainda mais ao desenvolvimento de certos sintomas de estresse hídrico, como murchamento das folhas e redução da área foliar (Wang et al., 2015; Parkash; Singh, 2020).

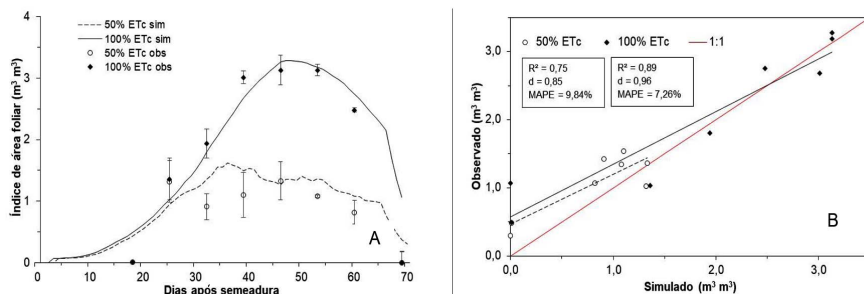


Figura 4. Valores de índice de área foliar de dois regimes hídricos no feijão-caupi, na fase de calibração do modelo CROPGRO-cowpea para Teresina, PI, 2021.

Estimativa da produtividade de grãos

Os valores das produtividades de grãos (PG) referentes aos dois regimes hídricos encontram-se na Figura 5. Foram obtidos excelentes ajustes na simulação em relação à PG, com superestimativa de apenas 1% para o tratamento com 50% ETC e subestimativa de -2,5% para o tratamento com 100% ETC. Os outros índices estatísticos também comprovam os excelentes ajustes na estimativa da produtividade de grãos, com RMSE inferior a 20 kg ha⁻¹ (Figura 5). Esse ajuste foi semelhante ao obtido por Lima Filho et al. (2013), que estimaram a produtividade de grãos em 1.572 kg ha⁻¹, enquanto o valor observado foi de 1.556 kg ha⁻¹, implicando uma diferença de apenas 1% entre os valores observado e simulado. Esses resultados permitem inferir que o modelo CROPGRO-cowpea pode ser utilizado com confiança satisfatória para simular o crescimento e desenvolvimento do feijão-caupi e ser uma ferramenta útil no aprimoramento da metodologia usada pelo zoneamento de risco climático.

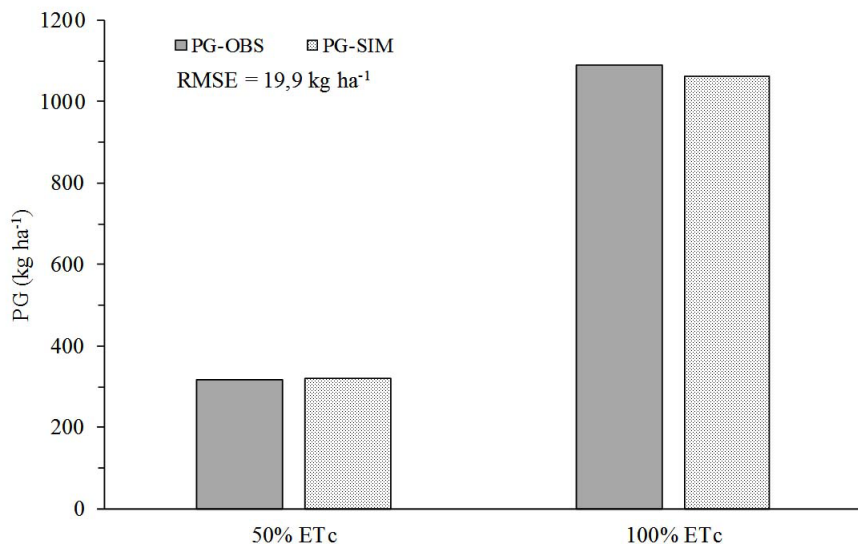


Figura 5. Valores de produtividade de grãos de dois regimes hídricos no feijão-caupi, na fase de calibração do modelo CROPGRO-cowpea para Teresina, PI, 2021.

Conclusão

O modelo CROPGRO-cowpea foi calibrado com ajustes consistentes na estimativa do teor de água no solo, da biomassa, do índice de área foliar e da produtividade de grãos para a cultivar BRS-Tumucumaque em dois regimes hídricos, 50% ET_c e 100% ET_c, no município de Teresina, PI, 2021. Sugere-se como próxima etapa a avaliação do modelo contra dados de rendimento dos programas de melhoramento e ensaios de desempenho de cultivar, para que o modelo possa ser utilizado para aprimorar a metodologia do zoneamento agrícola de risco climático baseada em um índice de produtividade climática para a cultura do feijão-caupi.

Referências

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 56).
- ARIAS, D.; MENDES, P.; ABEL, P. (coord.). **Revisão rápida e integrada da gestão de riscos agropecuários no Brasil: caminhos para uma visão integrada**. Brasília, DF: Banco Mundial, 2015. 76 p.
- BASTOS, E. A. **Adaptação do modelo CROPGRO para simulação do crescimento e desenvolvimento do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.)**. 1999. 91 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- BASTOS, E. A. (ed.). **Cultivo de feijão-caupi**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Versão eletrônica. (Embrapa Meio-Norte. Sistema de produção, 2; Embrapa Amazônia Ocidental. Sistema de produção, 2; Embrapa Agrobiologia. Sistema de produção, 4).
- BASTOS, E. A.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de. **Boletim agrometeorológico de 2020 para o município de Teresina, PI**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2021. 38 p. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 281).
- HE, W.; YANG, J. Y.; DRURY, C. F.; SMITH, W. N.; GRANT, B. B.; HE, P.; QIAN, B.; ZHOU, W.; HOOGENBOOM, G. Estimating the impacts of climate change on crop yields and N₂O emissions for conventional and no-tillage in Southwestern Ontario, Canada. **Agricultural Systems**, v. 159, p. 187-198, Jan. 2018.
- HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using SOYGRO, PNUTGRO, and BEANGRO: a review. **Transactions of the ASAE**, v. 35, n. 6, p. 2043-2056, 1992.
- JONES, J. W.; MISHOE, J. W.; BOOTE, K. J. **Introduction to simulation and modeling**. Taipei: Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region, 1987. 19 p. (FFTC. Technical bulletin, 100).
- LIMA FILHO, A. F.; COELHO FILHO, M. A.; HEINEMAN, A. B. Calibração e avaliação do modelo CROPGRO para a cultura do feijão caupi no Recôncavo Baiano, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1286-1293, 2013.
- LIU, S.; YANG, J. Y.; ZHANG, X. Y.; DRURY, C. F.; REYNOLDS, W. D.; HOOGENBOOM, G. Modelling crop yield soil water content and soil temperature for a soybean-maize rotation under conventional and conservation tillage systems in Northeast China. **Agricultural Water Management**, v. 123, p. 32-44, May 2013.

MONTEIRO, J. E. B. A. (org.). **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília, DF: INMET, 2009. 530 p.

NGWIRA, A. R.; AUNE, J. B.; THIERFELDER, C. DSSAT modelling of conservation agriculture maize response to climate change in Malawi. **Soil and Tillage Research**, v. 143, p. 85-94, Nov. 2014.

PARKASH, V.; SINGH, S. A review on potential plant-based water stress indicators for vegetable crops. **Sustainability**, v. 12, n. 10, p. 3945, 2020. DOI: 10.3390/su12103945.

RAY, D. K.; GERBER, J. S.; MACDONALD, G. K.; WEST, P. C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Communications**, v. 6, n. 1, p. 5989, 2015. DOI: 10.1038/ncomms6989.

REZZOUG, W.; GABRIELLE, B.; SULEIMAN, A.; BENABDELI, K. Application and evaluation of the DSSAT-wheat in the Tiaret region of Algeria. **African Journal of Agricultural Research**, v. 3, n. 4, p. 284-296, 2008.

VIEIRA, I. C. de O.; NUNES, H. G. G. C.; SOUSA, D. de P.; COSTA, D. L. P.; PINTO, J. V. de N.; FARIAS, V. D. da S.; FERREIRA, B. G.; TEIXEIRA, E. de O.; MARTINS, C. G. D.; SILVA, M. Y. F.; SOUZA, P. J. de O. P. de. Uso do modelo Aquacrop para o feijão-caupi cultivado sob diferentes lâminas de irrigação em Castanhal-PA. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 16, v. 27, p. 726-746, jul./dez. 2020. DOI: 10.5380/abclima.v27i0.70997.

WANG, X.; ZHAO, C.; GUO, N.; LI, Y.; JIAN, S.; YU, K. Determining the canopy water stress for spring wheat using canopy hyperspectral reflectance data in loess plateau semiarid regions. **Spectroscopy Letters**, v. 48, n. 7, p. 492-498, 2015.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

WOLI, P.; SMITH, G. R.; LONG, C.; ROUQUETTE JUNIOR, F. M. Assessing cowpea-wheat double cropping strategies in the Southern United States using the DSSAT crop model. **Agricultural Sciences**, v. 13, n. 6, p. 758-775, 2022.

Embrapa

Meio-Norte

Embrapa

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA
E PECUÁRIA

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO