

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DO TRIGO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

ROSA, S.L.K.¹; SOUZA J.L.M.²; TSUKAHARA, R.Y.³; SANTOS, A.A.¹; RITA, Y.L.¹

¹Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFPR; ²Professor, DSEA/SCA/UFPR, e-mail: jmoretti@ufpr.br; ³Fundação ABC

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho analisar o modelo AquaCrop para identificar os parâmetros conservativos e não conservativos mais sensíveis para a cultura do trigo, na Região dos Campos Gerais. Foi utilizada a cultivar TBIO Sinuelo no município de Ponta Grossa. Os parâmetros analisados são referente à fenologia e transpiração da cultura, produção de biomassa, formação de rendimento, estresse e manejo do solo. A análise de sensibilidade foi realizada variando individualmente cada parâmetro de entrada, permanecendo os demais fixos. Como critério de análise foi adotado o Índice de Sensibilidade Relativo (*IS*). Foi observado que os parâmetros mais sensíveis ao modelo são o índice de colheita de referência (HI_o), a produtividade da água normalizada para a evapotranspiração de referência (ET_o) e CO_2 (WP^*), o coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{CTR,x}$), os níveis de fertilidade e a máxima cobertura do dossel (CC_x). A maior sensibilidade do WP^* e HI_o deveu-se aos parâmetros estarem diretamente relacionados às duas principais equações do AquaCrop, as quais determinam a biomassa acumulada e formação de rendimento. É recomendado o ajuste dos parâmetros mais sensíveis por meio da calibração para a cultura do trigo, na Região dos Campos Gerais.

Palavras-chave: modelagem matemática; análise de sensibilidade; trigo; AquaCrop; Campos Gerais.

INTRODUÇÃO

O planejamento de cultivos agrícolas é uma questão estratégica importante. O uso de modelos de simulação permite prever safras e auxiliar no entendimento das interações resultantes do sistema solo-planta-atmosfera. São ferramentas que auxiliam na tomada de decisões e planejamento de lavouras, prevendo o potencial de produção das culturas em cenários distintos (FAO, 2000; Basso et al., 2013; Morell et al., 2016).

Os modelos podem ser classificados como conceituais, físicos e matemáticos (Pessoa et al., 1997; Silva et al., 2001). Os modelos matemáticos são representados por relações funcionais, parâmetros, variáveis e componentes. Por influenciar períodos críticos da cultura, o clima exerce influência direta na produtividade. Desta forma, modelos matemáticos de monitoramento agrometeorológico são muito utilizados na estimativa de rendimento de culturas agrícolas (Paloschi, 2016).

A acurácia de um modelo depende em grande parte dos parâmetros envolvidos, os quais descrevem as características resultantes dos dados de saída. A identificação dos parâmetros que mais influenciam os dados gerados é importante para reduzir as incertezas do resultado final (Andriolo et al., 2008; Salemi et al., 2011).

Os valores dos parâmetros de qualquer modelo estão sujeitos a alterações e erros (Pannell, 1997). A análise de sensibilidade é a investigação das mudanças que podem ocorrer. Logo, é o processo de análise que avalia o impacto provocado na saída do modelo, o que ocorre por variações feitas nos dados de entrada do programa (Marshall, 1999; Silva, 2002; Almeida, 2013; Lievens, 2014). A análise consiste em alterar os valores dos parâmetros de maneira individual mantendo os demais fixos, verificando a influência das variáveis nos resultados finais de produtividade. Devem ser submetidas à análise as variáveis sensíveis à penalização da produtividade potencial da cultura. Após a realização da análise de sensibilidade são obtidos os parâmetros mais sensíveis ao modelo, sendo estes na maioria das vezes utilizados no processo de calibração (Baltokoski et al., 2010; Cibin et al., 2010; Xing et al., 2017). Com o ajuste dos parâmetros é possível obter o máximo da potencialidade do programa.

A literatura é rica em exemplos de modelos de simulação voltados ao planejamento de cultivos agrícolas anuais. Dentre os inúmeros modelos recomendados, o AquaCrop tem obtido bons resultados em inúmeras situações experimentais (Piekarski, 2017). O AquaCrop é um modelo de crescimento de culturas desenvolvido pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) que simula a resposta ao rendimento de culturas herbáceas e é particularmente adequado para abordar condições em que a água é um fator chave limitante da produção agrícola (FAO, 2018). A principal vantagem do modelo deve-se ao menor número de parâmetros de entrada necessários, sendo dados de fácil obtenção (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2012; Piekarski, 2017).

Considerando a importância e abrangência do uso do modelo para a agricultura, teve-se por objetivo no presente trabalho analisar o modelo AquaCrop para identificar os parâmetros conservativos e não conservativos mais sensíveis para a cultura do trigo, na Região dos Campos Gerais.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado considerando a cultura do trigo, cultivado no município de Ponta Grossa, Estado do Paraná. O modelo AquaCrop (versão 6.0), desenvolvido por pesquisadores vinculados à *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (FAO, 2018) foi utilizado para as simulações de produtividade, em que foram realizadas análises de sensibilidade para avaliar os parâmetros conservativos e não conservativos do modelo. A cultivar de trigo avaliada foi a TBIO Sinuelo, cultivada no ano agrícola de 2014, plantada no dia 03/06/2014 e tendo duração do ciclo fenológico de 134 dias.

A área das parcelas experimentais possui relevo plano a suave ondulado, e o manejo adotado é plantio direto com cobertura vegetal residual. A classificação de solos na área foi previamente realizada pela Fundação ABC, sendo identificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico. A região tem clima Cfb, conforme a classificação climática de Köppen (Alvarez et al., 2013), e encontra-se localizada à 25,30° S de latitude, 49,95° W de longitude e 908 metros de altitude.

O procedimento inicial para utilização do AquaCrop consistiu na inclusão dos dados de entrada. Os dados referentes a clima, cultura e manejo foram provenientes do banco de dados da Fundação ABC, e os dados de solo foram obtidos da literatura (Piekarski et al., 2017).

Os dados de clima são da Estação Agrometeorológica instalada em Ponta Grossa. Foram inseridos no AquaCrop dados diários referentes à: precipitação (P ; mm dia⁻¹); temperatura máxima (T_x ; °C), mínima (T_n ; °C) e média (°C) diárias do ar; radiação solar incidente (R_s ; MJ m⁻² dia⁻¹); umidade relativa do ar (UR ; %); e, velocidade do vento (VT ; m s⁻¹) (Figura 1). O AquaCrop (versão 6.0) calcula automaticamente a ET_o (mm dia⁻¹) com o método de Penman-Monteith e dispõe internamente dos valores de concentração de CO₂ da atmosfera (ppm), obtidos do observatório de Mauna Loa, Havaí (Raes et al., 2009).

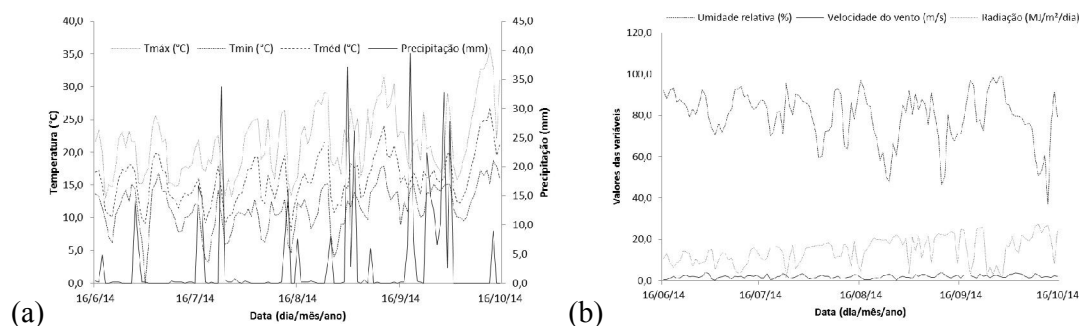


Figura 1. Dados climáticos provenientes da Estação Agrometeorológica de Ponta Grossa-PR: (a) Temperatura máxima, mínima e média do ar, e precipitação; e, (b) Umidade relativo, velocidade do vento e radiação solar incidente.

Por ser manejada adequadamente, a fertilidade do solo foi considerada não limitante ao desenvolvimento da cultura. A cobertura vegetal foi considerada fixa em 75% de resíduo de material orgânico. Na aba “práticas conservacionistas de superfície” foi considerado que o

manejo adotado nas áreas não afetou o escoamento superficial e que não há presença de plantas infestantes.

Foram consideradas três camadas de solo nas profundidades 0,00-0,10 m, 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m. Os dados de solo inseridos no programa foram levantados por Piekarski et al. (2017) e obtidos da literatura (Tabela 1). O AquaCrop contabiliza internamente a evaporação da camada superficial do solo, drenagem interna, percolação profunda, escoamento superficial e ascensão capilar. O conteúdo inicial de água no solo no início do plantio da cultura foi considerado no programa igual à capacidade de água disponível (*CAD*).

Tabela 1 – Atributos físico-hídricos da área experimental, localizada no município de Ponta Grossa-PR, inseridos para a análise de sensibilidade dos parâmetros do AquaCrop.

Localidade	Camada (m)	Textura	---- Conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ---			K_{sat} (mm dia^{-1})
			$\theta_{PMP}^{(1)}$	$\theta_{CC}^{(2)}$	$\theta_{sat}^{(3)}$	
Ponta Grossa	0,00 – 0,10	Argilo-arenosa	0,20	0,39	0,51	743,27
Ponta Grossa	0,10 – 0,25	Argilo-arenosa	0,20	0,35	0,50	732,57
Ponta Grossa	0,25 – 0,40	Argilo-arenosa	0,25	0,36	0,54	636,30

⁽¹⁾Umidade volumétrica ponto de murcha permanente; ⁽²⁾Umidade volumétrica capacidade de campo; ⁽³⁾Umidade volumétrica saturação.

Os valores atribuídos aos parâmetros referentes à cultura do trigo basearam-se em sugestões dispostas na literatura (Raes et al., 2017) e protocolos de dados da Fundação ABC. A profundidade mínima e máxima efetiva do sistema radicular foi considerada 0,1 m e 0,3 m, respectivamente, para contabilizar a área radicular nas profundidades avaliadas (0,00-0,40 m). A máxima cobertura do dossel (CC_x) foi considerada 85% e o índice de colheita de referência (HI_o) de 50%. O mínimo requerido para completa produção de biomassa foi contabilizado como $14\text{ }^\circ\text{C dia}^{-1}$. O estresse por salinidade não foi considerado. A calibração para o estresse por fertilidade do solo foi ajustada para as opções do programa, sendo elas: (i) condições de produção de biomassa próxima ao ideal; (ii) máxima cobertura do dossel próxima a cultura de referência (ausência de estresse) e; (iii) o declínio do dossel na estação foi considerado pequeno.

A análise de sensibilidade foi realizada para os parâmetros conservativos e não conservativos do modelo (Tabela 2), variando individualmente cada parâmetro de entrada, permanecendo os demais fixos. Como critério de análise foi adotando o Índice de Sensibilidade Relativo (*IS*), proposto por Silva et al. (2009) (Equação 1):

$$IS = \frac{I_{12} \cdot (R_1 - R_2)}{R_{12} \cdot (I_1 - I_2)} \quad (1)$$

Sendo: *IS* – índice de sensibilidade do modelo para os parâmetros de entrada (adimensional); R_1 – resultado obtido com o modelo para o menor valor de entrada; R_2 – resultado obtido com o modelo para o maior valor de entrada; R_{12} – média dos resultados obtidos com o menor e maior valor de entrada; I_1 – menor valor de entrada do parâmetro; I_2 – maior valor de entrada do parâmetro; I_{12} – média dos valores de entrada dos parâmetros.

O resultado da Equação 1 indica que quanto maior (em módulo) o índice obtido, mais sensível o modelo é ao parâmetro. Valores próximos a zero indicam que o modelo não apresenta sensibilidade. (Silva et al., 2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O índice de sensibilidade dos parâmetros do AquaCrop e seus respectivos *rankings* estão dispostos na Tabela 2. A maior sensibilidade foi encontrada para o índice de colheita de referência (HI_o ; %). No entanto, também mostraram-se fortemente sensíveis: coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{CTR,x}$; adimensional); produtividade de água normalizada para ET_o e CO_2 (WP^* ; $g\ m^{-2}$); máxima cobertura do dossel (CC_x ; %); e, níveis de fertilidade (Tabela 2 e Figura 2). A simulação foi realizada em período de ausência de déficit hídrico, para contabilizar a sensibilidade dos parâmetros em condições ideais de desenvolvimento da cultura.

O índice de colheita de referência (HI_o) foi o parâmetro que se mostrou mais sensível (Tabela 2; Figura 1.a). A sensibilidade do parâmetro deve-se a equação que determina a formação do rendimento da cultura em grãos (Equação 2):

$$Y = HI \cdot B \quad (2)$$

Sendo: Y – rendimento da cultura ($kg\ ha^{-1}$); B – biomassa acumulada ($kg\ ha^{-1}$); HI – índice de colheita da cultura (adimensional) (Steduto et al., 2009; Steduto et al., 2012).

Oliveira (2017) obteve índice de sensibilidade de 1,0002 para o HI_o . Na análise de sensibilidade de Xing et al. (2017) o HI_o ficou na terceira posição para o rendimento final de grãos, considerando simulação com entrada de água apenas por precipitação pluviométrica. Para Lievens (2014) a sensibilidade foi alta, tanto para soja quanto para milho doce. Steduto et al. (2012) considera que o HI_o é um parâmetro conservativo para a maioria das cultivares de alto rendimento, porém algumas cultivares podem necessitar de ajustes para melhores resultados no programa (Silvestro et al., 2017).

O fator de proporcionalidade da transpiração ($K_{CTR,x}$) apresentou a segunda maior sensibilidade no AquaCrop (Tabela 2; Figura 2.b). O $K_{CTR,x}$ é um fator que indica quando a cultura apresenta expansão completa do dossel ($CC = 1$) e não está em condição de estresse (Steduto et al., 2012). É um parâmetro conservativo e aproximadamente equivalente ao coeficiente basal da cultura na meia estação nos casos de completa expansão do dossel (Raes et al., 2012; Dalla Marta et al., 2016).

Tabela 2. Parâmetros avaliados na análise de sensibilidade com o AquaCrop, respectivos Índices de Sensibilidade (*IS*) e posição na qual cada parâmetro se torna mais ou menos sensível (*Ranking*) para a cultivar TBIO Sinuelo, no município de Ponta Grossa-PR.

Descrição	<i>IS</i>	<i>Ranking</i>
----- Fenologia da cultura (Dossel e zona Radicular) -----		
<i>CC_o</i> : Cobertura inicial do solo coberta com 90% de emergência de plântulas (%) ⁽²⁾	0,07117	10
<i>CC_x</i> : Máxima cobertura do dossel (%) ⁽³⁾	0,71581	5
<i>CDC</i> : Coeficiente de declínio do dossel (% dia ⁻¹) ⁽¹⁾	0,52488	7
<i>Z_{min}</i> : Profundidade mínima do sistema radicular (m) ⁽³⁾	0,00000	23
<i>Z_{máx}</i> : Profundidade máxima do sistema radicular (m) ⁽³⁾	0,00439	16
Fator de expansão da zona radicular ⁽¹⁾	0,00000	23
----- Transpiração da cultura e do solo -----		
<i>K_{CTR,x}</i> : Coeficiente da cultura - completa expansão do dossel ⁽¹⁾	0,99578	2
Coeficiente de declínio da cultura como resultado de idade, deficiência, entre outros (% dia ⁻¹) ⁽¹⁾	0,18297	8
<i>Ke</i> : Efeito da cobertura do dossel na redução da evaporação do solo no último estágio da cultura ⁽¹⁾	0,00071	22
----- Produção de biomassa e formação de rendimento -----		
<i>WP*</i> : Produtividade da água normalizada para <i>ET_o</i> e CO ₂ (g m ⁻²) ⁽¹⁾	0,98112	3
Produtividade da água normalizada para <i>ET_o</i> e CO ₂ durante a formação de rendimento ⁽¹⁾	0,00250	20
<i>H_{Io}</i> : Índice de colheita de referência (%) ⁽⁴⁾	1,00001	1
Máximo aumento permitido do HI especificado ⁽¹⁾	0,00614	14
----- Estresse -----		
<i>p_{exp,lower}</i> : Limite superior de depleção da água no solo para expansão do dossel ⁽¹⁾	0,00551	15
<i>p_{exp,upper}</i> : Limite inferior de depleção da água no solo para expansão do dossel ⁽¹⁾	0,00348	18
Fator do coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel ⁽¹⁾	0,00083	21
<i>p_{sto}</i> : Limite superior de depleção da água no solo para controle estomático ⁽¹⁾	0,03540	11
Fator do coeficiente de estresse hídrico para controle estomático ⁽¹⁾	0,00278	19
<i>p_{sen}</i> : Limite superior de depleção da água no solo para senescência do dossel ⁽¹⁾	0,01625	13
Fator do coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel ⁽¹⁾	0,00000	23
Volume (%) no ponto anaerobiótico (com referência para saturação) ^{(4), (3)}	0,01722	12
Mínima temperatura do ar abaixo da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo frio) (°C) ⁽¹⁾	0,15927	9
Máxima temperatura do ar acima da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo calor) (°C) ⁽¹⁾	0,00000	23
Mínimo em graus requerido para completa produção de biomassa (°C dia ⁻¹) ⁽¹⁾	0,55421	6
----- Manejo do solo -----		
Níveis de fertilidade ⁽³⁾	0,96595	4
Cobertura do solo com restos vegetais orgânicos ⁽³⁾	0,00432	17

⁽¹⁾Conservativo geralmente aplicável; ⁽²⁾Conservativo para determinada espécie mas pode ser para uma cultivar específica; ⁽³⁾Dependente do ambiente e/ou manejo; ⁽⁴⁾Cultivar específica.

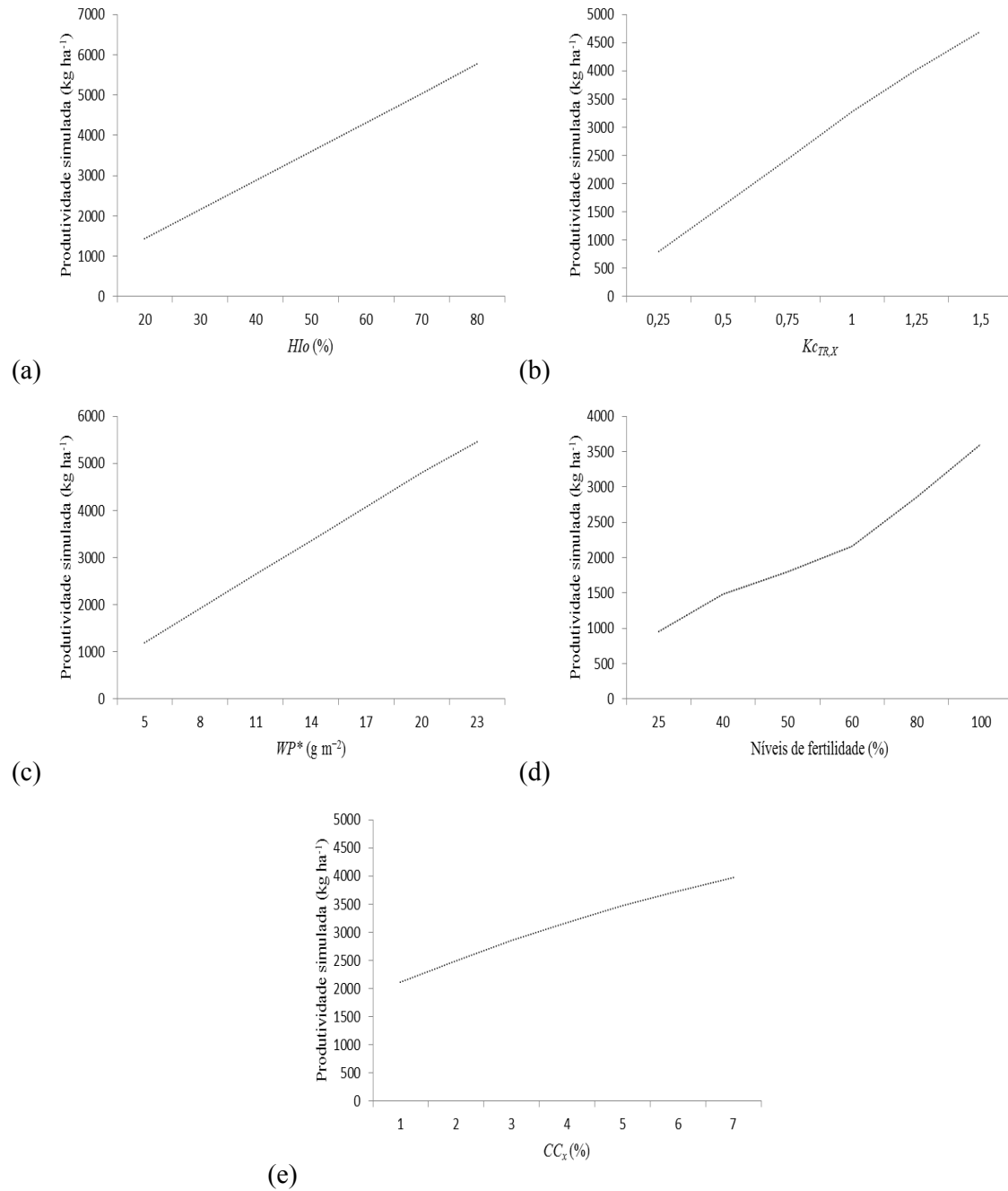


Figura 2 – Variação da produtividade simulada da cultura do trigo, cultivar TBIO Sinuelo, para o município de Ponta Grossa-PR, considerando os parâmetros que foram mais sensíveis AquaCrop: a) Índice de colheita de referência (HI_o ; %); b) Coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($Kc_{TR,x}$; adimensional); c) Índice de produtividade de água normalizada para ET_o e CO_2 (WP^* ; g m⁻²); d) Níveis de fertilidade do solo (%); e, e) Máxima cobertura do dossel (CC_x ; %).

Oliveira (2017) obteve maior sensibilidade para o $K_{CTR,x}$ na cultura do milho, em Castro. Salemi et al. (2011) observou sensibilidade moderada no trigo de inverno no Irã, e Vanuytrecht et al. (2014) verificou baixo impacto no rendimento final de grãos com alteração nos valores de $K_{CTR,x}$ para o milho e trigo de inverno na Bélgica. A sensibilidade do parâmetro $K_{CTR,x}$ deve-se à sua ligação direta com a transpiração da cultura (Tr), fazendo parte de uma das duas principais equações que regem o programa AquaCrop (Equação 3), a qual determina a biomassa acumulada da cultura:

$$B = WP \cdot \sum_{i=1}^n Tr_i \quad (3)$$

Sendo: B – biomassa acumulada (kg); WP – parâmetro de produção pela água (g m^{-2}); Tr_i – transpiração da cultura no i -ésimo intervalo de período (mm); n – período considerado (unidade) (Steduto et al., 2009; Steduto et al., 2012).

Nas análises realizados, verificou-se que a transpiração da cultura (Tr) do trigo, cultivar TBIO Sinuelo, em condições adequadas de água no solo foi proporcional ao crescimento efetivo do dossel (CC).

A produtividade de água normalizada (WP^*) apresentou alta sensibilidade, ocupando o terceiro *Ranking* ($IS = 0,98112$) (Tabela 2). O WP^* baseia-se na produtividade de água normalizada para ET_o e concentração de CO_2 na atmosfera (Equação 4):

$$WP^* = \left[\frac{B}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Tr_i}{ET_{o_i}} \right)} \right]_{[\text{CO}_2]} \quad (4)$$

Sendo: WP^* – produtividade de água normalizada para ET_o e CO_2 (g m^{-2}); B – biomassa acumulada (kg ha^{-1}); Tr_i – transpiração da cultura no i -ésimo dia (mm); ET_{o_i} – evapotranspiração de referência no i -ésimo dia (mm) (Steduto et al., 2009)

Assim como o $K_{CTR,x}$, a sensibilidade do WP^* é em função da sua participação na equação de determinação da biomassa acumulada (Equação 3). Na cultura do milho, em Castro, Oliveira (2017) obteve $IS = 0,8828$ para o WP^* . Xing et al. (2017), Lievens (2014) e Razzaghi et al. (2017) também observaram sensibilidade do parâmetro em suas simulações com o AquaCrop.

A fertilidade do solo obteve $IS = 0,96595$ (*Ranking* 4; Tabela 2; Figura 1.d). Oliveira (2017) também observou sensibilidade para o parâmetro. Steduto et al. (2012) considera que a fertilidade do solo, assim como os atributos físicos do solo, também depende do ambiente ou manejo adotado na área. Desta forma, os valores não podem ser pré-estabelecidos em um único intervalo.

O AquaCrop realiza balanço de nutrientes, portanto, o parâmetro é contabilizado nas rotinas por opções relacionadas à limitação de nutrientes. Nas simulações a limitação é escolhida pelo usuário, sendo que cada opção resulta em alteração direta nos valores de CC_x , CGC , CDC e WP^* , e consequentemente na produção de biomassa e grãos.

O CC_x no AquaCrop depende da densidade de plantio, a qual depende do ambiente e manejo adotado. A sensibilidade do parâmetro deve-se a sua participação em duas equações que determinam a cobertura do dossel da cultura (Raes et al., 2011; Steduto et al., 2012). Oliveira (2017) avaliando a cultura do milho em Castro encontrou CC_x na quarta posição do *Ranking*. Lievens (2014), com o método de Geerts et al. (2009), verificaram que o CC_x é altamente sensível para a soja e milho doce no nordeste da Tailândia.

Os demais parâmetros referentes à fenologia não apresentaram sensibilidade considerável. Alterações significativas em seus valores de entrada não resultaram em diferenças relevantes nos dados de saída do programa.

CONCLUSÕES

O índice de colheita de referência (HI_o) proporciona maior sensibilidade no AquaCrop, para a cultura do trigo, cultivar TBIO Sinuelo, em Ponta Grossa, sendo recomendável seu ajuste por meio da calibração. O coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{CTR,x}$), produtividade da água normalizada para ET_o e CO_2 (WP^*), níveis de fertilidade e máxima cobertura do dossel (CC_x) também foram sensíveis às alterações no AquaCrop e mereceriam destaque no processo de calibração.

LITERATURA CITADA

- ALMEIDA, A. T. **Processos de decisões nas organizações**: Construindo modelo de decisão multicritério. 1ª Edição. São Paulo: Atlas, 2013. 256 p.
- ALVAREZ, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDRIOLO, M. V.; SANTOS, I.; GIBERTONI, R. C.; CAMARGO, A. S. G. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 2008, Belo Horizonte. **Anais do VI SPMCH**. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2008. v. 1, 18p.
- BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M.H.F.; MACHADO, R.E. & OLIVEIRA, M.P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro - Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 253-261, 2010.
- BASSO, B.; CAMMARANO, D.; CARFAGNA, E. Review of crop yield forecasting methods and early warning systems. In: Proceedings of the First Meeting of the Scientific Advisory Committee of the Global Strategy to Improve Agricultural and Rural Statistics, **FAO Headquarters**, Rome, Italy, p. 18–19, 2013.
- CIBIN R.; SUDHEER, K.P.; CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. **Hydrological Processes**. v. 24, p. 1133-1148, 2010.

DALLA MARTA, A.; NATALI, F.; ORLANDINI, S. **Serbia for excel: AquaCrop the FAO crop-model to simulate yield response to water**. Department of Agrifood Production and Environmental Sciences University of Firenze, Italy. Novi Sad, Serbia. 2016, 125p.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. **Crop forecasting. IN: Report of the Eighteenth Session of the Asia and Pacific Commission on Agricultural Statistics**. Bali, Indonésia, 2000. Disponível em: <www.fao.org/docrep/004/ab989e/ab989e05.htm>. Acesso 02 mar. 2018.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. **Land & Water. AquaCrop**. 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/Aquacrop/en/>> Acesso 03 mar. 2018.

GEERTS, S., RAES, D., GARCIA, M., MIRANDA, R., CUSICANQUI, J. A., TABOADA, C., MENDOZA, J., HUANCA, R., MAMANI, A., CONDORI, O., MAMANI, J., MORALES, B., OSCO, V.; STEDUTO, P. Simulating Yield Response of Quinoa to Water Availability with AquaCrop. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 499-508, 2009.

LIEVENS, E. **Parameterization and testing of the FAO AquaCrop model to simulate yield response to water in North-eastern Thailand**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biociências: Ciência Agrícola). Universiteit Gent. Faculty of Bioscience Engineering. 2014, 69p.

MARSHALL, H. E. **Sensitivity analysis**. IN: DORF, R.C. Technology Management Handbook. Boca Raton, FL. CRC Press LLC. p. 59-63, 1999.

MORELL, F. J.; YANG, H. S.; CASSMAN, K. G.; WART, J. V.; ELMORE, R. W.; LICHT, M.; COULTER, J. A.; CIAMPITTI, I. A.; PITTELKOW, C. M.; BROUDER, S. M.; THOMISON, P.; LAUER, J.; GRAHAM, C.; MASSEY, R.; GRASSINI, P. Can crop simulation models be used to predict local to regional maize yields and total production in the U.S. Corn Belt? **Field Crops Research**, v. 192, p. 1-12, 2016.

OLIVEIRA, C. T. de. **Calibração, validação, análise de sensibilidade e identificação dos melhores períodos de plantio das culturas da soja e milho com o modelo AquaCrop, na Região dos Campos Gerais**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Curitiba, 2017.

PALOSCHI, R. A. **Software aplicado a modelos de estimativa de produtividade agrícola**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2016, 82p.

PANNELL, D. J. Sensitivity analysis of normative economic models: Theoretical framework and practical strategies. **Agricultural Economics**, v. 16, p. 139-152, 1997.

PESSOA, M. C. P. Y.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; FERNANDES, E. N.; LIMA, M. A. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas**. Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 1997. 83p. (Embrapa-CNPMA. Documentos, 8).

PIEKARSKI, K. R.; SOUZA, J. L. M.; TSUKAHARA, R. Y.; ROSA, S. L. K.; OLIVEIRA, C. T. Estimativa da produtividade da cultura da soja considerando a influência dos atributos físico-hídricos do solo na Região dos Campos Gerais. **Convibra Congresses Conferences**, 2017.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 438-447, 2009.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**: Chapter 1: FAO cropwater productivity model to simulate yield response to water. Version 3.1 *plus*. Rome, FAO, 2011, 19p.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**. Version 4.0. Rome, Italy. FAO, 2012, 164p.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual of AquaCrop**: Annexes. Rome, Italy. FAO, 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-br244e.pdf>>. Acesso 21 fev. 2018.

RAZZAGHI, F.; ZHOU, Z.; ANDERSEN, M. N.; PLAUBORG, F. Simulation of potato yield in temperate condition by the AquaCrop model. **Agricultural Water Management**, v. 191, p. 113-123, 2017.

SALEMI, H.; SOOM, M. A. M.; LEE, T. S.; MOUSAVI, S. F.; GANJI, A.; YUSOFF, M. K. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. **African Journal of Agricultural Research**, v. 610, p. 2204-2215, 2011.

SILVA, F. C.; BERGAMASCO, A. F. Levantamento de modelos matemáticos descritos para a cana-de-açúcar. **Revista Biociência**, v. 7, n. 1, p. 7-14, 2001.

SILVA, J. M. A. **Modelo hidrológico para o cálculo do balanço hídrico e obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas**: desenvolvimento e aplicação. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. 2002.

SILVA, J. M. A.; PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; CECILIO, R. A. Modelo para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 1, p. 78-84, 2009.

SILVESTRO, P. C.; PIGNATTI, S.; YANG, H.; YANG, G.; PASCUCCHI, S.; CASTALDI, F.; CASA, R. Sensitivity analysis of the AquaCrop and SAFYE crop models for the assessment of water limited winter wheat yield in regional scale applications. **Plos One**, v. 12, n. 11, 2017. 30p.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. **Crop yield response to water**. FAO Irrigation and Drainage Paper N°. 66. Roma, FAO. 2012. 500p.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009.

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; HENG, L. K.; VILA, M. G.; MORENO, P. M. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. **Environmental Modelling and Software**, n. 62, p.351-360, 2014.

XING, H.; XU, X.; LI, Z.; CHEN, Y.; FENG, H.; YANG, G.; CHEN, Z. Global sensitivity analysis of the AquaCrop model for winter wheat under different water treatments based on the extended Fourier amplitude sensitivity test. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 11, p. 2444-2458, 2017.