

USO DO SOFTWARE AQUACROP PARA SIMULAR A RESPOSTA DO FEIJÃO À DIFERENTES REGIMES DE IRRIGAÇÃO

MONALISA SOARES COSTA^{1*}; EVERARDO CHARTUNI MANTOVANI²;
FERNANDA LAMEDE FERREIRA DE JESUS³; ARTHUR CARNIATO
SANCHES⁴; JHON LENNON BEZERRA DA SILVA⁵ E JANNAYLTON
ÉVERTON DE OLIVEIRA SANTOS⁶

¹ Bolsista de longa duração – desenvolvimento tecnológico, Instituto Nacional do Semiárido, rua Antônio Aragão, 169, Nova Brasília, CEP 49680-000, Nossa Senhora da Glória, Sergipe, Brasil, Parte da dissertação de mestrado, monalisa_sc@hotmail.com

² Professor Sênior doutor, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, 36570-900, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, everardo@ufv.br

³ Professora Doutora, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Tomé-Açu, Rod. PA 140, km 03, 68680-000, Tomé-Açu, PA, Brasil, fernanda.lamede@ufra.edu.br

⁴ Professor Doutor, Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Rod. Dourados-Itahum, km 12 – Cidade Universitária, 79804-970, Dourados, MS, Brasil, arthursanches@ufgd.edu.br

⁵ Doutorando em Engenharia de Agrícola, Departamento de Engenharia, UFRPE, Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n - Dois Irmãos, 52171-900, Recife, Pernambuco, Brasil, jhonlennoigt@hotmail.com

⁶ Professor Doutor, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Tomé-Açu, Rod. PA 140, km 03, 68680-000, Tomé-Açu, PA, Brasil, jannaylton@ufra.edu.br

1 RESUMO

Os softwares de simulação de crescimento e desenvolvimento das culturas no campo têm tido bastante aplicação, visto o objetivo de técnicos e pesquisadores em evitar perdas no campo e almejar melhorias a cada cultivo. O feijão é bastante cultivado e consumido no Brasil, o que atrai atenção para o ajuste do software *AquaCrop* à cultura nas condições edafoclimáticas brasileiras. O objetivo deste trabalho foi analisar a resposta do software *AquaCrop* quando ajustado para condições de ambiente e irrigação em que o feijoeiro foi cultivado. Observou-se dados simulados semelhantes e em concordância estatística com o observado, com maiores diferenças no acúmulo de biomassa e balanço hídrico ao longo do ciclo da cultura. A semelhança entre os dados simulados e observados na cobertura do dossel ao longo do ciclo da cultura traduzem uma boa resposta da equação utilizada para converter o índice de área foliar em cobertura do dossel para a cultura do feijão. Conclui-se com o estudo, que o software *AquaCrop* é confiável para a simulação do crescimento e desenvolvimento do feijão, pois os dados obtidos em campo são semelhantes aos simulados pelo modelo.

Palavras-chave: manejo, eficiência do uso da água, função de produção.

COSTA, M. S.; MANTOVANI, E. C.; JESUS, F. L. F.; SANCHES, A. C.; SILVA, J. L. B.; SANTOS, J. E. O.

USE OF AQUACROP SOFTWARE TO SIMULATE BEAN CROP RESPONSE TO DIFFERENT IRRIGATION REGIMES

2 ABSTRACT

The simulation software's of crop growth and development in the field has had many applications, since the aim of technicians and research in avoiding losses on the field and to target for improvements in each crop. The crop bean is highly cultivated and consumed in Brazil, what draws attention to the adjustment of the AquaCrop software for this crop under Brazilian edaphoclimatic conditions. This study aimed to analyze the response of the AquaCrop when adjusted for irrigation and greenhouse conditions in which the crop bean was cultivated. It was observed simulated data were similar and in statistical accordance with the observance in the field, to higher differences in biomass accumulation and water balance throughout the crop cycle. The similarity between the simulated and observed data for canopy coverage throughout the crop cycle translates a good answer of the equation used to convert the leaf area index canopy coverage for crop bean. We concluded with this study, that AquaCrop software is reliably simulating the growth and development of the crop bean because the data obtained on the field are similar to those simulated by the model.

Keywords: management, water use efficiency, production function.

3 INTRODUÇÃO

O cultivo de grãos é algo tradicional ao produtor brasileiro, principalmente, o feijão, que faz parte da alimentação básica da população. O Brasil é o maior produtor mundial de feijão, sendo os estados do Paraná e Minas Gerais responsáveis por cerca de 36,7% da produção nacional desse grão de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2020). O país também é um dos maiores consumidores e produtores desse alimento (COELHO, 2018).

O feijão, por ser uma planta de ciclo curto, em torno de 90 dias, permite seu cultivo em mais de uma vez ao ano, se não houver condições limitantes. O cultivo é realizado em praticamente todas as regiões do Brasil, possibilitando alcançar até três safras anuais (Conab, 2020).

A cultura do feijão é sensível ao estresse hídrico e à elevadas temperaturas e é exigente em nutrientes (SANT'ANA; SANTOS; SILVEIRA, 2011; SANTOS *et al.*, 2015). É bastante vulnerável às mudanças de disponibilidade hídrica, respondendo imediatamente a algum estresse hídrico que venha a sofrer, porém,

destaca-se sua maior tolerância a esse tipo de estresse nos estádios V3 e V4, e que a partir do estágio R8, a restrição hídrica passa a ser benéfica, pois nesse estágio, as vagens já se encontram com os grãos cheios, dando início ao período de maturação e secagem (SANTOS *et al.*, 2015).

O feijão vermelho é muito consumido no estado de Minas Gerais, sendo amplamente cultivado pelos produtores locais. Essa cultivar é resistente aos patógenos causadores da antracnose, mancha-angular e ferrugem, possui tipo de crescimento indeterminado e porte semiereto (SANTOS *et al.*, 2015). De acordo com a Conab (2020), a produção nacional de feijão no país na safra 2019/2020 foi de 3,07 milhões de toneladas, cerca de 1,9% superior à produção observada na safra anterior.

A variabilidade climática e o manejo inadequado têm afetado a produção do feijão nas principais regiões de cultivo, destacando-se a escassez cada vez mais acentuada de recursos hídricos (VIEIRA *et al.*, 2020), exigindo assim, que as plantas, cada vez mais, apresentem maior rendimento com uma quantidade menor de água disponível. Desta forma, ferramentas como sistemas de irrigação e seu manejo

adequado, tornam-se um fator importante para ganhos de produtividades das culturas (SOUZA *et al.*, 2017).

As variáveis climatológicas afetam de forma direta o desenvolvimento da cultura e a precipitação ganha destaque por ser um dos fatores limitantes (VIEIRA *et al.*, 2020), uma vez que a irregularidade na distribuição das chuvas ao longo do ano restringe o cultivo ao período de maior oferta de água, inviabilizando o cultivo em outras épocas, pois mesmo possuindo grande adaptabilidade climática, a cultura possui períodos críticos, nos quais a falta de água proporciona grande redução no rendimento, como na fase reprodutiva, que é um período que exige maior demanda hídrica (FERNANDES *et al.*, 2015).

Uma alternativa para auxiliar no manejo das culturas e na previsão da produtividade, é o uso de modelos de simulação de produtividade. Os modelos matemáticos têm fundamental importância no estudo sobre a resposta da planta a diferentes condições, envolvendo assim, a visualização de cenários que podem ajudar os pesquisadores na busca por caminhos mais resilientes de produção a fim de assegurar a segurança alimentar, o desenvolvimento de bons planejamentos e manejos de safras, a verificação de riscos de perdas na produtividade em casos de estresse nutricional ou ataque de pragas e doenças, entre outros (HOLZWORTH *et al.*, 2015). Nesse sentido, testes e adaptações são necessárias, pois a variabilidade da produtividade depende em grande parte das condições climáticas, que podem ser particularmente alteradas pelas mudanças climáticas (LECERF *et al.*, 2019), diferentes cenários e características genéticas da cultura utilizada (PICHENY *et al.*, 2017; YIN, VAN DER LINDEN, STRUIK, 2018). É importante destacar que a calibração e validação de modelos que simulam a produtividade das culturas, é essencial para avaliar com certa margem de segurança, seu desempenho em diferentes cenários (HE *et*

al., 2017).

O *AquaCrop* é um software de simulação de crescimento e produtividade de culturas que vem sendo largamente utilizado (RAES *et al.*, 2012). Foi desenvolvido pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), sendo um programa robusto que utiliza diversos parâmetros e coeficientes para calcular o manejo da cultura e representar o campo de uma forma mais próxima do real possível.

Inúmeras pesquisas foram desenvolvidas fazendo o uso do *AquaCrop* com dados de manejo agrícola para diversas culturas em diferentes países, no entanto, estudos de calibração e validação do modelo para as condições edafoclimáticas brasileiras, sobretudo para a cultura do feijão, ainda são escassos. Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi realizar um ajuste inicial do software de manejo *AquaCrop* para a cultura do feijão, analisando os coeficientes obtidos nesse ajuste, comparando assim, o desempenho da cultura simulado com o observado em campo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado entre os meses de julho e outubro, na Estação Experimental de Coimbra, MG, dependência da Universidade Federal de Viçosa, localizada na Zona da Mata de Minas Gerais, nas coordenadas 20° 45' S de latitude e 42° 5' W de longitude e com 698 m de altitude.

O tipo de solo foi classificado como Argissolo Vermelho amarelo distrófico, fase terraço, com textura argilosa (ANDRADE *et al.*, 2005). A umidade de capacidade de campo em unidade de volume foi de 43,5%, o ponto de murcha foi de 22,8% e a condutividade hidráulica de 236,1 mm dia⁻¹. Nas simulações, considerou-se as camadas de solo 0 – 20 cm e 20 – 40 cm e um esgotamento admissível da RAW (Água prontamente disponível) de 12 mm. O solo e

a água utilizados não apresentavam problemas de salinidade, uma vez que a condutividade elétrica do solo foi de 0,058 dS m⁻¹.

Na semeadura, o manejo de adubação foi feito seguindo as recomendações de Chagas *et al.* (1999), sendo realizada mecanicamente utilizando 14 sementes por metro. Realizou-se uma adubação no plantio com NPK 8-28-16, empregando-se uma dosagem de 348 kg ha⁻¹. A adubação de cobertura foi feita com ureia, utilizando uma dosagem de 200 kg ha⁻¹.

O período em que foi realizado o cultivo foi característico de inverno, com transição para a primavera, com temperaturas baixas na fase de germinação/emergência e fase vegetativa, e temperaturas mais elevadas na fase de florescimento e maturação. Esse período caracterizou-se pela baixa frequência de chuvas na região. Assim, foi necessário realizar irrigações frequentes, com um intervalo variando de 2 a 3 dias durante todo o ciclo do feijoeiro.

Foi registrada ainda incidência de chuvas durante o período de inverno, mas representada como um caso isolado, uma vez que as chuvas vieram com maior frequência após o período de colheita.

Foram realizados ensaios caracterizados por quatro lâminas de irrigação distintas: L1 = 239 mm; L2 = 310 mm; L3 = 322 mm e L4 = 386 mm. A irrigação foi realizada por meio de um sistema de pivô central convencional de uma torre, com capacidade para irrigar uma área de 2 ha, com intensidade de aplicação de 2 mm h⁻¹ e sem a observação de ocorrência de escoamento superficial.

O manejo da irrigação foi iniciado com base no desenvolvimento da planta. A diferenciação das lâminas foi feita a partir do final do estágio vegetativo de desenvolvimento do feijoeiro.

O feijoeiro foi cultivado no sistema de plantio direto. A irrigação foi feita

calculando a evapotranspiração da cultura e aplicando o déficit correspondente ao período que o cultivo ficou sem receber lâmina de irrigação ou ocorrência de precipitação.

O acompanhamento da necessidade hídrica da cultura foi determinado por meio de dados de clima, juntamente, com as equações de determinação da evapotranspiração de referência apresentada por Allen *et al.* (1998) e evapotranspiração da cultura apresentada por Bernardo *et al.* (2006). A disponibilidade de água no solo foi monitorada através da determinação da umidade do solo. Para obtenção de dados de clima, utilizou-se uma estação meteorológica automática próxima ao cultivo, que fornecia dados diários de temperatura máxima, média e mínima do ar (°C), radiação solar (W m⁻²), umidade relativa do ar média (%), velocidade do vento média (m s⁻¹) e precipitação (mm). As amostragens de umidade do solo foram feitas semanalmente e, em seguida, a análise das amostras foi conduzida conforme o método padrão de estufa.

Também, foi realizado o acompanhamento periódico do Índice de Área Foliar da cultura e da biomassa seca. Utilizou-se a Equação 1, proposta por Hsiao *et al.* (2009), para obter a estimativa da cobertura do dossel por meio de dados de área foliar observados.

$$CC = 1,005[1 - \exp(-0,6LAI)]^{1,2} \quad (1)$$

Em que:

CC: é a cobertura do Dossel, %; e

LAI: é o Índice de Área Foliar.

Para a simulação, utilizou-se o software *AquaCrop* (Versão 4.0) de junho de 2012. A entrada de dados climáticos do período de cultivo do feijoeiro no *AquaCrop* foi realizada com o auxílio do software *ETo Calculator*. Nos dados de manejo e tratos culturais, foi incluído a cobertura do solo com matéria orgânica em 90% da área

experimental. Nos dados de cultura, adotou-se profundidade radicular mínima de 0,10 m e máxima de 0,40 m; temperatura basal de 10 °C e máxima de 30 °C; adotou um K_{CTR} (coeficiente da cultura quando a cobertura do dossel é completo e a cultura está em um estágio anterior à senescência) 1,10; efeito da temperatura elevada na polinização, como limite máximo tolerante de 32 °C e sem problemas de salinidade nas parcelas experimentais. Inicialmente, não foi feito nenhum ajuste nos índices de produtividade e forma de crescimento da cultura.

Os parâmetros conservativos não conhecidos do feijão foram obtidos na simulação através do método de tentativa e erro, tendo como auxílio, os dados observados em campo de biomassa, cobertura do dossel e produtividade.

Avaliou também o índice de produtividade da água (WP – *Water Productivity*), que representa a relação entre a produtividade dos grãos e a quantidade de água total aplicada; IWP (*Irrigation Water Productivity*), que representa a relação entre a produtividade de grãos e a água aplicada somente por meio da irrigação, eliminando assim, a quantidade de chuva ocorrida; e EWP (*Evapotranspiration Water Productivity*) que é a relação da produtividade com a evapotranspiração da cultura (ALI; TALUKDER, 2008).

Para avaliar o resultado das simulações, utilizou-se um modelo de eficiência – Ef (Equação 2) dos dados medidos em relação aos observados em campo, raiz do erro quadrático relativo – RMSE (Equação 3) de acordo com Loague e Green (1991), e um índice de concordância – d (Equação 4) proposto por Willmott (1982).

$$Ef = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)^2} \quad (2)$$

Em que:
Ef: é a eficiência;

O_i: são os valores observados;
S_i: são os valores simulados; e
MO: é a média dos valores observados.

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0,5} \cdot \frac{100}{M} \quad (3)$$

Em que:
RMSE: é a raiz do erro quadrático relativo, %;
P_i: são os valores simulados;
O_i: são os valores observados;
n: é o número de observações; e
M: é a média dos valores observados.

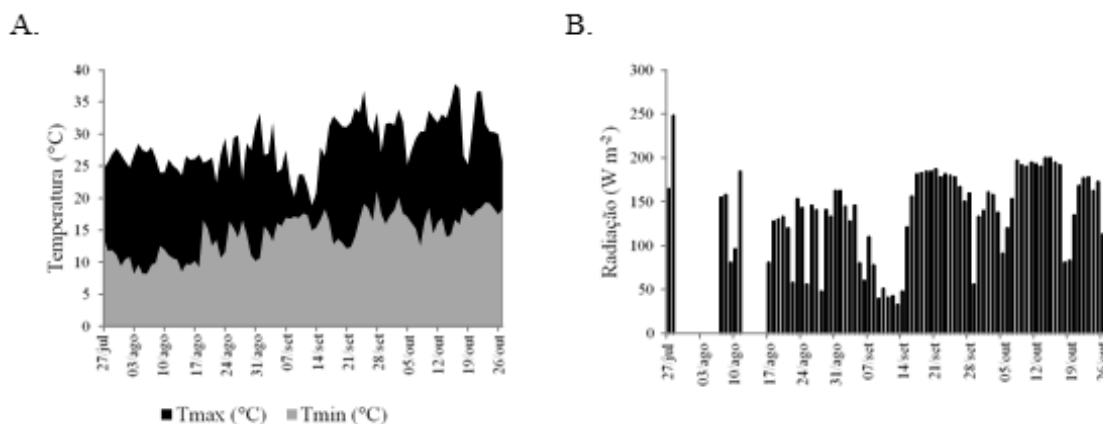
$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right] \quad (4)$$

Em que:
d: é o índice de concordância;
P'_i = P_i – M, sendo M a média dos valores observados
O'_i = O_i – M.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A temperatura máxima média para os meses de agosto, setembro e outubro de 2015 foram, respectivamente, 26,4; 28,3 e 31,4°C; a mínima média, seguindo a mesma ordem, foi de 11,5; 15,8 e 17,1°C; a radiação média para esse período foi de 120,3; 126,2 e 157,8 W m⁻², respectivamente (Figura 1). Os valores de radiação nos dois primeiros meses de cultivo estão abaixo do ideal para o feijoeiro. Segundo Heinemann, Stone e Silva (2009), essa faixa varia entre 150 – 250 W m⁻². Os baixos valores de radiação, acompanhados das baixas temperaturas, propiciam uma faixa de calor para o desenvolvimento desta cultivar de feijão, que apresenta uma temperatura basal de 10 °C, ótima de 21 °C e máxima de 30 °C.

Figura 1. Variação da temperatura do ar máxima e mínima (A) e da radiação solar (B) no período de 27 de julho a 27 de outubro de 2015. Viçosa, MG.



Na fase final de florescimento, foi registrado valores de temperatura máxima acima de 35 °C, o que pode ter provocado o abortamento de algumas flores que ainda estavam abertas à polinização e algumas vagens recém formadas, prejudicando assim parte da produção de grãos da planta. Heinemann, Stone e Silva (2009) afirmam que temperaturas máximas do ar acima de 35°C e mínima acima de 25°C provocam abscisão de flores e vagens pequenas.

A evapotranspiração da cultura (ETc) desse período, de acordo com a metodologia de Allen *et al.* (1998), apresentou valores médios para os respectivos meses de agosto, setembro e outubro de: 2,28; 2,68 e 3,65 mm dia⁻¹. De

acordo com o exposto por Heinemann, Stone e Silva (2009), o consumo de água para o feijão no estado de Minas Gerais varia entre 3,20 mm dia⁻¹ na região sul e 5,00 mm dia⁻¹ na região norte.

Na Tabela 1, é possível observar a quantidade de água aplicada em cada tratamento juntamente com a chuva e a precipitação efetiva. Nota-se que os valores de lâmina aplicados variaram entre os limites requeridos pela cultura, que é de 300 a 500 mm (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Houve uma maior precipitação efetiva na parcela de déficit devido ao solo estar mais seco. Com isso, maior parte da água precipitada ficava retida no perfil de extração de água pelas raízes.

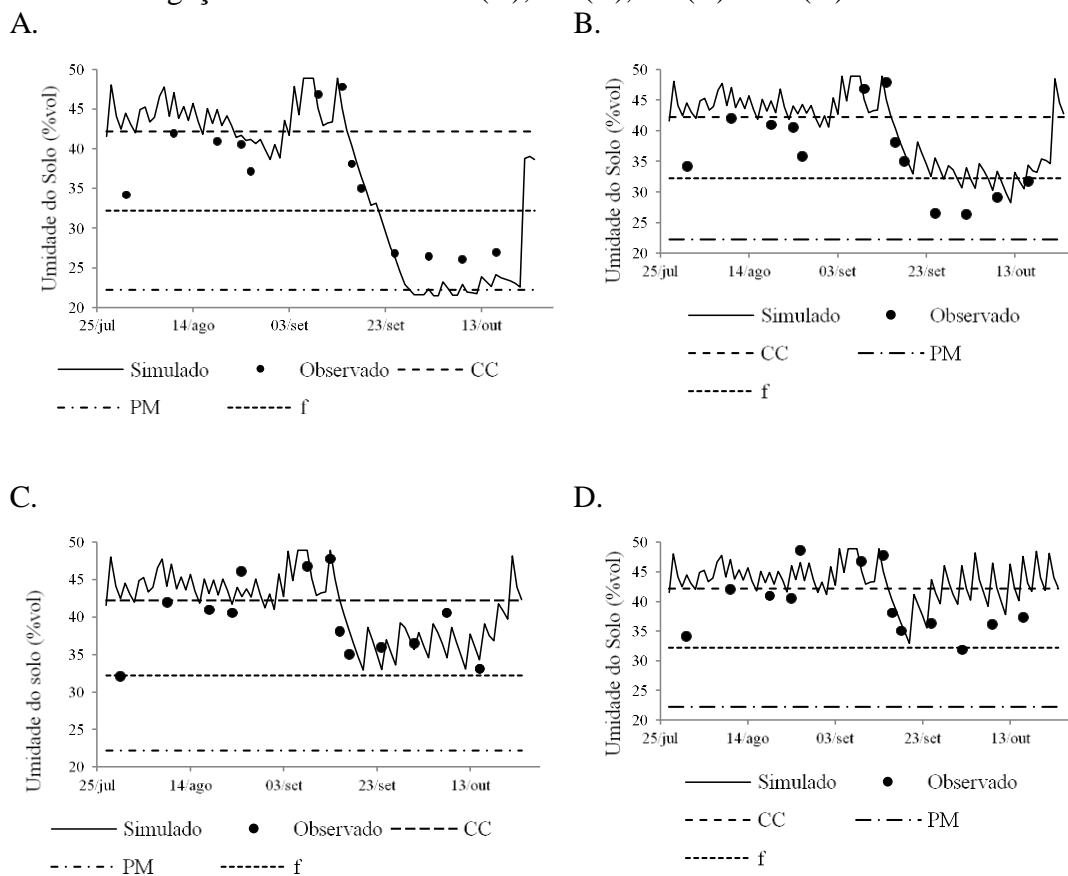
Tabela 1. Quantidade de lâmina aplicada, precipitação efetiva e não efetiva de acordo com cada tratamento.

Tratamentos	Lâmina de irrigação aplicada	Precipitação não efetiva	Precipitação efetiva	Total de água aplicada
L1	175,8	83,7	63,2	322,7
L2	256,0	93,5	53,4	402,9
L3	272,3	97,3	49,6	419,2
L4	345,9	106,9	40,0	492,8

O teor de umidade do solo acompanhado de cada lâmina foi comparado

ao estimado pelo *AquaCrop*, como mostra a Figura 2.

Figura 2. Umidade do solo medida e simulada pelo AquaCrop nos métodos de determinação da irrigação do tratamento L1 (A), L2 (B), L3 (C) e L4 (D).



O tratamento L1 apresentou maior eficiência e índice de concordância, e o L3 o menor erro com os dados simulados, semelhante ao estimado pelo programa e concordando com o proposto no *AquaCrop*, que utiliza o mesmo método proposto por

Allen *et al.* (1998) para calcular a demanda de ETo e o balanço de água no solo. O L4 apresentou maior diferença entre os dados simulados e os medidos, pois excedeu a quantidade de água aplicada (Tabela 2).

Tabela 2. Eficiência (Ef), raiz do erro quadrático relativo (RMSE) e índice de concordância (d) dos valores simulados e os medidos da umidade do solo.

Tratamentos	Ef	RMSE	d
L1	0,688	18,337	0,937
L2	0,514	24,854	0,790
L3	0,503	16,325	0,830
L4	0,899	29,021	0,532

Os valores de “d” aqui apresentados concordam com os expostos por Coorevits (2010), que estudou a parametrização do *AquaCrop* para o feijão nas condições de clima da Bélgica.

O ajuste das condições locais de cultivo e de cada irrigação feito no *AquaCrop* resultou nos índices apresentados na Tabela 3. Esses valores diferiram dos valores observados na produtividade e

rendimento da cultura, tendo em vista que houve uma resposta isolada para cada regime hídrico.

Tabela 3. Índices utilizados no *AquaCrop* para ajuste de simulação do crescimento e produtividade do feijoeiro para as condições de cultivo e irrigação.

Parâmetros avaliados	L1		L2		L3		L4	
	Med*	Est**	Med*	Est**	Med*	Est**	Med*	Est**
Biomassa (Kg ha ⁻¹)	4976	4968	5033	5062	6620	6641	6699	6687
Biomassa potencial		6413		5879		7712		8284
Produtividade (Kg ha ⁻¹)	2160	2137	2437	2427	3355	3340	3421	3454
GD (°C) ¹		980,2		980,2		980,2		980,2
Evaporação (mm dia ⁻¹)		38,3		45		38,3		38,3
Transpiração (mm dia ⁻¹)		116,8		141,3		150,5		141,7
Lâmina infiltrada (mm)		312,6		383,6		401,6		464,6
Lâmina drenada (mm)		167,6		196,2		210,1		276,5
EWP (kg m ⁻³) ²		1,38		1,4		1,77		1,93
WP (g m ⁻²) ³		11,0		9,9		12,0		12,8
HI (%) ⁴		43,0		48,4		50,3		51,7
CCo (%) ⁵		1,32		1,21		1,25		1,29
CGC (% dia ⁻¹) ⁶		15,2		15,4		15,0		15,3
CDC (% dia ⁻¹) ⁷		20,3		17,9		12,0		12,2

¹GD: graus dias; ²EWP: índice de produtividade da água evapotranspirada na produção; ³WP: índice de produtividade da água aplicada durante o cultivo (chuva mais irrigação); ⁴HI: índice de colheita; ⁵CCo: taxa de crescimento do dossel inicial considerando 90% de emergência; ⁶CGC: taxa de crescimento vegetativo exponencial da cultura; ⁷CDC: taxa de declínio do desenvolvimento da cultura após atingir maturação e iniciar a senescência. Med* – Medido, Est** - Estimado

A relação da biomassa potencial com o valor real oscilou entre 86% e 77%. Observa-se que a produtividade e a biomassa foram correspondentes à quantidade de lâmina aplicada. Os graus dias e a evaporação foram os mesmos para todos, pois a cultivar de feijoeiro utilizada para os tratamentos foi a mesma, e o sistema de irrigação utilizado também foi por meio de pivô central, ou seja, a porcentagem de área molhada foi igual e a cobertura vegetal utilizada no solo foi constante em todas as parcelas.

O valor de graus-dias (GD) observado para o feijoeiro foi de 980 °C em todo ciclo (Tabela 3), pois houve predominância de temperaturas amenas em

dois dos três meses de cultivo. Renato (2013) encontrou valor de graus-dia para o feijoeiro de 1.300° em um ciclo de 100 dias para temperaturas predominantemente elevadas. Lopes (2006), em um cultivo de feijão no qual a temperatura máxima durante o ciclo foi em torno de 29 °C, encontrou resultados em torno de 1.000 graus-dia.

A transpiração diferiu entre os tratamentos devido à diferença na quantidade de água disponível. No tratamento L4, apesar de ter sido onde se aplicou maior quantidade de água, houve uma menor transpiração do que no L3, pois a planta possui uma tolerância máxima da transpiração em relação à irrigação. O valor médio diário da transpiração concordou com

o intervalo apresentado por Ogindo e Walker (2004) quando os autores avaliaram a eficiência da transpiração em um feijoeiro comum.

Em relação à lâmina infiltrada e drenada, percebeu-se que houve maior retenção de água no perfil de solo no tratamento do L4, refletindo diretamente nos dados de índices de produtividade da água irrigada, quando se considera somente as lâminas de irrigação (IWP) e considerando a irrigação mais a chuva (WP) (Tabela 4),

balanceando assim, a produtividade observada, com a quantidade de água utilizada, indicando que algumas vezes o excesso de água não necessariamente resulta em elevadas produtividades, pois quando essa ultrapassa a capacidade de retenção do solo no perfil estudado e é além da necessidade da cultura, pode não ser aproveitada, o que não é desejável quando se realiza o manejo de irrigação eficiente e adequado.

Tabela 4. Índices de produtividade da quantidade de água aplicada por meio da irrigação (IWP) e contabilizando irrigação mais a chuva (WP).

Tratamentos	IWP (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	WP (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)
L1	13,03	6,90
L2	13,56	9,90
L3	14,58	8,89
L4	12,33	8,05

O EWP (Tabela 3) foi proporcional à quantidade de lâmina aplicada, pois a disponibilidade de água favorece tanto a transpiração quanto a evaporação, no entanto, a relação não é linear, como pode ser observado. Quando a planta atinge o seu máximo de produtividade, a quantidade de água a mais que for aplicada se torna excesso e não é bem aproveitada pela planta, além do que, favorece o crescimento vegetativo, proporcionando elevada produção de biomassa, mas baixa produtividade de grãos (ALI; TALUKDER, 2008).

Observou-se que o tratamento L3 foi onde houve maior rendimento da aplicação de água convertida em produtividade, visto que essa lâmina supriu melhor a necessidade hídrica da cultura (Tabela 3). O comportamento dos índices calculados para o L1 decorreu provavelmente do estresse sofrido pela planta, pois houve baixa disponibilidade hídrica. Esse desempenho concorda com o apresentado por Hegab *et al.* (2014), que também observaram elevados valores de índice de produtividade em parcelas de déficit hídrico.

O feijoeiro responde positivamente

ao estresse hídrico, em termos de produtividade, quando aplicado no momento adequado. Quanto ao modo com que esse ocorre, a planta pode responder positivamente, quando esse for feito de forma gradual, ou negativamente, quando esse for repentino (ALI; TALUKDER, 2008). Portanto, apesar de não ter obtido produtividade elevada na parcela de déficit, em relação às outras parcelas, as plantas que sofreram estresse hídrico tiveram um rendimento equiparável às demais no uso da água.

Em relação à produtividade de grãos (WP), esse apresentou menores resultados no L1 devido ao momento em que a fase de déficit hídrica foi iniciada, logo após a fase vegetativa. Houve aumento do WP no L2 devido ao maior suprimento hídrico (Tabela 3).

A fase reprodutiva do feijoeiro requer boa disponibilidade hídrica para uma produção efetiva, o que vai refletir diretamente na produção final de grãos. No entanto, se esse estresse tivesse ocorrido na fase vegetativa, em torno dos estádios V3 e V4, a resposta poderia ser positiva em

termos de estrutura da planta e aproveitamento da água aplicada, pois são nesses estádios, que a planta não diminui seu desempenho devido à baixa disponibilidade de teor de água no solo (SANTOS *et al.*, 2015).

No L4 também se observa um baixo índice, apesar de considerável produtividade. Tal fato pode implicar em uma relação custo/benefício baixa, em que o custo obtido com a irrigação e todo funcionamento do sistema não é vantajoso em relação à produtividade que se vai obter.

O WP obtido nesse trabalho foi inferior ao encontrado por Yuan *et al.* (2013), que cultivaram o feijoeiro e outras espécies C3 em clima semiárido, essa diferença ocorreu devido às diferenças nas características climáticas entre as regiões dos trabalhos comparados.

O CCo e o CGC foram semelhantes entre os tratamentos em relação ao observado devido no início do cultivo, ter sido aplicada a mesma quantidade de água até o aparecimento do primeiro trifólio para formação de um bom *stand* de plantas e também em virtude da ocorrência de consideráveis chuvas nessa fase, o que

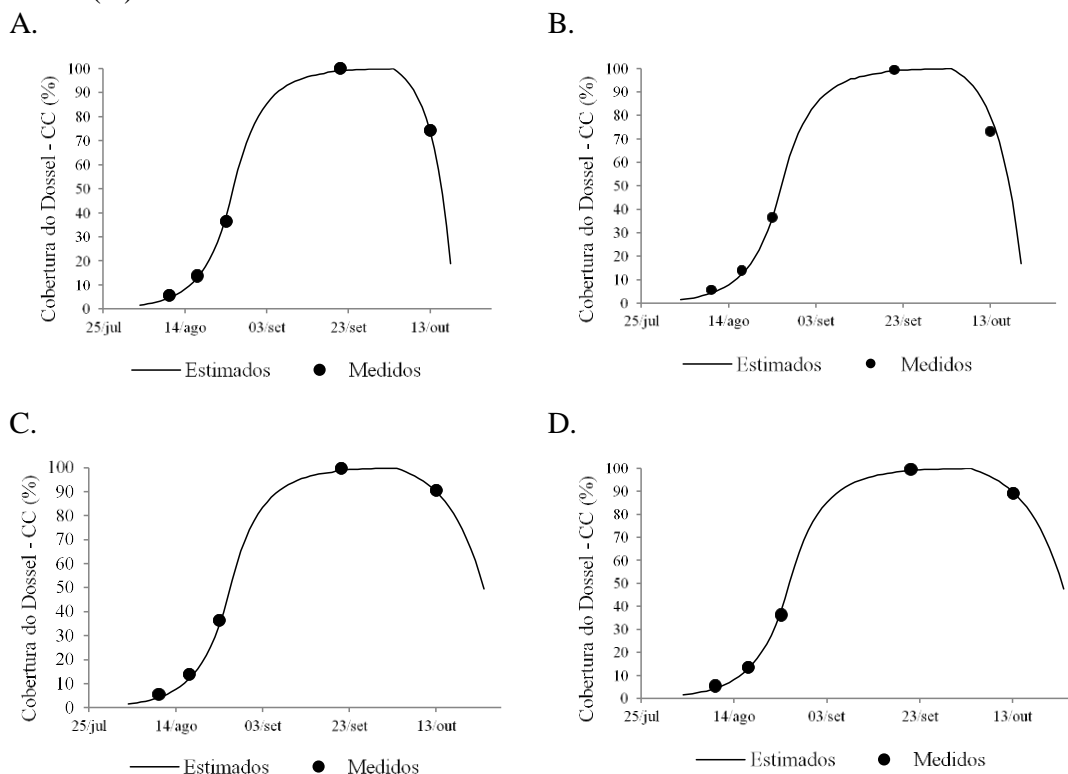
uniformizou o crescimento inicial.

Com o CDC, se observa que na parcela em que houve melhor disponibilidade de água, como o L1 e L2, o declínio da cultura foi mais lento, verificando-se que essas chegaram próximo de cumprir todo seu ciclo fenológico. A senescência mais rápida é atribuída a um ciclo curto devido à restrição de água, nesse caso. Isso pode resultar em menor produtividade ou grãos de qualidade inferior.

Os valores de CGC foram superiores aos encontrados por Yuan *et al.* (2013), visto que a produção de grãos foi menor que a obtida por esses autores e a produção de biomassa ligeiramente maior. O valor de CDC também foi menor que o simulado, logo, o feijoeiro cultivado pelos autores supracitados, teve uma maturidade e senescência mais duradoura do que o aqui estudado.

Foi possível observar a comparação do desenvolvimento da cultura através de dados simulados e medidos da cobertura do dossel para cada regime de irrigação, apresentada na Figura 3.

Figura 3. Cobertura do dossel simulada e observada nas lâminas L1 (A), L2 (B), L3 (C) e L4 (D).



L1 – 175,8 mm, L2 – 256 mm, L3 – 272 mm e L4 – 345,9 mm.

Com o ajuste, obteve-se valores confiáveis entre o simulado e o observado, verificando se valores de eficiência e concordância entre os dados de 0,99 e erro

variando entre 1 e 6%, o que segundo Jamieson, Porter e Wilson (1991), é considerado como uma excelente simulação (Tabela 5).

Tabela 5. Eficiência (Ef) dos valores simulados em comparação com os dados medidos, raiz do erro quadrático relativo (RMSE) e índice de concordância (d) da cobertura do dossel.

Tratamentos	Ef	RMSE (%)	d
L1	0,999	2,146	0,999
L2	0,992	4,738	0,998
L3	0,998	3,496	0,999
L4	0,999	1,771	0,999

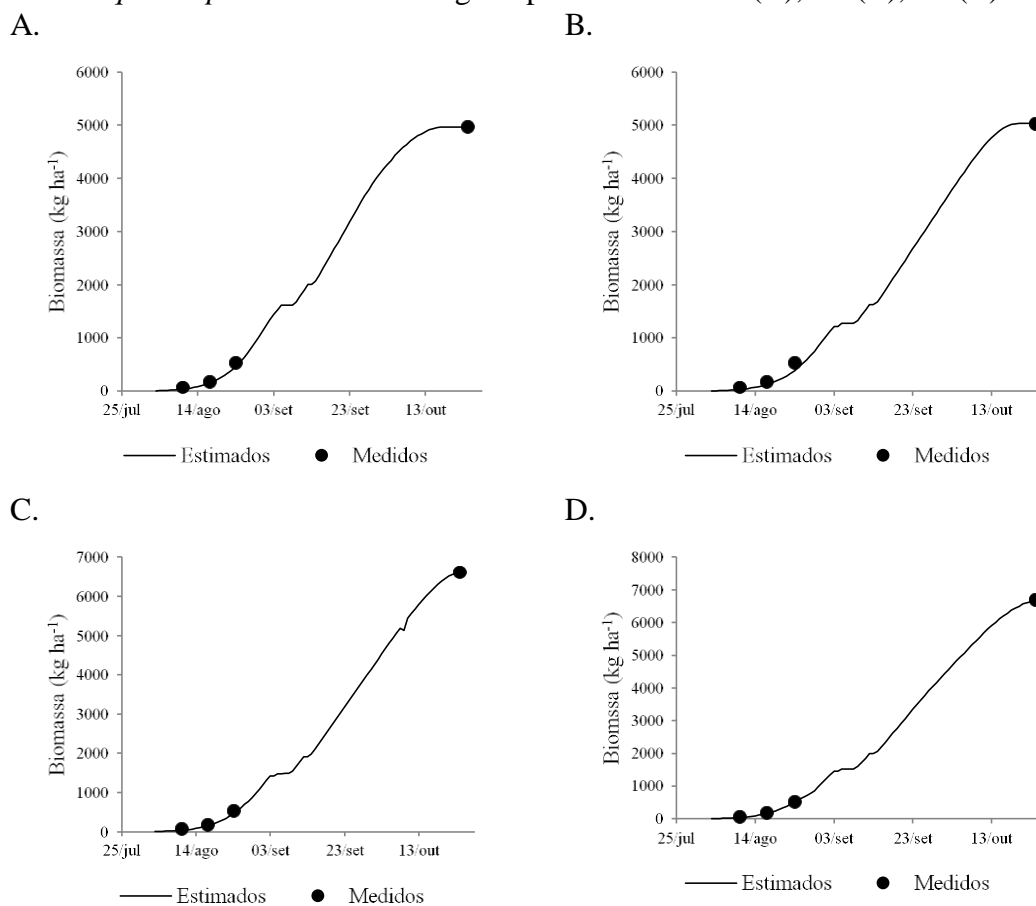
A biomassa observada apresentou comportamento diferente da simulada, visto que o programa considera o acúmulo de massa seca como contínuo e crescente, enquanto na realidade, há diminuição no valor no final do ciclo devido ao feijoeiro perder massa no período em que a vagem

com os grãos seca e esses atingem o ponto de umidade adequada para colheita.

Observou-se na Figura 4, que nos tratamentos L1 e L2, o ciclo da cultura foi mais curto. Houve um acúmulo repentino de biomassa, seguido de diminuição gradativa, provavelmente devido ao estresse hídrico

aplicado. Enquanto no L3 e L4, o acúmulo é foi mais lento, atingindo o pico de biomassa acumulada tardiamente.

Figura 4. Diferença de comportamento entre a biomassa medida no campo e a estimada pelo *AquaCrop* no tratamento irrigado pelas lâminas L1 (A), L2 (B), L3 (C) e L4 (D).



L1 – 175,8 mm, L2 – 256 mm, L3 – 272 mm e L4 – 345,9 mm.

Os tratamentos L3 e L4 apresentaram um comportamento mais próximo ao estimado pelo programa, sugerindo que quanto maior a quantidade de água aplicada, mais a planta conseguirá cumprir os seus estádios fenológicos completamente e os resultados de crescimento da cultura observado no campo se aproxima do

modelado pelo programa. Os que receberam menor quantidade de água, tiveram um crescimento mais acelerado e acentuado, com uma maior queda de biomassa no estágio final de produção, apresentando assim, maior variação com o valor simulado, como indicado na Tabela 6.

Tabela 6. Eficiência (Ef) dos valores simulados em comparação com os valores medidos, Raiz do erro quadrático relativo (RMSE) e índice de concordância (d) para a biomassa.

Tratamentos	Ef	RMSE (%)	d
L1	0,638	66,906	0,862
L2	0,613	70,858	0,836
L3	0,819	53,703	0,935
L4	0,885	38,958	0,963

O tratamento L1 apresentou menor eficiência e maior RMSE devido ao maior desvio dos pontos simulados com medidos no estágio da floração até a maturação.

No trabalho de Hsiao *et al.* (2009), feito com a cultura milho, houve maior concordância com os dados obtidos e os simulados nos ganhos de biomassa, visto que a curva de acúmulo de biomassa dessa cultura acompanha o estimado pelo programa. Os dados apresentados por Coorevits (2010) para a cultura do feijoeiro se aproximam do observado nesse ajuste.

6 CONCLUSÃO

O monitoramento do crescimento e desenvolvimento do cultivo do feijão é possível de ser realizado com o software *AquaCrop*, conforme a aplicação dos índices adequados.

A cobertura do dossel foi o parâmetro que apresentou melhor ajuste ao modelo proposto pelo *AquaCrop*. O mesmo não foi observado para o parâmetro ganho de biomassa.

A estimativa de umidade no solo através do *AquaCrop* foi mais próxima da observada no campo quando a umidade estava próxima da capacidade de campo.

É necessário o desenvolvimento de outros estudos para condições brasileiras e a adaptação dos modelos propostos pelo programa com os dados observados em campo.

7 REFERÊNCIAS

- ALI, M. H.; TALUKDER, M. S. U. Increasing water productivity in crop production – A synthesis. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, n. 1, p. 1201-1213, 2008.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ANDRADE, C. A. B.; FONTES, P. C. R.; CARNEIRO, J. E. S.; CARDOSO, A. A. Avaliação de critérios de recomendação de adubação sobre a produtividade de cultivares de feijão. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, Maringá, v. 27, n. 2, p. 281-285, 2005.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D.D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9^a. ed. Viçosa-MG: Editora UFV, 2006. 545 p.
- CHAGAS, J. M.; BRAGA, J. M.; VIEIRA, C.; SALGADO, L. T.; JUNQUEIRA NETO, A.;

ARAÚJO, G. A. A.; ANDRADE, M. J. B.; LANA, R. M. Q.; RIBEIRO, A. C. Feijão. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. 1 ed. UFV (Viçosa): UFV, 1999. Capítulo 18.4.8, p. 306-307.

COÊLHO, J. D. Produção de grãos – feijão, milho e soja. **Caderno Setorial ETENE**, Brasília, v. 3, n. 51, p. 1, 2018.

Feijão. **Acompanhamento da Safra Brasileira: grãos**. Brasília, DF, v. 7, n. 9, p. 30-39, 2020. Safra 2019/2020, Nono levantamento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/safra/gaos/boletim-da-safra-de-graos?start=10>. Acesso em: 10, ago, 2020.

COOREVITS, L. **Calibration and validation of green beans for the AquaCrop model**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Crop response to water**. Roma: FAO, 1979. 194p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

FERNANDES, F. B. P.; LACERDA, C. F.; ANDRADE, E. M.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C. Efeito de manejos do solo no déficit hídrico, trocas gasosas e rendimento do feijão-decorda no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 3, p. 506-515, 2015.

HE, L.; CHEN, J. M.; LIU, J.; BÉLAIR, S.; LUO, X. Assessment of SMAP soil moisture for global simulation of gross primary production. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, Washington, v. 122, n.1, p. 1549-1563, 2017.

HEGAB, A. S. A.; FAYED, M. T. B.; HAMADA, M. M. A.; ABDREBBO, M. A. A. Productivity and irrigation requirements of faba-bean in North Delta of Egypt in relation to planting dates. **Annals of Agricultural Sciences**, Cairo, v. 59, n. 2, p. 185-193, 2014.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; SILVA, S. C. Cultivos Temporários: Feijão. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Organizador). **Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília – DF: INMET, 2009. p. 183-203.

HOLZWORTH, D. P.; SNOW, V.; JANSSEN, S.; ATHANASIADIS, I. N.; DONATELLI, M.; HOOGENBOOM, G.; WHITE, J. W.; THORBURN, P. Agricultural production systems modelling and software: current status and future prospects. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdã, v. 72, n. 1, p. 276-286, 2015.

HSIAO, T. C.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parametrization and testing for maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 3, p. 448-459, 2009.

JAMIESON, P. D.; PORTER, J. R.; WILSON, D. R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field Crops Research**, Amsterdã, v. 27, n. 1, p. 337-350, 1991.

- LECERF, R.; CEGLAR, A.; LÓPEZ-LOZANO, R.; VAN DER VELDE, M.; BARUTH, B. Assessing the information in crop model and meteorological indicators to forecast crop yield over Europe. **Agricultural Systems**, Hamilton, v. 168, n.1, p. 191-202, 2019.
- LOAGUE, K.; GREEN, R. E.; Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdã, v. 7, n. 1, p. 51-73, 1991.
- LOPES, A. S. **Manejo do solo e da irrigação na cultura do feijoeiro sob pivô central**. 2006. Tese (Doutor em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal.
- MOURA A. D.; BRITO, L. M. Aspectos Socioeconômicos. In: CARNEIRO, J. E.; PAULA JUNIOR, T. J.; BORÉM, A. (Ed). **Feijão do Plantio a Colheita**. Viçosa -MG: UFV, 2015.16-36p.
- OGINDO, H. O.; WALKER, S. The determination of transpiration efficiency coefficient for common bean. **Physics and Chemistry of the Earth**, United Kingdom, v. 29, n. 1, p. 1083-1089, 2004.
- PICHENY, V.; CASADEBAIG, P.; TRÉPOS, R.; FAIVRE, R.; SILVA, D.; VINCOURT, P.; COSTES, E. Using numerical plant models and phenotypic correlation space to design achievable ideotypes. **Plant, Cell & Environment**, Edinburgh, v. 40, n.9, p. 1926-1939, 2017.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.; FERERES, E. **FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water: AquaCrop: version 6.0- 6.1: reference manual**. Rome: FAO, 2012. 19p.
- RENATO, N. S. **Modelo de crescimento das culturas do milho e do feijão em condições de temperatura e CO2 atmosféricos elevados**. 2013. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) -Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- SANT’ANA, E. V. P.; SANTOS, A. B.; SILVEIRA, P. M. Eficiência de uso de nitrogênio em cobertura pelo feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 458-462, 2011.
- SANTOS, J. B.; GAVILANES, M. L.; VIEIRA, R. F.; PINHEIRO, L. R. Botânica. In: CARNEIRO, J. E.; PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão: do plantio a colheita**. 1 ed. UFV (Viçosa): UFV, 2015. Capítulo 3, p. 37-66.
- SOUZA, P. J. D. O. P.; FARIAS, V. D. D. S.; LIMA, M. J. A. D.; RAMOS, T. F.; SOUSA, A. Cowpea leaf area, biomass production and productivity under different water regimes in Castanhal, Pará, Brazil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 1, p. 748-759, 2017.
- VIEIRA, I. C. O.; NUNES, H. G. G. C.; SOUSA, D. P.; COSTA, D. L. P.; PINTO, J. V. N.; FARIAS, V. D. S.; FERREIRA, B. G.; TEIXEIRA, E. O.; MARTINS, C. G. D.; SILVA, M. Y.F.; SOUZA, P. J. O. P. Uso do modelo AquaCrop para o feijão-caupi cultivado sob

diferentes lâminas de irrigação em Castanhal-PA. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 27, n. 1, p.776-746, 2020.

WILLMOT, C. J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 63, n. 1, p. 1309-1313, 1982.

YIN, X.; VAN DER LINDEN, C.G.; STRUIK, P. C. Bringing genetics and biochemistry to crop modelling, and vice versa. **European Journal of Agronomy**, Amsterdã, v. 100, n. 1, p. 132-140. 2018.

YUAN, M.; ZHANG, L.; GOU, F.; SU, Z.; SPIERTZ, J. H. J.; VAN DER WERF, W. Assessment of crop growth and water productivity for five C3 species in semi-arid Inner Mongolia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 122, n. 1, p. 28-38, 2013.