

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CIBELLE TAMIRIS DE OLIVEIRA

MODELO AQUACROP: CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E USO PARA SOJA E MILHO
NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS

CURITIBA

2018

CIBELLE TAMIRIS DE OLIVEIRA

MODELO AQUACROP: CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E USO PARA SOJA E MILHO
NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza
Coorientador: Dr. Rodrigo Yoiti Tsukahara

CURITIBA

2018

OL48m Oliveira, Cibelle Tamiris de
Modelo AquaCrop: calibração, validação e uso para soja e milho na região dos Campos Gerais / Cibelle Tamiris de Oliveira.
- Curitiba, 2018.
105 f.: il., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná.
Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo.

Orientador: Jorge Luiz Moretti de Souza
Coorientador: Rodrigo Yoiti Tsukahara

1. Soja – Fatores climáticos – Métodos de simulação. 2. Milho – Fatores climáticos – Métodos de simulação. 3. Produção agrícola. 4. Produtividade. I. Souza, Jorge Luiz Moretti de. II. Tsukahara, Rodrigo Yoiti. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDU 631.92

Sistema de Bibliotecas/UFPR, Biblioteca de Ciências Agrárias
Douglas Alex Jankoski - CRB9/1167



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Mestrado e Doutorado



PARECER


A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **Cibelle Tamiris de Oliveira**, intitulada: **“Modelo AquaCrop: Calibração, validação e uso para soja e milho na região dos Campos Gerais”**, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela **“APROVAÇÃO”** da referida Dissertação. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 28 de setembro de 2017.


Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, Presidente


Dr. Rodrigo Yoiti Tsukahara, Iº. Examinador


Prof. Dr. João Carlos Bespalkok Filho, IIº. Examinador


Dra. Daniela Jerszurki, IIIº. Examinador

AGRADECIMENTOS

- À Deus por guiar meu caminho e me capacitar a concluir esta dissertação;
- Aos meus pais Edson e Liamara, às minhas irmãs Juliana e Maria Eduarda pelas palavras e gestos de apoio e carinho dados a mim durante o mestrado;
- Ao José, pelo incentivo e atenção dados a mim durante a realização deste trabalho, e por me aturar nos momentos de angústia, quando achava que nada iria dar certo;
- À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de cursar o mestrado e todo apoio dado a mim durante esses dois anos;
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza pelos conhecimentos e conselhos transmitidos a mim durante o curso;
- Ao Departamento de Solos e Engenharia Agrícola pela infraestrutura fornecida para meu desenvolvimento profissional;
- A Fundação ABC pelos dados fornecidos para elaboração do trabalho, em especial ao Dr. Rodrigo Yoiti Tsukahara, coordenador do Setor de Agrometeorologia, e ao pesquisador Edson Giovanni Kochinski, pela atenção e colaboração na disponibilização dos dados;
- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento desse trabalho;
- A todos aqueles que direta ou indiretamente ajudaram de alguma forma na conclusão desta dissertação.

RESUMO

Modelos que simulam a produção agrícola são alternativas que permitem a suposição de cenários ideais para o crescimento das culturas, sendo utilizado no suporte à decisão no gerenciamento de lavouras, identificação das melhores épocas de semeadura, escolha de cultivares, avaliação de risco e investimento, com o objetivo de alcançar maiores produtividades. Contudo, a maior dificuldade encontrada nos principais modelos de simulação está na sua elevada complexidade, exigindo grande número de variáveis e parâmetros de entrada e certo grau de conhecimento em sistemas de simulação para compreensão de sua funcionalidade. Buscando facilitar aos usuários a simulação da produtividade, a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) desenvolveu o AquaCrop, um modelo que simula a resposta do rendimento das culturas à disponibilidade de hídrica. O programa equilibra precisão, simplicidade e robustez, utilizando um número relativamente pequeno de parâmetros explícitos, intuitivos e variáveis de entrada que exigem métodos simples para sua determinação. O AquaCrop já foi calibrado e validado para várias culturas e condições climáticas no mundo, porém há poucos estudos voltados à sua utilização no Brasil, principalmente para a região dos Campos Gerais. No presente estudo, teve-se por objetivo calibrar, validar, analisar a sensibilidade e identificar os melhores períodos de plantio das culturas soja e milho com o modelo AquaCrop, para as condições edafoclimáticas da região dos Campos Gerais - PR. Os dados de entrada requeridos pelo modelo são referentes à cultura, clima, solo e manejo. Os dados climáticos foram disponibilizados pela Fundação ABC, provenientes das estações agrometeorológicas instaladas nos campos experimentais de Arapoti, Castro, Ponta Grossa e distrito de Socavão, Estado do Paraná, e Itaberá, Estado de São Paulo. Os dados de solo de cada campo experimental são de levantamentos realizados anteriormente nos mesmos locais. Os dados de cultura e manejo foram obtidos de protocolos dos experimentos disponibilizados pela Fundação ABC. Para alcançar os objetivos, o trabalho foi estruturado em três capítulos: O Capítulo I consistiu em calibrar e validar o modelo para as culturas soja e milho, na região dos Campos Gerais; Com os resultados da calibração e validação, o Capítulo II consistiu na análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo para a cultura do milho e identificar os parâmetros mais sensíveis; e, O Capítulo III consistiu em analisar os melhores períodos de plantio para o milho em Castro e distrito de Socavão, por ser a cultura e locais que obtiveram os melhores desempenhos no AquaCrop. Os resultados indicam que o AquaCrop é capaz de estimar adequadamente as produtividades de soja e milho, podendo ser utilizado para auxiliar investigações e alternativas para incremento das produtividades das culturas na região dos Campos Gerais. Os parâmetros referentes à cultura do milho e fertilidade do solo proporcionam maior sensibilidade no AquaCrop, por estarem relacionados direta e/ou indiretamente às principais equações que determinam a biomassa e produtividade da cultura no modelo. O plantio de milho em setembro não maximiza sua produtividade em Castro e Socavão, mas é a melhor opção, minimizando problemas fitossanitários no desenvolvimento da cultura.

Palavras-chave: Modelagem. Produtividade. Relações hídricas. Produção agrícola.

ABSTRACT

Models that simulate agricultural production are alternatives that allow the assumption of ideal scenarios for crop growth, being used in the decision support of crop management, identification of the better planting period, choice of cultivars, risk assessment and investment, with the objective of achieve greater productivity. However, the greatest difficulty found in the main models of simulation is in its high complexity, requiring many variables and input parameters and a certain degree of knowledge in simulation systems to understand its functionality. Aiming to make it easier for users to simulation of productivity, the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) has developed AquaCrop, a model that simulates crop yield response to water availability. The program balances accuracy, simplicity and robustness by using a relatively small number of explicit, intuitive and input variables that require simple methods for their determination. AquaCrop has already been calibrated and validated for various crops and climatic conditions in the world, but there are few studies aimed at its use in Brazil, mainly for the Campos Gerais region. In the present study, the objective was to calibrate, validate, analyze the sensitivity and identify the better planting periods of soybean and maize crops with the AquaCrop model, for the soil and climatic conditions of the Campos Gerais region. The input data required by the model are crop, climate, soil and management. The necessary climatic data were made available by the ABC Foundation, coming from the agrometeorological stations installed in the experimental fields of Arapoti, Castro, Ponta Grossa e Socavão district, Paraná State, and Itaberá, São Paulo State. The soil data of each experimental field are from previous surveys in the same places. Crop and management data were obtained from protocols of the experiments provided by the ABC Foundation. In order to reach the established objectives the work was structured in three chapters: Chapter I consisted of calibrating and validating the model for soybean and maize crops in the Campos Gerais region; With the results of the calibration and validation, the Chapter II consisted of sensitivity analysis of the model parameters for the maize crop, and identifying the most sensitive parameters; and, Chapter III consisted of analyzing the better planting periods for maize in Socavão and Castro, because it is the crop and places that obtained the best performances in AquaCrop. The results indicate that the AquaCrop can adequately estimate the productivity of soybean and maize and can be used to assist investigations and alternatives to increase the productivity of crops in the region of the Campos Gerais. The parameters related to maize crop and soil fertility, provide greater sensitivity in AquaCrop because they are directly and indirectly related to the main equations that determine a biomass and productivity in the model. Maize planting in September does not maximize its productivity in Castro and Socavão, but it is the best option, minimizing plant health problems in the development of the crop.

Key-Words: Modeling. Productivity. Water relations. Agricultural production.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	10
1.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
1.1.2	Modelo AquaCrop	13
1.2	REFERÊNCIAS	15
2	CAPÍTULO I: CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA ESTIMAR A PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO, NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS	19
2.1	RESUMO.....	19
2.2	ABSTRACT	19
2.3	INTRODUÇÃO	20
2.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	22
2.4.1	Descrição da área de estudo.....	22
2.4.2	Modelo utilizado e dados de entrada necessários.....	23
2.4.3	Calibração e validação do modelo	24
2.4.3.1	Considerações quanto o processo de calibração do AquaCrop	24
2.4.3.2	Considerações quanto o processo de validação do AquaCrop.....	25
2.4.4	Análise estatística dos dados	31
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
2.5.1	Calibração do modelo AquaCrop	32
2.5.1.1	Parâmetros do AquaCrop obtidos para a cultura da soja	34
2.5.1.2	Parâmetros do AquaCrop obtidos para a cultura do milho	38
2.5.2	Validação do modelo AquaCrop.....	41
2.5.2.1	Validação do AquaCrop para a cultura da soja	41
2.5.2.2	Validação do AquaCrop para a cultura do milho	45
2.6	CONCLUSÕES	48
2.7	REFERÊNCIAS.....	48
3	CAPÍTULO II: RESPOSTA DO AQUACROP ÀS ALTERAÇÕES DE SEUS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A CULTURA DO MILHO, EM CASTRO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS	52
3.1	RESUMO.....	52
3.2	ABSTRACT	52
3.3	INTRODUÇÃO	53

3.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	55
3.4.1	Descrição da área de estudo.....	55
3.4.2	Modelo utilizado e dados de entrada.....	55
3.4.3	Análise de sensibilidade.....	59
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
3.6	CONCLUSÕES.....	67
3.7	REFERÊNCIAS.....	67
4	CAPÍTULO III: ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DE MILHO EM DIFERENTES ÉPOCAS DE SEMEADURA NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.....	70
4.1	RESUMO.....	70
4.2	ABSTRACT.....	70
4.3	INTRODUÇÃO.....	71
4.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	73
4.4.1	Descrição da área de estudo.....	73
4.4.2	Modelo utilizado e dados de entrada necessários.....	73
4.4.3	Definição dos períodos de plantio.....	75
4.4.4	Análise dos dados.....	76
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
4.6	CONCLUSÕES.....	85
4.7	REFERÊNCIAS.....	85
5	CONCLUSÕES GERAIS.....	90
	REFERÊNCIAS.....	91
	APÊNDICE 1 – DADOS DE ENTRADA UTILIZADOS NO MODELO AQUACROP, PARA A CULTURA DO MILHO, GENÓTIPOS P30F53YH, P30R50YH E AG8041PRO, EM CASTRO E SOCAVÃO.....	99
	APÊNDICE 2 – PRODUTIVIDADE (Y_s) E BIOMASSA SIMULADA (B_s), PRECIPITAÇÃO (P), EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAIS (ETR), DEFICIÊNCIA HÍDRICA (DEF) E EXCEDENTE HÍDRICO (EXC), OBTIDA PARA A CULTURA DO MILHO, COM AS CULTIVARES, P30F53YH, P30R50YH E AG8041PRO, NAS DATAS DE PLANTIOS ENTRE 01/08/2013 E 30/01/2014, EM CASTRO – PR.....	101
	APÊNDICE 3 – PRODUTIVIDADE (Y_s) E BIOMASSA SIMULADA (B_s), PRECIPITAÇÃO (P), EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAIS (ETR),	

DEFICIÊNCIA HÍDRICA (DEF) E EXCEDENTE HÍDRICO (EXC), OBTIDA PARA A CULTURA DO MILHO, COM AS CULTIVARES, P30F53YH, P30R50YH E AG8041PRO, NAS DATAS DE PLANTIOS ENTRE 01/08/2014 E 30/01/2015, EM CASTRO – PR.....	102
APÊNDICE 4 – PRODUTIVIDADE (Y_s) E BIOMASSA SIMULADA (B_s), PRECIPITAÇÃO (P), EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAIS (ETR), DEFICIÊNCIA HÍDRICA (DEF) E EXCEDENTE HÍDRICO (EXC), OBTIDA PARA A CULTURA DO MILHO, COM AS CULTIVARES, P30F53YH, P30R50YH E AG8041PRO, NAS DATAS DE PLANTIOS ENTRE 01/08/2012 E 30/01/2013, EM SOCAVÃO, DISTRITO DE CASTRO – PR	103
APÊNDICE 5 – PRODUTIVIDADE (Y_s) E BIOMASSA SIMULADA (B_s), PRECIPITAÇÃO (P), EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAIS (ETR), DEFICIÊNCIA HÍDRICA (DEF) E EXCEDENTE HÍDRICO (EXC), OBTIDA PARA A CULTURA DO MILHO, COM AS CULTIVARES, P30F53YH, P30R50YH E AG8041PRO, NAS DATAS DE PLANTIOS ENTRE 01/08/2013 E 30/01/2014, EM SOCAVÃO, DISTRITO DE CASTRO – PR	104
ANEXO 1 – CLASSES TEXTURAIS E VALORES MÉDIOS DA UMIDADE VOLUMÉTRICA NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE (Θ_{PMP}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (Θ_{CC}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA SATURAÇÃO (Θ_{SAT}) E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA EM TRÊS CAMADAS DE SOLO DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC EM ARAPOTI, CASTRO, SOCAVÃO E PONTA GROSSA, ESTADO DO PARANÁ, E ITABERÁ, ESTADO DE SÃO PAULO	105

1 INTRODUÇÃO GERAL

Os Campos Gerais, Estado do Paraná, é uma região agrícola importante por apresentar rendimentos superiores à média agrícola nacional de produção de grãos. Principalmente para as culturas da soja e milho, a região é pioneira na adoção de novas tecnologias que permitem aumentar ainda mais os rendimentos (SCHIMANDEIRO et al., 2006).

A estimativa da produtividade das culturas agrícolas depende de diversos fatores como manejo, solo, planta e clima, sendo o clima fator limitante e não controlável no rendimento final das culturas. Sendo assim, diversos trabalhos têm sido realizados na região dos Campos Gerais com o propósito de entender a influência das variações ambientais na produtividade e relações hídricas das culturas, bem como sugerir alternativas de manejo agrícola para aumentar a produtividade (ARAÚJO et al., 2009; ARAÚJO; SOUZA; TSUKAHARA, 2011; SOUZA; GERSTEMBERGER; ARAÚJO, 2013; SOUZA; JERSZURKI; GOMES, 2014). Porém, apesar de ser uma grande região produtora, a agricultura nos Campos Gerais ainda necessita de estudos que permitam identificar e prever melhores alternativas de plantio e manejo de culturas.

Assim, a utilização de modelos que simulam o crescimento de culturas agrícolas é uma excelente alternativa, permitindo a realização de testes e experimentos, aproveitando dados já coletados na região, envolvendo poucas pessoas, baixo custo, rapidez, criação e suposição de cenários ideais (PESSOA et al., 1997).

A maioria dos modelos existentes requerem grande número de variáveis de entrada e parâmetros que não estão facilmente acessíveis para a diversidade de culturas e ambientes ao redor do mundo. Muitas vezes, necessita-se de conhecimento avançado de modelagem e experiência para sua calibração, além de alguns modelos serem específicos para determinadas cultivares (VANUYTRECHT et al., 2014; MANIRUZZAMAN et al., 2015).

Buscando tornar mais simples a simulação da produtividade, a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) desenvolveu o AquaCrop, um modelo que utiliza a água como fator determinante para a simulação da produtividade da cultura (HSIAO et al., 2009). A estrutura desenvolvida difere de

outros modelos de simulação de produção agrícola por procurar estabelecer equilíbrio entre precisão, simplicidade e robustez.

As contribuições do AquaCrop já foram verificadas em pesquisas sobre o gerenciamento de lavouras para diversas culturas e países, porém, estudos avaliando o desempenho do modelo para as condições edafoclimáticas brasileiras ainda são escassos. Neste sentido, teve-se por objetivo no presente trabalho calibrar, validar, analisar a sensibilidade e identificar os melhores períodos de plantio das culturas soja e milho com o modelo AquaCrop, para as condições edafoclimáticas da região dos Campos Gerais, Estado do Paraná.

Para alcançar o objetivo geral estabelecido, o presente trabalho encontra-se dividido em três capítulos:

Capítulo I – Calibração e validação do modelo AquaCrop para estimar a produtividade de soja e milho, na região dos Campos Gerais;

Capítulo II – Resposta do AquaCrop às alterações de seus parâmetros de entrada para a cultura do milho, em Castro, Região dos Campos Gerais;

Capítulo III – Identificação dos melhores períodos de plantio da cultura do milho na região dos Campos Gerais com o auxílio do modelo AquaCrop.

1.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1.1 Modelos de crescimento de culturas

Modelo é uma teoria científica que procura reproduzir, simplificada, o funcionamento do sistema real (DOURADO NETO et al., 1998; CORRÊA et al., 2011). Para fins de simulação agrícola, os modelos matemáticos são os mais utilizados. Modelos matemáticos são descrições construídas em linguagem matemática, mediante simplificações do sistema, sendo representados por: componentes, variáveis, parâmetros e relações funcionais. O sistema funciona com rotinas de entrada de dados, gerando saídas na forma de relatórios, gráficos ou tabelas (PESSOA et al., 1997; BERNADON; CALGARO, 2007).

Os modelos matemáticos de crescimento de culturas são desenvolvidos com o objetivo de resolver problemas de variações de produtividade, mediante alterações ocorridas ao longo dos cultivos agrícolas. São ferramentas utilizadas no suporte à decisão na gestão de lavouras, determinação do melhor período de plantio, escolha

de cultivares, avaliação de riscos e decisões de investimento (STEDUTO et al., 2009; RAUFF; BELLO, 2015).

Na literatura, existem disponíveis para utilização vários modelos desenvolvidos, com o objetivo de avaliar a produção segundo as características edafoclimáticas do local de cultivo. Na TABELA 1.1 encontram-se alguns modelos aplicados à agricultura e suas respectivas características, sendo ferramentas muito utilizadas por pesquisadores.

TABELA 1.1 – PRINCIPAIS MODELOS UTILIZADOS PARA AVALIAR À PRODUÇÃO AGRÍCOLA, CONSIDERANDO AS CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS DO LOCAL DE CULTIVO.

Itens	Especificação
(1) APSIM – Agricultural Production Systems sIMulator	
Descrição	Simulador de sistemas agrícolas que combina a estimativa do rendimento agrícola em resposta ao manejo, com previsão das consequências à longo prazo das práticas agrícolas sobre os recursos do solo.
Componentes	Culturas, pastagens e florestas; Balanço hídrico do solo e movimento dos solutos; Matéria orgânica do solo e nitrogênio; Resíduos no solo; Fósforo; Solo; Erosão; e, Manejo.
Limitações	Variabilidade espacial dos resultados; Necessidade de grande número de dados de entrada; e, Limitação no número de dados de saída.
Aplicações	Gestão de culturas; Equilíbrio hídrico; Impactos climáticos; Sistemas de cultivo; Interações entre espécies; Uso do solo; Impactos do solo; e, Adaptação das culturas.
(2) CROPSYST – CROPPing SYstems SimulaTion Model	
Descrição	Conjunto de programas projetados para trabalhar em cooperação, fornecendo ao usuário ferramentas de análise de produtividade e impacto ambiental de rotações de culturas e manejos de sistemas de cultivo em escalas temporais e espaciais.
Componentes	Editor de parâmetros; Simulador de sistemas de cultivo; Gerador de clima; Co-operador de simulação GIS-CROPSYST; Ferramenta de análise de bacias hidrográficas; e, Outros programas utilitários.
Limitações	Dificuldade na avaliação de alguns dados de saída do modelo; Necessidade de muitos dados para avaliar o desempenho do modelo; Escolha de índices quantitativos usados para avaliar o desempenho do modelo; e, A discrepâncias entre os valores simulados e medidos em séries temporais não são devidamente avaliadas.
Aplicações	Estimativa do impacto climático, solos e manejo sobre o rendimento das culturas; Equilíbrio de água e nitrogênio; Adaptação da cultura à seca; Outros problemas do sistema de cultivo.
(3) DSSAT-CSM – Decision Support System for Agrotechnology Transfer - Cropping System Model	
Descrição	Modelo principal que possui um conjunto de modelos de simulação em seu núcleo, permitindo a simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas.
Componentes	Meteorológicos; Solo; Solo-Planta-Atmosfera; Modelo de cultura (CROPGRO); Planta (cultivo individual); Manejo; e, Pragas.
Limitações	Restrição das simulações para algumas culturas; Dificuldade para realizar validação do modelo; e, Algumas variáveis de saída são difíceis de serem avaliadas.
Aplicações	Manejo de fertilizantes, irrigação, culturas e pragas; Poluição ambiental; Previsão de rendimento; Mudança e variabilidade climática; e, Segurança alimentar.
(4) STICS – Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard	
Descrição	Modelo que simula o sistema solo-planta ao longo do ciclo das culturas ou vários ciclos da cultura, simulando rotações de cultivo.
Componentes	Fenologia; Crescimento do broto; Formação do rendimento; Crescimento radicular; Manejo de culturas; Microclima; e, Balanço hídrico.
Limitações	Diferença entre as escalas esperadas para os resultados do modelo e as escalas necessárias para descrever os processos; Limitação no número de dados de saída; e, Os mecanismos simulados definem parcialmente o intervalo de validade do modelo, assim certas combinações ambiente/manejo são excluídas da sua gama de aplicações.
Aplicações	Análise da deficiência hídrica para determinada cultura; Balanço hídrico da cultura; Diagnósticos agrônômicos ou ambientais; Otimização do manejo de culturas; e, Estimação do potencial de um ambiente.

FONTE: (4) Brisson et al. (2003); (1) Keating et al. (2003); (3) Jones et al. (2003); (2) Stockle, Donatelli e Nelson (2003).

1.1.2 Modelo AquaCrop

O modelo AquaCrop tem por finalidade simular a biomassa (EQUAÇÃO 1.1) e produtividade que pode ser alcançada pela cultura em decorrência da água disponível no local de cultivo (STEDUTO et al., 2009). A utilização da água como fator principal para nas simulações, deve-se a sua importância e limitação para a produção agrícola, principalmente em locais onde as chuvas não são bem distribuídas (HSIAO et al., 2009).

O AquaCrop evoluiu da equação de Doorenbos e Kassam (1979), em que a evapotranspiração (ET) é fundamental no cálculo da produtividade (Y). O modelo caracteriza-se por: *i*) Separar a ET em transpiração da cultura (Tr) e evaporação do solo E ; *ii*) Possuir equacionamento simples de crescimento do dossel e senescência, servindo de base para estimar a Tr e sua separação a partir da E ; *iii*) Tratar o rendimento final Y como função da biomassa final B e do índice de colheita HI ; e, *iv*) Separar os efeitos do estresse hídrico dentro dos componentes: crescimento e senescência do dossel, Tr e HI . A separação da ET em Tr e E evita a confusão do efeito do uso improdutivo do consumo de água (STEDUTO et al., 2008; STEDUTO et al., 2009).

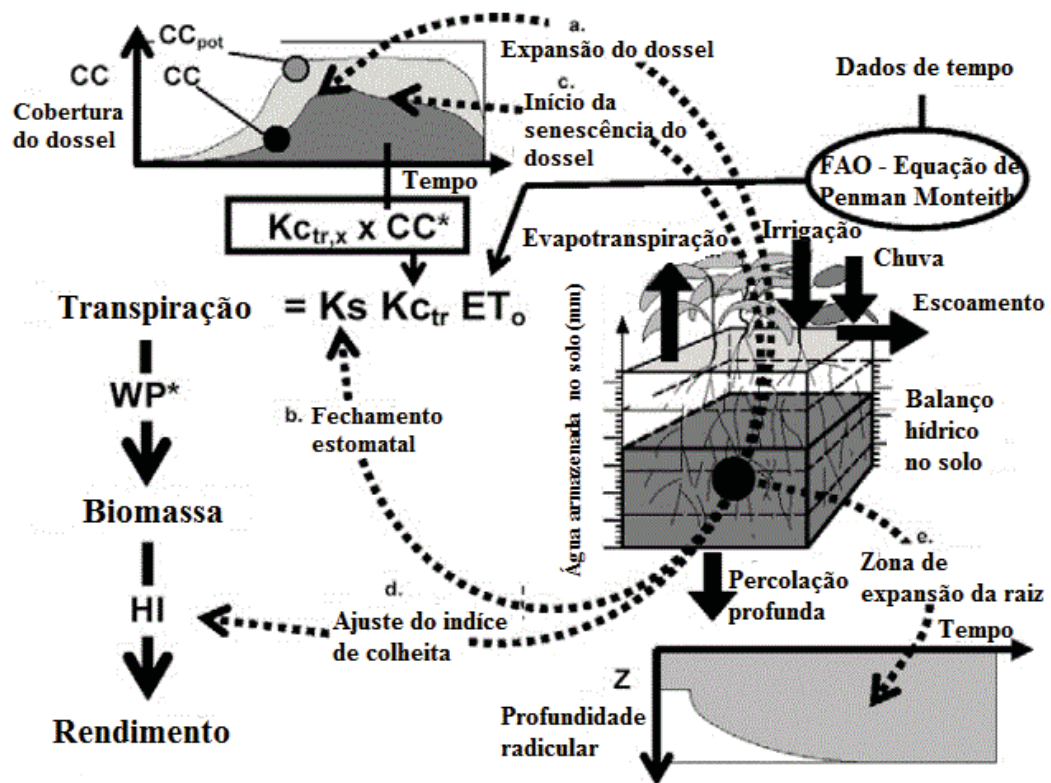
$$B = WP \cdot \sum_{i=1}^n Tr_i \quad (1.1)$$

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., 2008).

O AquaCrop também considera a cobertura do dossel (CC) ao invés do índice de área foliar (IAF), sendo um dado de obtenção mais fácil, simplificando o modelo. Outra importante mudança está na menor frequência de coleta dos dados (diária, semanal, entre outras), proporcionando escala semelhante à resposta da cultura ao déficit de água no solo (STEDUTO et al., 2008).

Na FIGURA 1.1 encontra-se apresentado o fluxo de funcionamento do AquaCrop, adaptado de Raes et al. (2009), contendo a indicação (setas pontilhadas) dos processos ("a" a "e") afetados pelo estresse hídrico.

FIGURA 1.1 – ESQUEMA DO FLUXO DE FUNCIONAMENTO DO AQUACROP, EM QUE AS SETAS PONTILHADAS INDICAM OS PROCESSOS (“A” A “E”) AFETADOS PELO ESTRESSE HÍDRICO.



FONTE: Adaptado de Raes et al. (2009).

LEGENDA: CC^* – cobertura do dossel ajustada para microadvecção; CC_{pot} – potencial de cobertura do dossel; K_s – coeficiente de estresse específico para cada processo alvo; HI – índice de colheita; $K_{C_{tr}}$ – coeficiente de transpiração da cultura; WP^* – parâmetro de produção pela água, normalizado para ET_o e concentração de CO_2 no ar; ET_o – evapotranspiração de referência.

Durante todo o ciclo da cultura, a quantidade de água armazenada na zona radicular é simulada em um balanço hídrico que contabiliza a entrada (chuva e irrigação) e saída (escoamento superficial e percolação profunda) dos fluxos de água em seus limites. O esgotamento na zona radicular determina a magnitude dos coeficientes de estresse hídrico (K_s), afetando: *i*) a cobertura do dossel CC ; *ii*) condutância estomática e, conseqüentemente, a transpiração por unidade de CC ; *iii*) senescência e diminuição do dossel; e, *iv*) índice de colheita HI . Cada componente tem seu próprio limite de esgotamento e curvas de resposta. Além disso, o aprofundamento do sistema radicular é uma função de K_s para condutância estomática. Caso ocorra estresse hídrico, o CC simulado será menor que o potencial de cobertura do dossel (CC_{pot}) para condições sem estresse. O coeficiente de transpiração ($K_{C_{tr}}$) é proporcional a CC , sendo ajustado continuamente durante a simulação (RAES et al., 2009).

Ao final do ciclo da cultura, estimado o acúmulo de biomassa, calcula-se o rendimento com a Equação 1.2:

$$Y = B \cdot HI \quad (1.2)$$

Sendo: Y – rendimento da cultura (kg ha^{-1}); B – biomassa acumulada (kg ha^{-1}); HI – índice de colheita da cultura (adimensional) (STEDUTO et al., 2008).

O modelo AquaCrop já foi parametrizado, calibrado e validado para diversas regiões e culturas no mundo: Nyakudya e Stroosnijder (2014) analisaram o efeito da profundidade de enraizamento, densidade de plantas e data de plantio no rendimento de milho no Zimbábue; Maniruzzaman et al. (2015) avaliaram a produção de arroz irrigado sob diferentes regimes de água em Bangladesh; Tavakoli, Moghadam e Sepaskhah (2015) estudaram a produção de cevada sob déficit de irrigação e condição de sequeiro no Irã; Mirsafi et al. (2016) testaram o modelo simulando o crescimento e rendimento de açafrão no Irã; Piekarski (2016) realizou estudo preliminar verificando a viabilidade de estimar a produtividade das culturas soja e milho na região dos Campos Gerais; Toumi et al. (2016) utilizaram o modelo para estimar a evapotranspiração, conteúdo de água no solo e rendimento de trigo no Marrocos.

1.2 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. A.; SOUZA, J. L. M.; BRONDANI, G. E.; PAULETTI, V. Sistemas de manejo e relações hídricas do solo na produtividade da cultura da soja, em Ponta Grossa-Paraná. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 10, n. 5, p. 403-412, set./out. 2009.

ARAÚJO, M. A.; SOUZA, J. L. M.; TSUKAHARA, R. Y. Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 23-31, set./mar. 2011.

BERNADON, T.; CALGARO, M. Modelo de simulação do crescimento de plantas. **Ambiência**, Guarapuava, v. 3, n. 2, p. 283-294, mai./ago. 2007.

BRISSON, N.; GARY, C.; JUSTES, E.; ROCHE, R.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; ZIMMER, D.; SIERRA, J.; BERTUZZI, P.; BURGER, P.; BUSSIÈRE, F.; CABIDOCHÉ, Y. M. ; CELLIER, P. ; DEBAEKE, P. ; GAUDILLÈRE, J. P. ; HÉNAULT, C. ; MARAUX, F. ; SEGUIN, B. ; SINOQUET, H. An overview of the crop model STICS. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3/4, p. 309-332, jan. 2003.

CORRÊA, S. T. R.; LORENÇONI, R.; DOURADO NETO, D.; SCARPARE, F. V.; VIVIAN, R.; RUIZ, E. T. Aplicações e limitações da modelagem na agricultura – revisão. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 86, n. 1, p. 1-13. 2011.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1979. 193p. (FAO Irrigation and Drainage, paper 33).

DOURADO NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARD, K.; NIELSEN, D. R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O. O. S. Principles of crop modelling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. especial, p. 46-50, jul./ago. 1998.

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.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOW, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3/4, p. 235-265, jan. 2003.

KEATING, B. A.; CARBERRY, P. S.; HAMMER, G. L.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, M. J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N. I.; HARGREAVES, J. N. G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; MCLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J. P.; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, E.; BRISTOW, K. L.; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; MCCOWN, R. L.; FREEBAIRN, D. M.; SMITH, C. J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal Agronomy**, v. 18, n. 3/4, p.267-288, jan. 2003.

MANIRUZZAMAN, M.; TALUKDER, M. S. U.; KHAN, M. H.; BISWAS, J. C.; NEMES, A. Validation of the AquaCrop model for irrigated rice production under varied water regimes in Bangladesh. **Agricultural Water Management**, v. 159, p. 331-340, set. 2015.

MIRSAFI, Z. S.; SEPASKHAH, A. R.; AHMADI, S. H.; KAMGAR-HAGHIGHI, A. A. Assessment of AquaCrop model for simulating growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 211, p. 343-351, nov. 2016.

NYAKUDYA, I. W.; STROOSNIJDER, L. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: modelling with AquaCrop. **Agricultural Water Management**, v. 146, n. , p. 280-296, out/ago. 2014.

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

PIEKARSKI, K. R. Produtividades de soja e milho estimadas com o modelo AquaCrop na Região dos Campos Gerais. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

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**, Madison, v. 101, n. 3, p. 438-447. 2009.

RAUFF, K. O.; BELLO, R. A review of crop growth simulation models as tools for agricultural meteorology. **Agricultural Sciences**, v. 6, n. 9, p. 1098-1105, set. 2015.

SCHIMANDEIRO, A.; WEIRICH NETO, P. H.; GIMENEZ, L. M.; COLET, M. J.; GARBUIO, P. W. Distribuição longitudinal de plantas de milho (*Zea mays* L.) na região dos Campos Gerais, Paraná. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 977-980, mai./jun. 2006.

SOUZA, J. L. M.; GERSTEMBERGER, E.; ARAÚJO, M. A. Calibração de modelos agrometeorológicos para estimar a produtividade da cultura do trigo, considerando sistemas de manejo do solo, em Ponta Grossa-PR. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 409-418, dez. 2013.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; GOMES, S. Precipitação e evapotranspiração de referência prováveis na região de Ponta Grossa-PR. **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, Botucatu, v. 19, n. 2, p. 279-291, abr./jun. 2014.

STEDUTO, P.; RAES, D.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; HENG, L.; IZZI, G.; HOOGEVEEN, J. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. In: López-Francos A. (Ed.). **Drought management: scientific and technological innovations**. Zaragoza: CIHEAM, 2008. P. 285-292. (Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens; n.80).

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**, Madison, v. 101, n. 3, p. 426-437. 2009.

STOCKLE, C. O.; DONATELLI, M.; NELSON, R. CropSyst, a cropping systems simulation model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3/4, p. 289-307, jan. 2003.

TAVAKOLI, A. R.; MOGHADAM, M. M.; SEPASKHAH, A. R. Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 161, p. 136-146, nov. 2015.

TOUMI, J.; ER-RAKI, S.; EZZAHAR, J.; KHABBA, S.; JARLAN, L.; CHEHBOUNI, A. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensif Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 219-235, jan. 2016.

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**, v. 62, p. 351-360, dez. 2014.

2 CAPÍTULO I: CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA ESTIMAR A PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO, NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS

2.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho calibrar e validar o modelo AquaCrop para as culturas de soja e milho nas condições edafoclimáticas da região dos Campos Gerais, Estado do Paraná. Utilizou-se dados experimentais levantados nas estações experimentais da Fundação ABC de Arapoti, Castro, Ponta Grossa e distrito de Socavão, no Estado do Paraná, e Itaberá, no Estado de São Paulo, nas safras de 2011/12 a 2015/16, para a cultura do milho, e 2006/07 a 2015/16, para a cultura da soja. Os dados de entrada no modelo (clima, cultura, solo e manejo) foram coletados nas respectivas estações experimentais, e posteriormente inseridos no modelo AquaCrop, para as simulações das produtividades. Os dados utilizados na calibração do modelo foram diferentes daqueles utilizados no processo de validação. As produtividades observadas e simuladas foram avaliadas em análises de regressão linear simples, erros absolutos e relativos, e índices de correlação de Pearson (r), concordância (d) e desempenho (c). A calibração do modelo teve resultados satisfatórios nas localidades estudadas, com índices de concordância variando entre $0,87 < d < 0,99$ para a soja e $d = 1,0$ para o milho, demonstrando boa aproximação para a soja e perfeita para o milho. Nas análises de validação o índice de desempenho do modelo foi “ótimo” para o milho e variou de “péssimo” a “ótimo” para a soja. Os resultados indicaram boa relação entre as produtividades medidas e simuladas, principalmente para o milho, indicando que o modelo AquaCrop é uma opção para planejar e encontrar alternativas que melhorem a produtividade das culturas soja e milho na região dos Campo Gerais.

Palavras-chave: Modelos de culturas. Produção agrícola. Modelagem. Simulação de produtividade.

2.2 ABSTRACT

The objective of this study was to calibrate and validate the AquaCrop model for soybean and maize crops in the edaphoclimatic conditions of Campos Gerais region, in Paraná State. Experimental data were collected at the ABC Foundation in the crop year between 2006/07 and 2015/16 at the experimental stations of Arapoti, Castro, Ponta Grossa and Socavão, in Paraná State, and Itaberá, in São Paulo State. The input data in the model (climate, culture, soil and management) were collected in the respective experimental stations, and later inserted in the AquaCrop model, for the simulations of the productivities. The data used in the model calibration were different from those used in the validation process. Observed and simulated yields were evaluated by simple linear regression analyzes, absolute and relative errors, and Pearson correlation coefficient (r), concordance (d) and performance (c) indexes. The calibration of the model had satisfactory results in the

studied locations, with concordance indices varying between $0.87 < d < 0.99$ for soybean and $d = 1.0$ for maize, showing good approximation for soybean and perfect for maize. In the validation analyzes the performance index of the model was "optimum" for maize and "poor" to "optimum" for soybean. The results indicated a good relationship between measured and simulated yields, especially for maize, indicating that the AquaCrop model is an option to plan and find alternatives to improve the productivity of soybean and maize crops in the Campos Gerais region.

Key-words: Crop models. Agricultural production. Modeling. Simulation of productivity.

2.3 INTRODUÇÃO

Modelos de simulação de culturas procuram estimar a resposta das plantas frente às interações com os fatores edafoclimáticos, podendo contribuir com o desenvolvimento de estratégias de manejo das culturas, monitoramento de colheita e previsões de safras, estimando o rendimento das culturas (ANDRADE et al., 2009; ASSENG et al., 2013; MARIN et al., 2011; MARTÍN; OLESEN; PORTER, 2014).

Os modelos utilizados para simular uma cultura em campo são aproximações da realidade, servindo para orientar na tomada de decisões a campo (LIMA FILHO; COELHO FILHO; HEINEMANN, 2013). Sendo assim, o ideal é formular um modelo que seja suficientemente complexo para descrever o que acontece no campo (AIMIRI, 2016).

Porém, a utilização de modelos de crescimento de culturas em condições diferentes daquelas do local onde foram desenvolvidos é limitada, necessitando de testes e adaptações em razão das diferenças edafoclimáticas do local de estudo e características genéticas da planta utilizada (NASSIF et al., 2012). Assim, para que os resultados do estudo sejam confiáveis todos os modelos devem ser calibrados e validados para as condições de interesse (TIMSINA; HUMPHREYS, 2006).

A calibração de modelos envolve a estimativa e/ou ajuste de parâmetros chaves do modelo, de forma a minimizar o erro entre os dados reais e simulados. A calibração é necessária, pois nem todos os parâmetros do modelo podem ser medidos diretamente no campo (JONES et al., 2003; TIMSINA; HUMPHREYS, 2006; WALLACH et al., 2011; HE et al., 2017; RACKL; HANLEY, 2017).

O AquaCrop é um modelo de crescimento de cultura, desenvolvido pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), que utiliza a água como fator determinante para a simulação da produtividade da cultura (HSIAO et al.,

2009). O AquaCrop difere de outros modelos de simulação de produção agrícola como o DSSAT-CSM, APSIM e CROPSYST por procurar estabelecer o equilíbrio entre precisão, simplicidade e robustez. O AquaCrop é um modelo de simulação que exige relativamente poucos parâmetros e dados de entrada, sendo seus parâmetros explícitos e mais intuitivos (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009).

Em relação aos parâmetros, o modelo AquaCrop trabalha com dois grupos, denominados conservativos e não conservativos. Os parâmetros conservativos são aqueles que devem permanecer constantes em diferentes condições de cultivo e regimes hídricos, sendo obtidos de cultivares de alto rendimento, sem limitação hídrica e fertilidade. Os parâmetros não conservativos referem-se aos parâmetros calibrados pelo usuário, sendo dependentes do local, genótipo utilizado e manejo (HSIAO et al., 2009; STEDUTO et al., 2012).

Com os parâmetros já calibrados, o modelo ainda necessita ser validado. O processo de validação está relacionado com o estabelecimento da similaridade das respostas do modelo com os dados medidos no campo e a verificação de sua adequação para determinada finalidade (JONES et al., 2003; CORRÊA et al., 2011). Deve-se pensar na avaliação do modelo como uma documentação de sua acurácia para previsões específicas em ambientes específicos, com adequada consideração, devido aos possíveis erros na entrada de variáveis ou dados de avaliação (JONES et al., 2003).

De forma geral, os modelos matemáticos voltados à agricultura necessitam de cuidadosa calibração e criteriosa validação, para avaliar sua robustez em diferentes ambientes (HE et al., 2017). Ressalta-se que o conjunto de dados utilizado para validação do modelo não pode ter sido utilizado anteriormente para calibração, devendo representar a matriz completa de ambientes e sequência de culturas para as quais será aplicado o modelo (JONES et al., 2003).

Diante do exposto, teve-se por objetivo no presente estudo calibrar e validar o modelo AquaCrop para as culturas soja e milho nas condições edafoclimáticas da região dos Campos Gerais, Estado do Paraná.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 Descrição da área de estudo

O presente trabalho foi realizado para quatro localidades na região dos Campos Gerais, Estado do Paraná, e uma localidade em São Paulo. O clima na região, conforme a classificação climática de Koppen, varia entre Cfa (subtropical úmido, clima oceânico sem estação seca com verão quente) e Cfb (subtropical úmido, clima oceânico sem estação seca com verão temperado) (ÁLVARES et al., 2013). Os dados experimentais foram disponibilizados pela Fundação ABC, sendo coletados nas Estações Experimentais localizadas nos municípios de Arapoti, Castro, Ponta Grossa, Socavão (distrito de Castro), pertencentes ao Estado do Paraná, e o município de Itaberá, pertencente ao Estado de São Paulo. O relevo da região varia de plano à suave ondulado. O sistema de preparo do solo é o plantio direto com cobertura vegetal homogênea, realizando-se rotação de cultura no inverno (trigo e aveia preta) e verão (soja e milho).

Os dados de classificação de solo e clima, coordenadas geográficas e altitude (TABELA 2.1), bem como os atributos físico-hídricos (ANEXO 1) das parcelas experimentais, são de um trabalho anterior desenvolvido por Piekarski (2016).

TABELA 2.1 – CARACTERÍSTICAS EDAFOLIMÁTICAS DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, NAS LOCALIDADES DE ARAPOTI, CASTRO, ITABERÁ, PONTA GROSSA E SOCAVÃO ⁽¹⁾.

Município	Solo	Classificação Climática ⁽²⁾	Latitude ----- (graus)	Longitude -----	Altitude (m)
Arapoti	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	Cfa/Cfb ⁽³⁾	24,18° S	49,85° W	902
Castro	CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Cfb	24,85° S	49,93° W	1001
Itaberá	PLANOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Cfa	24,07° S	49,15° W	735
Ponta Grossa	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	Cfb	25,01° S	50,15° W	1000
Socavão	ORGANOSSOLO VERMELHO Sáprico típico	Cfb	24,68° S	49,75° W	1026

FONTE: Adaptado de ⁽¹⁾Piekarski (2016); ⁽²⁾Álvares et al. (2013).

NOTA: ⁽³⁾Local de transição climática.

2.4.2 Modelo utilizado e dados de entrada necessários

O modelo utilizado nas análises foi o AquaCrop, versão 5.0, disponibilizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (FAO, 2016).

Os dados de entrada do modelo AquaCrop necessários tanto no processo de calibração como validação, considera aspectos do clima, cultura, solo e manejo (RAES et al., 2009; RAES et al., 2017):

a) Clima: Temperaturas máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), precipitação pluviométrica diária (mm dia^{-1}), evapotranspiração de referência diária (ET_0 ; mm dia^{-1}) e concentração média anual de CO_2 na atmosfera (ppm) são os dados climáticos de entrada requeridos pelo modelo. Os dados diários de temperatura máxima, mínima e média do ar ($^{\circ}\text{C}$) precipitação pluviométrica diária (mm dia^{-1}), radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{m}^{-1}$), umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento (km h^{-1}) foram disponibilizados pela Fundação ABC, e obtidos de série histórica de 10 anos (setembro/2006 a abril/2016), medida nas estações agrometeorológicas automáticas instaladas nas estações experimentais analisadas. A evapotranspiração de referência foi estimada com o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), para a mesma série histórica de 10 anos. Quanto à concentração média anual de CO_2 na atmosfera, o modelo disponibiliza opções quanto ao local de obtenção dos dados. Assim, no presente estudo optou-se pela utilização dos dados obtidos no observatório de Mauna Loa, Havaí (RAES et al., 2009);

b) Cultura: As datas de semeadura e colheita, duração dos estádios fenológicos da cultura (dia; emergência, florescimento, senescência e maturidade fisiológica) e população de plantas (plantas ha^{-1}) foram disponibilizados pela Fundação ABC, a partir de séries históricas de experimentos realizados em suas estações experimentais nas safras 2006/07 a 2015/16 para a soja, e 2011/12 a 2015/16 para o milho. Os seguintes parâmetros foram calibrados no modelo: coeficiente de declínio do dossel (CDC); índice de produtividade de água (WP^*); índice de colheita de referência (HI_0); e, coeficiente máximo da cultura ($K_{Cmáx}$). Algumas variáveis requeridas pelo modelo, como a máxima cobertura do dossel; máxima e mínima profundidade efetiva de raízes, temperaturas limites (mínima e máxima) para crescimento da planta, fração p , entre outros, foram retirados da literatura. A salinidade não foi considerada no presente estudo.

c) Manejo: O AquaCrop permite inserir dados sobre a utilização e tipo de irrigação, frequência de irrigação (dias), volume de irrigação (mm) e qualidade da água de irrigação. O modelo permite também inserir dados sobre a presença, o tipo de cobertura e a porcentagem que ela cobre o solo (%), as práticas culturais que evitam o escoamento superficial da água e a possibilidade de quatro níveis de fertilização (alto, próximo ao ideal, médio e baixo). Contudo, no presente trabalho a irrigação não foi considerada, o nível de fertilização foi considerado próximo ao ideal e, por serem áreas onde há prática do plantio direto, a cobertura do solo por restos vegetais foi considerada fixa em 100% em todas as estações experimentais. Foram realizados o controle fitossanitário e a adubação de acordo com o requerido pelas culturas.

d) Solo: Os dados de solo requeridos para entrada no modelo são a textura do solo, umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; $m^3 m^{-3}$), umidade na capacidade de campo (θ_{CC} ; $m^3 m^{-3}$), conteúdo de água na saturação (θ_{SAT} ; $m^3 m^{-3}$) e condutividade hidráulica saturada (K_{SAT} ; $mm dia^{-1}$). O modelo permite a inserção de até cinco camadas de solo, porém no presente estudo foram consideradas apenas três camadas de solo (0-0,10 m; 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m) para inserção dos atributos físico-hídricos.

2.4.3 Calibração e validação do modelo

2.4.3.1 Considerações quanto o processo de calibração do AquaCrop

O processo de calibração do AquaCrop para a cultura da soja foi realizado para as localidades de Arapoti, Castro e Ponta Grossa, Estado do Paraná, e Itaberá, Estado de São Paulo. Para a cultura do milho a calibração foi realizada para as localidades de Castro, Ponta Grossa e Socavão. As cultivares, safras, população de plantas e datas de plantio das duas culturas estão dispostas nas TABELAS 2.2 e 2.3. No total foram utilizados no processo de calibração 19 experimentos para a soja e 26 para o milho.

Com relação ao manejo, os dados utilizados foram inseridos conforme o praticado nos experimentos disponibilizados pela Fundação ABC. Assim, foi considerada a fertilidade do solo próxima ao ideal (90%) e cobertura do solo por

restos vegetais em 100%. A utilização de prática de irrigação, bem como a salinidade foram desconsideradas nas análises.

Os dados climáticos e atmosféricos inseridos no AquaCrop foram a temperatura máxima e mínima do ar ($T_{máx}$ e $T_{mín}$, °C), precipitação (P , mm), evapotranspiração de referência (ET_o , mm dia⁻¹) e concentração de CO₂ anual na atmosfera (CO₂, ppm). Os dados climáticos necessários foram disponibilizados pela Fundação ABC, sendo provenientes das estações agrometeorológicas instaladas nos campos experimentais de Arapoti, Castro, Itaberá, Ponta Grossa e Socavão. A ET_o diária foi calculada com o método padrão de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). A concentração média anual de CO₂ na atmosfera (ppm) está disponibilizada na aba clima do modelo AquaCrop, sendo obtida a partir do observatório de Mauna Loa, Havaí (Raes et al., 2009).

Os parâmetros calibrados no AquaCrop referem-se às culturas utilizadas. Primeiramente foi inserido em cada experimento os valores dos parâmetros especificados para soja e milho (TABELA 2.4), apresentados no Manual de Referência do AquaCrop (FAO, 2017). Os valores dispostos no Manual foram calibrados e validados para uma condição específica de clima e solo, sendo divididos em parâmetros conservativos e não conservativos. Os parâmetros conservativos não necessitam de calibração, podendo ser utilizados para qualquer localidade. Os parâmetros não conservativos necessitam de ajustes para melhorar os resultados das simulações.

Após a inserção dos valores dos parâmetros no AquaCrop, foram realizadas as simulações das produtividades. Enquanto as produtividades simuladas não se aproximavam da produtividade real, os parâmetros foram modificados e calibrados novamente, até que os erros absoluto e relativo da produtividade real em relação à simulada fossem mínimos e os índices “ d ” de cada experimento fossem altos.

2.4.3.2 Considerações quanto o processo de validação do AquaCrop

O processo de validação do AquaCrop para as culturas soja e milho foi realizado após o processo de calibração dos parâmetros do modelo para a cultura soja e milho. Os experimentos utilizados no processo de validação do modelo foram diferentes daqueles utilizados no processo de calibração, sendo 26 experimentos para a cultura da soja e 32 para a cultura do milho. Nas TABELAS 2.2 e 2.3 estão

dispostos os locais, cultivares e safras de soja e milho utilizadas, bem como as datas de plantio e população de plantas das cultivares.

No processo de validação foram utilizados os mesmos dados de clima e manejo, disponibilizados pela Fundação ABC, e solo, levantado por Pierkaski (2016), em trabalho realizado anteriormente. Primeiro, foram modificados os dados referentes à cultura, como data de plantio (dias), população de plantas (plantas ha^{-1}), índice de colheita de referência (%) e duração dos estádios fenológicos, sendo este último dependente da planta e condição de cultivo. Posteriormente foram inseridos os parâmetros calibrados e realizadas as simulações.

TABELA 2.2 – SAFRAS UTILIZADAS NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO AQUACROP PARA A CULTURA DA SOJA, CONSIDERANDO OS EXPERIMENTOS DA FUNDAÇÃO ABC: LOCALIDADES, CULTIVARES, DATA DE PLANTIO E COLHEITA, POPULAÇÃO DE PLANTAS (p , plantas ha^{-1}) E NÚMEROS DE EXPERIMENTOS (n).

Local	Cultivar	Plantio	Colheita	p	n
----- Calibração -----					
Arapoti	NK3363	21/10/2010	21/03/2011	307.031	3
	M5917IPRO	15/10/2015	11/03/2016	301.562	
	NA5909RG	15/10/2015	11/03/2016	296.875	
Castro	NK3363	13/11/2007	08/04/2008	309.998	9
	NK3363	25/11/2010	06/04/2011	303.926	
	NA5909RG	21/11/2011	23/04/2012	309.998	
	NA5909RG	03/12/2011	30/04/2012	297.855	
	NA5909RG	26/11/2012	05/04/2013	271.875	
	NA5909RG	21/11/2012	23/04/2013	309.998	
	BMX Apolo RR D.Mario 5.8	06/11/2014	23/03/2015	291.406	
	M5917IPRO	21/10/2015	11/03/2016	286.718	
	M5917IPRO	19/11/2015	28/03/2016	230.469	
Itaberá	NA5909RG	05/11/2012	19/03/2013	239.063	4
	NA5909RG	19/11/2013	02/03/2014	194.531	
	BMX Apolo RR D.Mario 5.8	27/10/2014	27/02/2015	311.719	
	BMX Apolo RR D.Mario 5.8	25/11/2011	19/03/2015	291.406	
Ponta Grossa	NK3363	16/11/2006	21/03/2007	406.250	4
	NA5909RG	28/11/2012	03/04/2013	314.062	
	NA5909RG	13/11/2014	24/03/2015	313.281	
	M5917IPRO	16/10/2015	17/03/2016	286.718	
----- Validação -----					
Arapoti	NK3363	03/11/2010	25/03/2011	321.093	3
	NA5909RG	10/11/2015	24/03/2016	297.656	
	M5917IPRO	10/11/2015	24/03/2016	340.625	
Castro	NK3363	25/11/2010	06/04/2011	291.037	14
	NK3363	25/11/2010	06/04/2011	296.817	
	NK3363	27/11/2010	02/05/2011	286.427	
	NA5909RG	03/12/2012	17/04/2013	306.561	
	NA5909RG	03/12/2012	30/04/2013	303.125	
	NA5909RG	06/11/2014	23/03/2015	276.562	
	NA5909RG	27/11/2014	27/03/2015	326.562	
	BMX Apolo RR D.Mario 5.8	27/11/2014	27/03/2015	328.906	
	NA5909RG	21/10/2015	11/03/2016	300.000	
	M5917IPRO	09/11/2015	21/03/2016	208.593	
	NA5909RG	09/11/2015	21/03/2016	277.344	
	NA5909RG	19/11/2015	28/03/2016	284.375	
	M5917IPRO	08/12/2015	05/04/2016	237.500	
	NA5909RG	08/12/2015	05/04/2016	275.000	
Itaberá	NA5909RG	18/11/2013	04/03/2014	291.406	4
	NA5909RG	12/12/2013	14/03/2014	259.375	
	NA5909RG	25/11/2014	23/05/2015	274.219	
	BMX Apolo RR D.Mario 5.8	27/10/2014	27/02/2015	311.719	
Ponta Grossa	NK3363	17/10/2010	29/03/2011	317.968	5
	NA5909RG	13/11/2014	24/03/2015	313.281	
	NA5909RG	02/12/2014	02/04/2015	313.281	
	M5917IPRO	20/11/2015	31/03/2016	261.718	
	NA5909RG	20/11/2015	31/03/2016	328.906	

FONTE: A autora (2018).

TABELA 2.3 – SAFRAS UTILIZADAS NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO AQUACROP PARA A CULTURA DO MILHO, CONSIDERANDO OS EXPERIMENTOS DA FUNDAÇÃO ABC: LOCALIDADES, CULTIVARES, DATA DE PLANTIO E COLHEITA, POPULAÇÃO DE PLANTAS (p , plantas ha^{-1}) E NÚMEROS DE EXPERIMENTOS (n).

					(continua)	
Local	Cultivar	Plantio	Colheita	p	n	
----- Calibração -----						
Castro	P32R22H	29/09/2011	16/03/2012	68.750	11	
	P30R50YH	14/10/2013	15/04/2014	71.094		
	AG8041PRO	14/10/2013	15/04/2014	71.094		
	30F53YH	14/10/2013	01/04/2014	74.219		
	Celeron TL	14/10/2013	01/04/2014	73.438		
	DKB240PRO	05/10/2015	09/03/2016	67.188		
	P30R50YH	05/10/2015	09/03/2016	71.094		
	P1630H	05/10/2015	12/02/2016	69.531		
	P2530	05/10/2015	26/02/2016	69.531		
	DKB240PRO	19/11/2015	12/04/2016	72.656		
	P30R50YH	19/11/2015	12/04/2016	69.531		
Ponta Grossa	P30R50H	01/10/2012	13/03/2013	75.000	9	
	P32R22H	26/09/2013	14/02/2014	75.000		
	P32R22H	16/10/2013	25/02/2014	71.094		
	P 30F53YH	22/10/2014	23/03/2015	74.219		
	AG8041PRO	12/11/2015	14/04/2016	72.656		
	Velox TL	12/11/2015	06/04/2016	77.344		
	AS 1656PRO2	12/11/2015	20/04/2016	78.906		
	WXA 504 Waxy	12/11/2015	06/04/2016	72.656		
DKB 240PRO	12/11/2015	11/04/2016	75.781			
Socavão	P30R50H	27/10/2011	10/05/2012	74.327	6	
	AG8041YG	27/10/2011	27/04/2012	73.242		
	P32R22H	27/10/2011	09/04/2012	75.955		
	P1630H	06/11/2012	05/04/2013	89.063		
	30F53YH	06/11/2012	23/04/2013	89.583		
	Celeron TL	03/10/2012	30/03/2013	82.292		
----- Validação -----						
Castro	30R50YH	07/10/2014	31/03/2015	75.000	14	
	AG8041PRO	07/10/2014	07/04/2015	64.844		
	30F53YH	07/10/2014	31/03/2015	69.531		
	Velox TL	07/10/2014	26/03/2015	66.406		
	WXA 504 Waxy	07/10/2014	26/03/2015	73.438		
	DKB 240PRO	07/10/2014	31/03/2015	69.531		
	30R50YH	04/11/2014	24/04/2015	73.438		
	AG8041PRO	04/11/2014	27/04/2015	65.625		
	P32R22H	04/11/2014	31/03/2015	67.969		
	30F53YH	04/11/2014	27/04/2015	67.188		
	Velox TL	04/11/2014	16/04/2015	67.969		
	AS 1656PRO2	04/11/2014	24/04/2015	66.406		
	WXA 504 Waxy	04/11/2014	24/04/2015	71.094		
	DKB 240PRO	04/11/2014	27/04/2015	67.188		

TABELA 2.3 – SAFRAS UTILIZADAS NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO AQUACROP PARA A CULTURA DO MILHO, CONSIDERANDO OS EXPERIMENTOS DA FUNDAÇÃO ABC: LOCALIDADES, CULTIVARES, DATA DE PLANTIO E COLHEITA, POPULAÇÃO DE PLANTAS (p , plantas ha^{-1}) E NÚMEROS DE EXPERIMENTOS (n).

					(continuação)	
Local	Cultivar	Plantio	Colheita	p	n	
----- Validação -----						
Ponta Grossa	30R50YH	30/09/2015	08/03/2016	78.906		
	AG8041PRO	30/09/2015	25/02/2016	81.250		
	P32R22H	30/09/2015	25/02/2016	78.125		
	30F53YH	30/09/2015	08/03/2016	75.000		
	Velox TL	30/09/2015	25/02/2016	95.313		
	AS 1656PRO2	30/09/2015	17/03/2016	77.344		11
	WXA 504 Waxy	30/09/2015	25/02/2016	81.250		
	DKB 240PRO	30/09/2015	25/02/2016	79.688		
	30R50YH	12/11/2015	19/04/2016	78.906		
	P32R22H	12/11/2015	31/03/2016	75.781		
	30F53YH	12/11/2015	20/04/2016	71.875		
Socavão	P30R50YH	06/11/2012	13/04/2013	90.104		
	AG8041PRO	06/11/2012	09/04/2013	89.063		
	30R50YH	28/10/2013	12/04/2014	81.771		
	AG8041PRO	28/10/2013	16/04/2014	81.250		7
	P2530H	28/10/2013	16/04/2014	84.375		
	30F53YH	28/10/2013	16/04/2014	84.896		
	Celeron TL	28/10/2013	16/04/2014	84.375		

FONTE: A autora (2018).

TABELA 2.4 – PARÂMETROS CONSERVATIVOS E NÃO CONSERVATIVOS, UTILIZADOS COMO PONTO DE PARTIDA NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DA SOJA E MILHO.

					(continua)	
Símbolo	Descrição	Tipo	Soja	Milho		
----- Fenologia da Cultura -----						
	Temperaturas limites do ar					
T_b	Temperatura base (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	10	8		
T_B	Temperatura superior (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	35	44		
----- Desenvolvimento do dossel -----						
CC_o	Cobertura inicial do dossel com 90% de emergência das plantas (%)	Conservativo ⁽²⁾	0,5	0,6		
CC_x	Máxima cobertura do dossel (%)	Manejo ⁽³⁾	95	9,5		
----- Desenvolvimento da zona radicular -----						
Z_{min}	Profundidade radicular mínima efetiva (m)	Manejo ⁽³⁾	0,3	0,3		
$Z_{máx}$	Profundidade radicular máxima efetiva (m)	Manejo ⁽³⁾	1,5	2,8		
	Fator descrevendo a expansão da zona radicular	Conservativo ⁽¹⁾	1,5	1,3		
----- Transpiração da Cultura -----						
$KC_{TR,x}$	Coefficiente da cultura com completa expansão do dossel	Conservativo ⁽¹⁾	1,1	1,05		
	Coefficiente de declínio da cultura como resultado da idade, deficiência de nitrogênio, etc. (% dia^{-1})	Conservativo ⁽¹⁾	0,3	0,3		
	Efeito da cobertura do dossel na redução da evaporação do solo no último estágio da cultura	Manejo ⁽³⁾	25	50		

TABELA 2.4 – PARÂMETROS CONSERVATIVOS E NÃO CONSERVATIVOS, UTILIZADOS COMO PONTO DE PARTIDA NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DA SOJA E MILHO.

Símbolo	Descrição	Tipo	(continuação)	
			Soja	Milho
----- Produção de Biomassa e Formação de Rendimento -----				
<i>WP*</i>	Produtividade de água da cultura			
	Produtividade de água normalizada para ET_o e CO_2 ($g\ m^{-2}$)	Conservativo ⁽¹⁾	15	33,7
	Produtividade de água normalizada para ET_o e CO_2 durante a formação de rendimento	Conservativo ⁽¹⁾	60	100
<i>HI_o</i>	Índice de Colheita			
	Índice de colheita de referência (%)	Cultivar ⁽⁴⁾	40	48-52
	Possível incremento no <i>HI</i> devido ao estresse hídrico antes do florescimento	Conservativo ⁽¹⁾	Pequeno	Nenhum
	Excesso de frutos potenciais (%)	Conservativo ⁽²⁾	Médio	Pequeno
	Coeficiente descrevendo o impacto positivo da restrição do crescimento vegetativo durante a formação de rendimento no <i>HI</i>	Conservativo ⁽¹⁾	Nenhum	Pequeno
	Coeficiente descrevendo o impacto negativo do fechamento estomático durante a formação de rendimento no <i>HI</i>	Conservativo ⁽¹⁾	Forte	Forte
	Máximo aumento permitido do <i>HI</i> especificado	Conservativo ⁽¹⁾	10	15
----- Estresse -----				
<i>p_{exp,lower}</i>	Estresse hídrico no solo			
	Limite inferior de depleção da água no solo para expansão do dossel	Conservativo ⁽¹⁾	0,15	0,14
<i>p_{exp,upper}</i>	Limite superior de depleção da água no solo para expansão do dossel	Conservativo ⁽¹⁾	0,65	0,72
	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel	Conservativo ⁽¹⁾	3	2,9
<i>p_{sto}</i>	Limite superior de depleção da água no solo para controle estomático	Conservativo ⁽¹⁾	0,5	0,69
	Fator do coeficiente de estresse hídrico para controle estomático	Conservativo ⁽¹⁾	3	6
<i>p_{sen}</i>	Limite superior de depleção da água no solo para senescência do dossel	Conservativo ⁽¹⁾	0,7	0,69
	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel	Conservativo ⁽¹⁾	3	2,7
<i>p_{pol}</i>	Limite superior de depleção de água no solo para falhar a polinização	Conservativo ⁽¹⁾	0,85	0,8
	Volume (%) no ponto anaerobiótico (com referência para saturação)	Cultivar ⁽⁴⁾ , Ambiente ⁽³⁾	5	5
----- Estresse pela temperatura do ar -----				
	Mínima temperatura do ar abaixo da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo frio) (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	8	10
	Máxima temperatura do ar acima da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo calor) (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	40	40
	Mínimo graus dias requerido para completa produção de biomassa (°C dia ⁻¹)	Conservativo ⁽¹⁾	10	12

FONTE: FAO, 2017.

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

2.4.4 Análise estatística dos dados

No processo de calibração e validação do AquaCrop, as produtividades simuladas no modelo (Y_s , kg ha⁻¹) foram comparadas com as produtividades observadas (Y_r , kg ha⁻¹), em análises de regressão linear simples. Para servir de comparação, foram calculados os erros absolutos (Ea ; EQUAÇÃO 2.1)) e relativos (Er ; EQUAÇÃO 2.2), coeficiente de determinação (R^2) e correlação de Pearson (r – EQUAÇÃO 2.3), e índice de concordância “ d ” (EQUAÇÃO 2.4; WILLMOTT, 1982), que mede a distância que os pontos Y_{real} versus $Y_{simulado}$ estão afastados da reta 1:1. Somente para o processo de validação do modelo foi calculado o índice “ c ” (EQUAÇÃO 2.5; CAMARGO; SENTELHAS, 1997), que mede o desempenho do modelo, em que:

$$Ea = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{r_i} - Y_{s_i}|}{n} \quad (2.1)$$

$$Er = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{r_i} - Y_{s_i}|}{\sum_{i=1}^n Y_{s_i}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(Y_{r_i} - \bar{Y}_r) \cdot (Y_{s_i} - \bar{Y}_s)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{r_i} - \bar{Y}_r)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_{s_i} - \bar{Y}_s)^2}} \quad (2.3)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{s_i} - \bar{Y}_r)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (|Y_{s_i} - \bar{Y}_r| + |Y_{r_i} - \bar{Y}_r|)^2}} \quad (2.4)$$

$$c = d \cdot r \quad (2.5)$$

Sendo: Ea – erro absoluto médio (kg ha⁻¹); Er – erro relativo (%); r – coeficiente de correlação de Pearson (adimensional); d – índice “ d ” (adimensional); Y_{r_i} – valores reais médios de produtividade observados no i -ésimo experimento (kg ha⁻¹); Y_{s_i} – valores simulados de produtividade no i -ésimo experimento (kg ha⁻¹); n –

número de experimentos nas localidades (adimensional); c – índice “ c ” (adimensional).

Os valores do índice “ c ” indicam o seguinte desempenho do modelo testado: “ótimo” (“ c ” > 0,85); “muito bom” ($0,76 \leq “c” \leq 0,85$); “bom” ($0,66 \leq “c” \leq 0,75$); “mediano” ($0,61 \leq “c” \leq 0,65$); “sofrível” ($0,51 \leq “c” \leq 0,60$); “mau” ($0,41 \leq “c” \leq 0,50$); e, “péssimo” (“ c ” ≤ 0,40) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1 Calibração do modelo AquaCrop

A partir das análises iniciais com a finalidade de calibração, utilizando-se os valores recomendados no Manual de Referência do AquaCrop (FAO, 2017), foi possível identificar os parâmetros mais sensíveis, que mereceriam maior atenção nas análises. Assim, foram identificados e avaliados: o coeficiente de declínio do dossel (CDC); coeficiente máximo da cultura ($K_{CTR,x}$); parâmetro de produção pela água (WP^*); e, índice de colheita de referência (HI_o).

A sensibilidade dos parâmetros WP^* , $K_{CTR,x}$, CDC e HI_o deve-se à sua participação nas duas principais equações que integram o AquaCrop, sendo que uma determina a biomassa (B ; EQUAÇÃO 1.1) e a outra a produtividade da cultura (Y ; EQUAÇÃO 1.2).

$$B = WP \cdot \sum_{i=1}^n Tr_i \quad (1.1)$$

$$Y = B \cdot HI \quad (1.2)$$

Sendo: B – biomassa acumulada (kg ha^{-1}); 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); Y – produtividade da cultura (kg ha^{-1}); HI – índice de colheita da cultura (adimensional) (STEDUTO et al., 2008).

O AquaCrop não simula passos intermediários envolvendo acúmulo de biomassa. Assim, os processos são resumidos e integrados no parâmetro WP^* . O

WP^* é normalizado para a ET_o e concentração de CO_2 na atmosfera, podendo variar moderadamente em resposta ao regime de fertilidade e permanecer constante sob condições de déficit hídrico, exceto quando estresses hídricos severos são alcançados (STEDUTO et al., 2008; STEDUTO et al., 2009).

A transpiração da cultura (T_r) depende da fração da área do solo coberta pelo dossel, quando não há estresse suficiente para limitar a abertura estomática, sendo calculada a partir da ET_o e coeficiente de transpiração da cultura ($K_{CTR,x}$). Logo, indiretamente, o parâmetro $K_{CTR,x}$, também está sendo considerado na EQUAÇÃO 1.1 (STEDUTO et al.; 2012).

O índice de colheita de referência (HI_o) é um parâmetro indicado no Manual de Referência do AquaCrop (FAO, 2017) como conservador. Assim, a princípio, não seria necessário o ajuste do parâmetro, e o seu valor poderia ser utilizado para a cultura do milho em qualquer lugar do mundo. O valor indicado no Manual foi obtido de cultivares de alto rendimento, sem qualquer restrição em seu cultivo. Porém, sabe-se que algumas cultivares podem ter o HI_o ligeiramente mais alto ou baixo do que cultivares comuns (STEDUTO et al., 2012), o que justificou e levou à decisão de realizar o ajuste mais fino do parâmetro no presente trabalho.

O coeficiente de declínio do dossel (CDC) é um parâmetro que depende do cultivar e condições de campo em que a planta está inserida. O CDC se inicia um pouco mais tarde que o começo da senescência do dossel, devido à senescência iniciar-se geralmente nas folhas mais velhas, localizadas na parte inferior sombreada pela planta. Logo, o atraso ocorre porque as folhas mais velhas contribuem pouco à transpiração e fotossíntese. Desta forma, o começo da senescência da cultura no AquaCrop ocorre no momento em que a transpiração do dossel e fotossíntese começar a declinar, quando a maturidade se aproxima (STEDUTO et al., 2009).

No decorrer da calibração dos parâmetros para as culturas soja e milho verificaram-se aspectos limitantes no processo. Não foi possível realizar a calibração dos parâmetros para o mesmo cultivar de soja e milho. A utilização de mais de um cultivar no processo de calibração proporcionou dificuldades, como, por exemplo, os distintos requerimentos de graus-dia pelos cultivares em cada estágio fenológico. Cada cultivar se comporta de forma diferente se inserido em determinado ambiente. Na literatura (ABENDIPOUR et al., 2012; AKUMAGA; TARHULE; YUSUF, 2017; BATTISTI; SENTELHAS; BOOTE, 2017) encontram-se trabalhos que analisaram muito mais parâmetros no processo de calibração (duração dos estádios

fenológicos, coeficiente de crescimento da cultura, entre outros parâmetros considerados conservativos) que os considerados no presente trabalho. A utilização de mais de um cultivar limitou a investigação de mais parâmetros ao mesmo tempo no processo de calibração. Contudo, acredita-se que foram limitações e não restrições, pois muitos dos parâmetros investigados em trabalhos da literatura são considerados conservativos, em que os idealizadores do AquaCrop descrevem que não precisam ser calibrados. Assim, destaca-se que os resultados obtidos se referem a um processo de calibração médio para as culturas soja e milho, na região dos Campos Gerais-PR.

2.5.1.1 Parâmetros do AquaCrop obtidos para a cultura da soja

Na TABELA 2.5 encontram-se apresentados os valores dos parâmetros calibrados no AquaCrop para a cultura da soja. Observou-se que alguns parâmetros tiveram maior variação dos valores calibrados. O motivo deveu-se provavelmente aos experimentos utilizados no processo de calibração, que apresentaram cultivares, estádios fenológicos e população de plantas diferentes ao longo dos anos.

TABELA 2.5 – PARÂMETROS FINAIS CALIBRADOS, CONSIDERANDO 19 EXPERIMENTOS COM A CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, ESTADO DO PARANÁ.

Símbolo	Descrição	Valores
WP^*	Parâmetro de produção pela água normalizada para ET_0 e CO_2 ($g\ m^{-2}$)	16 a 20
$K_{CTR,x}$	Coefficiente da cultura quando o dossel está completo, mas antes da senescência	1,10 a 1,15
CDC	Coefficiente de declínio do dossel ($\%\ GDD^{-1}$)	4,8 a 14,5
H_{lo}	Índice de colheita de referência (%)	26 a 47

FONTE: A autora (2018).

Os principais aspectos observados nos parâmetros calibrados para a cultura da soja foram (TABELA 2.5):

- O índice de produtividade de água WP^* variou conforme o intervalo recomendado no manual do modelo para culturas C_3 , entre 15 e 20 $g\ m^{-2}$ (RAES et al., 2017);

- O coeficiente da cultura ($K_{CTR,x}$) teve variação entre 1,10 e 1,15. Os valores iniciais de $K_{cmáx}$ foram retirados de Steduto et al. (2012), que os considerou valores de referência para a cultura da soja. No entanto, variações podem ocorrer

dependendo do genótipo e condição em que o cultivo está sendo realizado. Baseando-se no método de tentativa e erro utilizado por muitos autores, o intervalo encontrado (1,10 a 1,15) não diferiu muito dos valores recomendados por Steduto et al. (2012) e Battisti, Sentelhas e Boote (2017), respectivamente;

– O coeficiente de declínio do dossel (*CDC*) teve variação considerável. O *CDC* controla o quão rápido o dossel senesce até o final do ciclo da cultura (ABENDIPOUR et al., 2012), dependendo, principalmente, da duração de cada estágio fenológico. Assim, como ele foi calibrado para diferentes genótipos houve variação dos valores.

– O índice de colheita de referência (*HI_o*) pode variar entre genótipos, dependendo também da condição edafoclimática em que a planta está inserida, por isso houve grande variação dos valores (26 a 47%). Battisti, Sentelhas e Boote (2017) obtiveram *HI_o* de 45% para a soja, em condições climáticas semelhantes às do presente estudo.

De forma geral, os erros absolutos e relativos obtidos nas análises de calibração para a cultura da soja foram pequenos (TABELA 2.6). O maior valor ocorreu em Ponta Grossa, sendo $Ea = 220 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 7,43\%$ (genótipo NA5909RG, safra 2012/2013). Os erros absolutos e relativos médios encontrados para Arapoti ($Ea = 126,33 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 2,53\%$), Castro ($Ea = 82,44 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 2,27\%$), Itaberá ($Ea = 92,33 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 2,42\%$) e Ponta Grossa ($Ea = 112,25 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 2,78\%$) foram muito parecidos. Em média, considerando todas as safras, obteve-se erro absoluto $97,21 \text{ kg ha}^{-1}$ e relativo $Er = 2,54\%$.

Com exceção de Arapoti ($R^2 = 0,77$ e $d = 0,87$), os coeficientes de determinação e índice “*d*” obtidos nas demais localidades tiveram resultados excelentes ($R^2 = 0,99$; $d > 0,98$), indicando perfeita associação entre os valores de produtividade estimada e observada (FIGURA 2.1). Arapoti e Itaberá tiveram o inconveniente de possuírem apenas três safras para serem analisadas na regressão linear, o que prejudica a interpretação dos resultados obtidos (TABELA 2.6 e FIGURA 2.1). Arapoti ainda apresentou uma limitação a mais, devido às três produtividades das safras ficarem relativamente próximas. No entanto, mesmo com as limitações, os valores de $R^2 = 0,77$ e $d = 0,87$ (FIGURA 2.1a) obtidos em Arapoti podem ser considerados bons. De forma geral, os valores de $R^2 = 0,98$ e índice $d = 0,99$ considerando as produtividades medidas e estimadas em todas as localidades

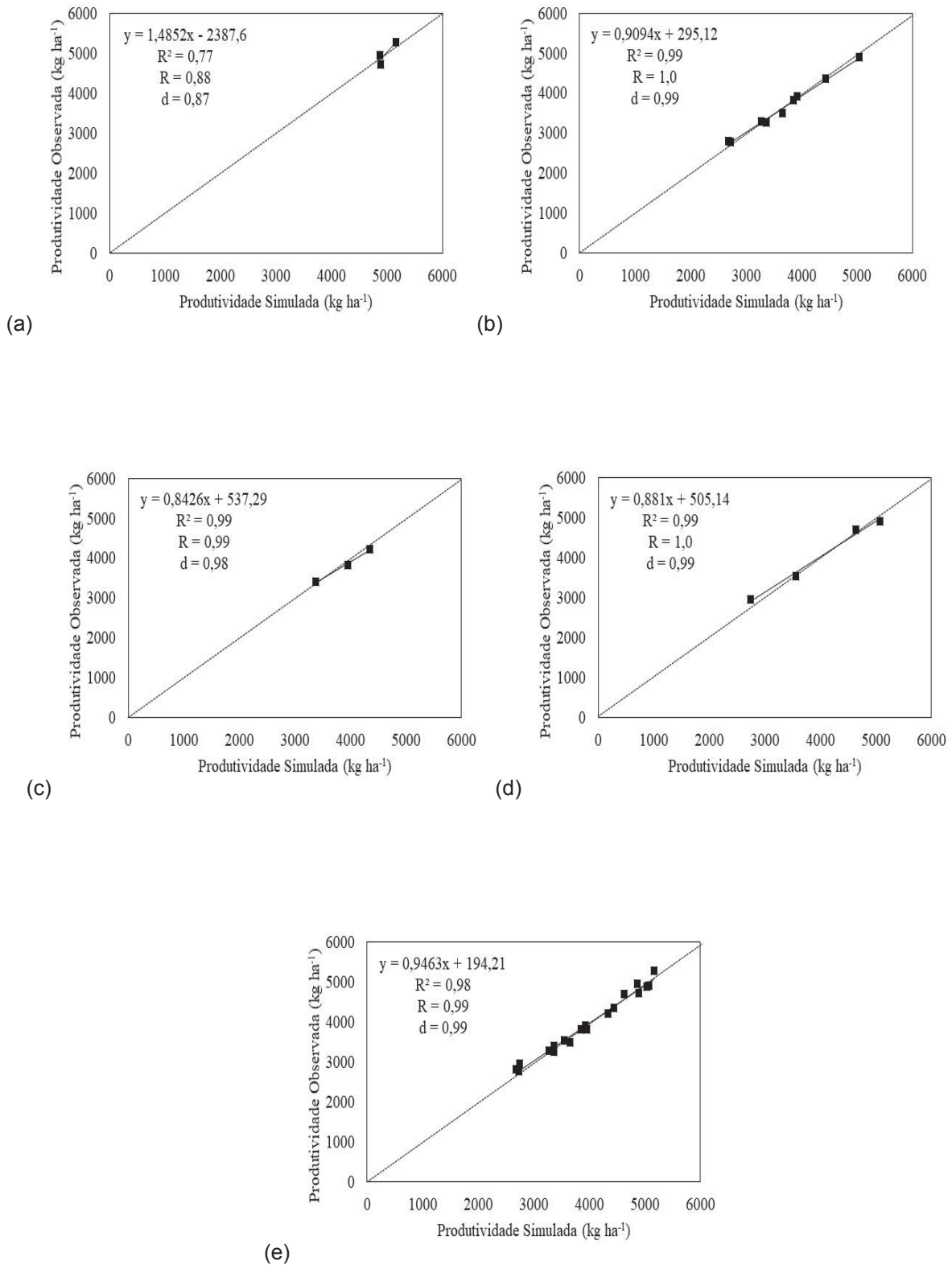
evidenciaram excelentes resultados na associação e calibração dos parâmetros analisados no AquaCrop (FIGURA 2.1e).

TABELA 2.6 – ERROS ABSOLUTO (Ea) E RELATIVO (Er) OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO, ENTRE AS PRODUTIVIDADES OBSERVADAS (Yr) E SIMULADAS (Ys) PARA OS GENÓTIPOS DE SOJA, NO MODELO AQUACROP, EM EXPERIMENTOS INSTADOS EM ARAPOTI, CASTRO, ITABERÁ E PONTA GROSSA.

Local	Genótipo	Safrá	Yr	Ys	Ea	Er
			----- (kg ha ⁻¹) -----			
Arapoti	NK3363	2010/11	4891,0	4740,0	151	3,19
Arapoti	M5917IPRO	2015/16	5163,0	5291,0	-128	2,42
Arapoti	M5917IPRO	2015/16	4868,0	4968,0	-100	2,01
Todas	—	—	4974,0	4999,7	126,3	2,53
Castro	NK3363	2007/08	3370,0	3259,0	111	3,41
Castro	NK3363	2010/11	3274,0	3296,0	-22	0,67
Castro	NA5909RG	2011/12	3927,0	3917,0	10	0,26
Castro	NA5909RG	2011/12	3656,0	3497,0	159	4,55
Castro	NA5909RG	2012/13	2678,0	2814,0	-136	4,83
Castro	NA5909RG	2012/13	2727,0	2775,0	-48	1,73
Castro	BMX Apolo RR D.Mario 5.8	2014/15	5037,0	4892,0	145	2,96
Castro	M5917IPRO	2015/16	4438,0	4358,0	80	1,84
Castro	M5917IPRO	2015/16	3854,0	3823,0	31	0,81
Todas	—	—	3662,3	3625,7	82,4	2,27
Itaberá	NA5909RG	2012/13	4343,0	4226,0	117	2,77
Itaberá	NA5909RG	2013/14	3371,0	3397,0	-26	0,77
Itaberá	BMX Apolo RR D.Mario 5.8	2014/15	3957,0	3823,0	134	3,51
Todas	—	—	3890,3	3815,3	92,3	2,42
Ponta Grossa	NK3363	2006/07	3556,0	3543,0	13	0,37
Ponta Grossa	NA5909RG	2012/13	2742,0	2962,0	-220	7,43
Ponta Grossa	NA5909RG	2014/15	4634,0	4696,0	-62	1,32
Ponta Grossa	NA5909RG	2015/16	5078,0	4924,0	154	3,13
Todas	—	—	4002,5	4031,3	112,3	2,78
Todas as localidades		—	—	—	97,21	2,46

FONTE: A autora (2018).

FIGURA 2.1 – ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E SEUS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) E ÍNDICE “ d ”, OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO, ENTRE A PRODUTIVIDADE DE SOJA OBSERVADA E SIMULADA COM O MODELO AQUACROP, EM: a) ARAPOTI, b) CASTRO, c) ITABERÁ, d) PONTA GROSSA, e) ARAPOTI, CASTRO, ITABERÁ E PONTA GROSSA JUNTOS.



FONTE: A autora (2018).

2.5.1.2 Parâmetros do AquaCrop obtidos para a cultura do milho

Na TABELA 2.7 encontram-se apresentados os valores dos parâmetros calibrados no AquaCrop para a cultura do milho.

TABELA 2.7 – PARÂMETROS FINAIS CALIBRADOS, CONSIDERANDO 26 EXPERIMENTOS COM A CULTURA DO MILHO, NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, ESTADO DO PARANÁ.

Símbolo	Descrição	Valores
WP^*	Produtividade de água normalizada para ET_0 e CO_2 ($g\ m^{-2}$)	32 a 33
$K_{CTR,x}$	Coeficiente da cultura quando o dossel está completo, mas antes da senescência	1,05
CDC	Coeficiente de declínio do dossel ($\% \text{ dia}^{-1}$)	6,2 a 7,1
HI_0	Índice de colheita de referência ($\%$)	30 a 53

FONTE: A autora (2018).

Os principais aspectos observados nos parâmetros calibrados para a cultura do milho foram:

- O índice de produtividade de água WP^* (TABELA 2.7) variou conforme o intervalo recomendado no manual do AquaCrop para culturas C_4 (30 a 35 $g\ m^{-2}$; RAES et al., 2017). Os valores encontrados foram menores que 33,7 $g\ m^{-2}$, obtido por Hsiao et al. (2009), para a cultura do milho, na Califórnia;

- Não houve variação do coeficiente da cultura $K_{CTR,x}$ (TABELA 2.7), permanecendo o mesmo valor proposto pelo manual de referência do modelo (FAO, 2017). Heng et al. (2009), Hsiao et al. (2009) e Abendipour et al. (2012) também utilizaram $K_{CTR,x} = 1,05$ para o milho;

- O coeficiente de declínio do dossel (CDC) depende, principalmente, do comportamento do cultivar no ambiente. Nas análises, os valores do CDC (TABELA 2.7) tiveram pouca variação em comparação aos valores obtidos para a soja (TABELA 2.5). Heng et al. (2009), Hsiao et al. (2009), Abendipour et al. (2012) e Akumaga, Tarhule e Yusuf (2017) encontraram $CDC = 1,06\% \text{ dia}^{-1}$ para o milho, em regiões distintas da utilizada no presente trabalho.

- O índice de colheita de referência (HI_0) pode variar entre genótipos, dependendo também do ambiente em que a cultura está inserida. Os valores do HI_0 , tiveram grande variação entre as cultivares utilizadas (23%; TABELA 2.7), provavelmente devido a diferença entre elas, população de plantas e variação das condições climáticas das safras. Hsiao et al. (2009) obtiveram $HI_0 = 48\%$ para as cultivares distintas das utilizadas no presente estudo: Dekalb XL22, Dekalb XL25A, Dekalb 535 e Dekalb 591.

De forma geral, os erros absolutos e relativos obtidos nas análises de calibração para a cultura do milho também foram pequenos (TABELA 2.8). O maior valor ocorreu em Castro, sendo $Ea = 121 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 1,17\%$ (genótipo P2530, safra 2015/2016). Os erros absolutos e relativos médios encontrados para Castro ($Ea = 70,09 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 0,59\%$), Ponta Grossa ($Ea = 75,44 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 0,68\%$) e Socavão ($Ea = 51,83 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 0,41\%$) foram pequenos e muito parecidos. Em média, considerando todas as safras, obteve-se erro absoluto $67,73 \text{ kg ha}^{-1}$ e relativo $Er = 0,57\%$. Os valores de Ea médios obtidos para o milho nos Campos Gerais foram melhores que o verificado por Abendipour et al. (2012) e Akumaga, Tarhule e Yusuf (2017) para a Índia (170 kg ha^{-1}) e Nigéria (164 kg ha^{-1}), respectivamente.

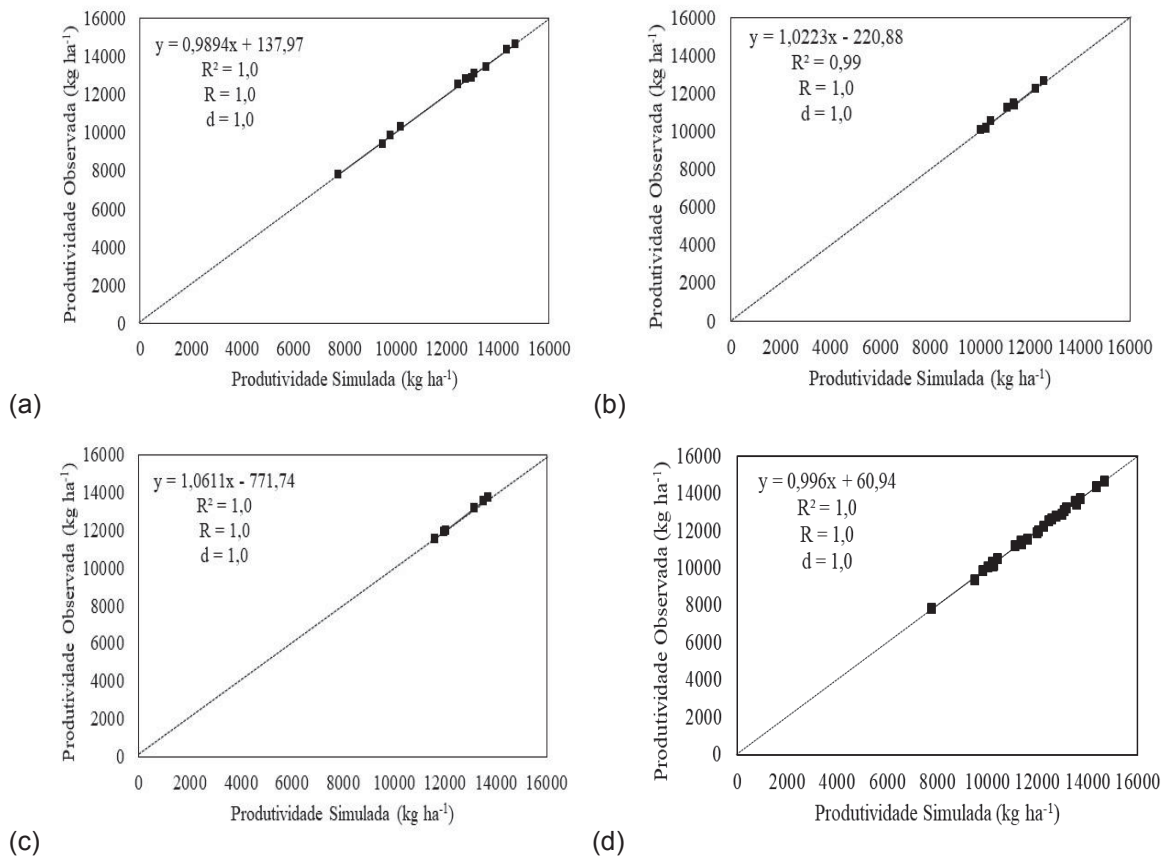
Os coeficientes de determinação e índice “ d ” obtidos em Castro, Ponta Grossa e Socavão tiveram resultados excelentes ($R^2 = 1,0$; $d = 1,0$), indicando perfeita associação entre os valores de produtividade estimada e observada (FIGURA 2.2). Os valores de $R^2 = 1,0$ e índice $d = 1,0$, considerando as produtividades medidas e estimadas nas três localidades, evidenciaram também excelentes resultados na associação e calibração dos parâmetros analisados no AquaCrop para a região dos Campos Gerais (FIGURA 2.2d). Resultados semelhantes foram verificados para a cultura do milho por Abendipour et al. (2012), na Índia, e Akumaga, Tarhule e Yusuf (2017), na Nigéria.

TABELA 2.8 – ERROS ABSOLUTO (E_a) E RELATIVO (E_r) OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO, ENTRE AS PRODUTIVIDADES OBSERVADAS (Y_r) E SIMULADAS (Y_s) PARA OS GENÓTIPOS DE MILHO, NO MODELO AQUACROP, EM EXPERIMENTOS INSTADOS EM CASTRO, PONTA GROSSA E SOCAVÃO.

Local	Genótipo	Safrá	Y_r	Y_s	E_a	E_r
			----- (kg ha ⁻¹) -----			(%)
Castro	P32R22H	2011/12	12453	12550	97	0,77
Castro	P30R50YH	2013/14	13554	13440	-114	0,85
Castro	AG8041PRO	2013/14	13078	13088	10	0,08
Castro	P30F53YH	2013/14	14681	14659	-22	0,15
Castro	Celeron TL	2013/14	12987	12896	-91	0,71
Castro	DKB240PRO	2015/16	14348	14366	18	0,13
Castro	P30R50YH	2015/16	12734	12819	85	0,66
Castro	P1630H	2015/16	9815	9859	44	0,45
Castro	P2530	2015/16	10188	10309	121	1,17
Castro	DKB240PRO	2015/16	9497	9400	-97	1,03
Castro	P30R50YH	2015/16	7758	7830	72	0,92
Todas	—	—	11917,5	11928,7	70,09	0,59
Ponta Grossa	P30R50H	2012/13	12239	12233	-6	0,05
Ponta Grossa	P32R22H	2013/14	10233	10117	-116	1,15
Ponta Grossa	P32R22H	2013/14	10262	10192	-70	0,69
Ponta Grossa	P30F53YH	2014/15	11369	11336	-33	0,29
Ponta Grossa	AG8041PRO	2015/16	11099	11217	118	1,05
Ponta Grossa	Velox TL	2015/16	10017	10060	43	0,43
Ponta Grossa	AS 1656PRO2	2015/16	11347	11465	118	1,03
Ponta Grossa	WXA 504 Waxy	2015/16	10417	10530	113	1,07
Ponta Grossa	DKB 240PRO	2015/16	12577	12639	62	0,49
Todas	—	—	11062,2	11087,7	75,44	0,68
Socavão	P30R50H	2011/12	13513	13584	71	0,52
Socavão	AG8041YG	2011/12	11981	11924	-57	0,48
Socavão	P32R22H	2011/12	13713	13741	28	0,20
Socavão	P1630H	2012/13	12045	12021	-24	0,20
Socavão	30F53YH	2012/13	13155	13218	63	0,48
Socavão	Celeron TL	2012/13	11606	11538	-68	0,59
Todas	—	—	12668,8	12671,0	51,83	0,41
Todas as localidades			—	—	67,73	0,57

FONTE: A autora (2018).

FIGURA 2.2 – ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E SEUS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) E ÍNDICE “ d ”, OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO, ENTRE A PRODUTIVIDADE DE MILHO OBSERVADA E SIMULADA COM O MODELO AQUACROP, EM: a) CASTRO, b) PONTA GROSSA, c) SOCAVÃO, d) CASTRO, PONTA GROSSA E SOCAVÃO JUNTOS.



FONTE: A autora (2018).

2.5.2 Validação do modelo AquaCrop

2.5.2.1 Validação do AquaCrop para a cultura da soja

Com os parâmetros calibrados para a cultura da soja (TABELA 2.5), procedeu-se as análises de validação do modelo AquaCrop (TABELA 2.9 e FIGURA 2.3). Mesmo ajustando os parâmetros, verificou-se aumento dos erros nas análises de validação. O maior erro absoluto e relativo ocorreu em Castro ($Ea = -1187 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 36,33\%$; TABELA 2.9). No entanto, em média, considerando todas as safras e localidades analisadas, obteve-se $Ea = 277,69 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 6,95\%$ entre as produtividades reais e estimadas, o que correspondeu ao aumento de apenas 4,49% em relação ao $Er = 2,46\%$, verificado na calibração. Mas é importante observar que Castro apresentou erro relativo médio superiores a 10%: Arapoti teve $Er = 11,57\%$

($Ea = 522,67 \text{ kg ha}^{-1}$); Castro $Er = 8,59\%$ ($Ea = 316,36 \text{ kg ha}^{-1}$); Itaberá $Er = 1,54\%$ ($Ea = 59,8 \text{ kg ha}^{-1}$) e Ponta Grossa $Er = 4,23\%$ ($196,8 \text{ kg ha}^{-1}$). Battisti e Sentelhas (2014) encontraram erro absoluto médio $Ea = 284 \text{ kg ha}^{-1}$ para a soja, em diversas localidades no Sul do Brasil.

Em Castro, foram observados os dois maiores Er entre os experimentos validados, sendo de 25,25% (1101 kg ha^{-1}), para o cultivar BMX Apolo RR-D.Mario 5.8, e 36,33% (-1187 kg ha^{-1}), para o cultivar M5917IPRO. No processo de calibração, os genótipos repetiram poucas vezes, e a determinação dos parâmetros pode ter sido prejudicada, resultando em Ea maiores que 1000 kg ha^{-1} . Hsiao et al. (2009) afirmam que erros maiores que 1000 kg ha^{-1} são considerados além dos limites de confiança do modelo. Porém, os dois erros dos experimentos de Castro e um em Arapoti não influenciaram o Er e Ea médios, pois 24 experimentos tiveram Er abaixo de 10% (TABELA 2.9), diluindo os valores dos erros médios finais.

Observou-se claramente para a localidade de Castro (FIGURA 2.3b), que as safras que apresentaram produtividade real extrema (mais baixa ou mais alta que a média) foram responsáveis pelos maiores erros absolutos e relativos obtidos. Akumaga, Tarhule e Yusuf (2017) e Battisti, Sentelhas e Boote (2017) afirmam que os modelos podem superestimar as produtividades simuladas, visto que o mesmo foi desenvolvido para estimar a produtividade que pode ser alcançada teoricamente, não contabilizando fatores, como pragas e doenças, e efeito do fotoperíodo no desenvolvimento da soja, levando ao aumento ou diminuição na estimativa da produtividade para datas de plantio precoce e tardia.

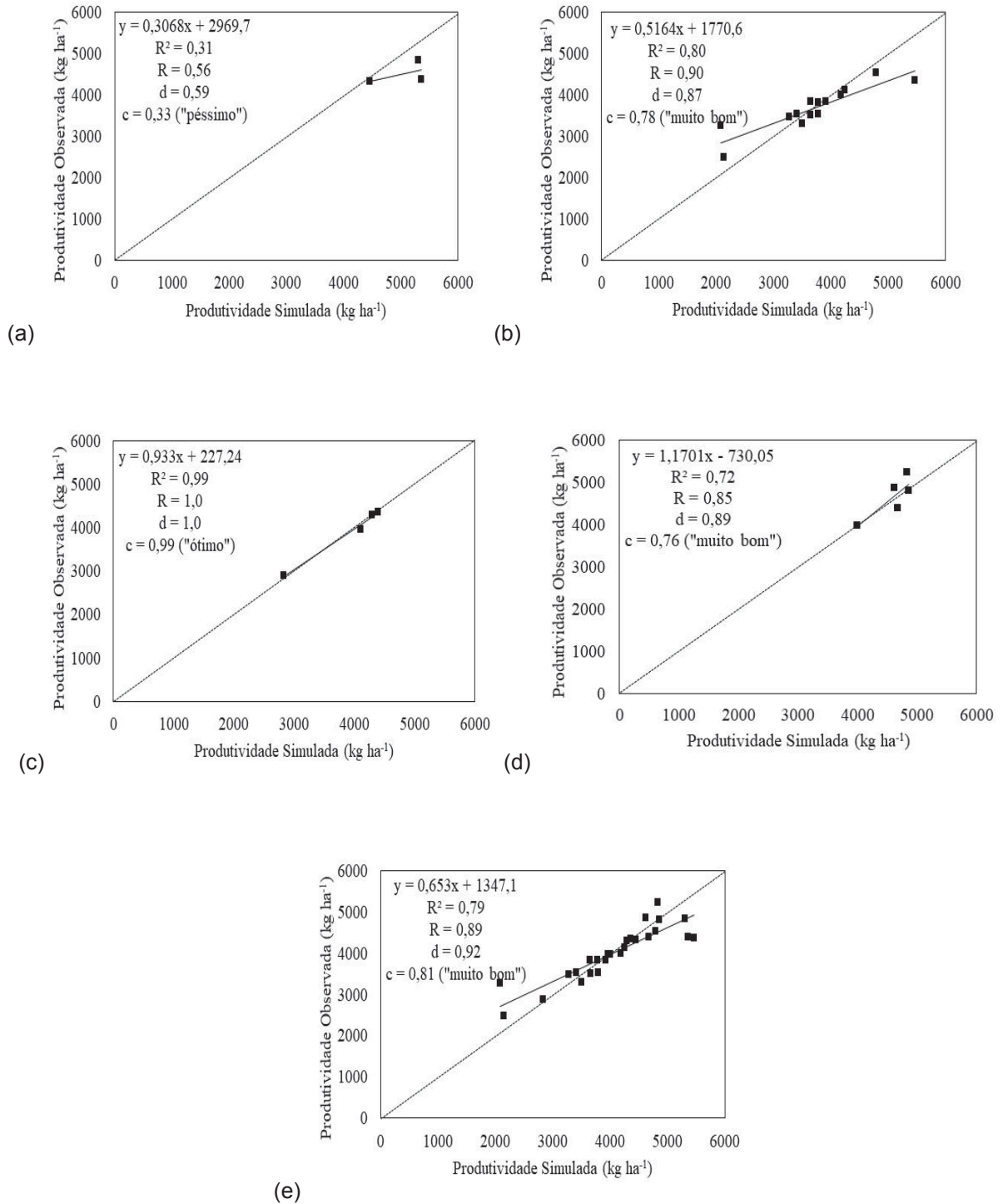
De forma geral, as análises de validação realizadas nos municípios de Castro ($R^2 = 0,80$), Itaberá ($R^2 = 0,99$) e Ponta Grossa ($R^2 = 0,72$) tiveram bom coeficiente de determinação entre produtividades reais e simuladas (FIGURA 2.3). O bom resultado obtido para Itaberá ($R^2 = 0,99$) foi uma surpresa, mas conforme esperado, Arapoti ($R^2 = 0,31$) apresentou os piores resultados, provavelmente devido aos poucos dados disponíveis para a calibração e validação do AquaCrop. O resultado obtido ressalta a importância da quantidade e consistência dos dados para realizar as análises de calibração e validação.

TABELA 2.9 – ERROS ABSOLUTO (Ea) E RELATIVO (Er) OBTIDOS NA VALIDAÇÃO, ENTRE AS PRODUTIVIDADES OBSERVADAS (Yr) E SIMULADAS (Ys) PARA A CULTURA DA SOJA, NO MODELO AQUACROP, PARA OS EXPERIMENTOS INSTALADOS EM ARAPOTI, CASTRO, ITABERÁ E PONTA GROSSA.

Local	Genótipo	Safrá	Yr	Ys	Ea	Er
			----- (kg ha ⁻¹) -----			
Arapoti	NK3363	2010/11	4454,0	4324,0	130	3,01
Arapoti	M5917IPRO	2015/16	5307,0	4835,0	472	9,76
Arapoti	NA5909	2015/16	5354,0	4388,0	966	22,01
Todas	—	—	5038,3	4515,7	522,67	11,57
Castro	NK3363	2010/11	3654,0	3503,0	151	4,31
Castro	NK3363	2010/11	3500,0	3291,0	209	6,35
Castro	NK3363	2010/11	3277,0	3468,0	-191	5,51
Castro	NA5909	2012/13	3918,0	3836,0	82	2,14
Castro	NA5909	2012/13	3407,0	3533,0	-126	3,57
Castro	NA5909	2014/15	4249,0	4127,0	122	2,96
Castro	NA5909	2014/15	4186,0	3991,0	195	4,89
Castro	BMX Apolo RR-D.Mario 5.8	2014/15	5462,0	4361,0	1101	25,25
Castro	NA5909	2015/16	4787,0	4530,0	257	5,67
Castro	M5917IPRO	2015/16	3784,0	3821,0	-37	0,97
Castro	NA5909	2015/16	3653,0	3828,0	-175	4,57
Castro	NA5909	2015/16	3786,0	3537,0	249	7,04
Castro	M5917IPRO	2015/16	2080,0	3267,0	-1187	36,33
Castro	NA5909	2015/16	2141,0	2488,0	-347	13,95
Todas	—	—	3706,0	3684,4	316,36	8,59
Itaberá	NA5909	2013/14	2833,0	2884,0	-51	1,77
Itaberá	NA5909	2013/14	4288,0	4284,0	4	0,09
Itaberá	NA5909	2014/15	4395,0	4352,0	43	0,99
Itaberá	BMX Apolo RR-D.Mario 5.8	2015/15	4106,0	3965,0	141	3,56
Todas	—	—	3905,5	3871,3	59,75	1,54
Ponta Grossa	NK3363	2010/11	4676,0	4392,0	284	6,47
Ponta Grossa	NA5909	2014/15	3997,0	3966,0	31	0,78
Ponta Grossa	NA5909	2015/16	4857,0	4810,0	47	0,98
Ponta Grossa	M5917IPRO	2015/16	4835,0	5226,0	-391	7,48
Ponta Grossa	NA5909	2015/16	4627,0	4858,0	-231	4,76
Todas	—	—	4598,4	4650,4	196,80	4,23
Todas as localidades			—	—	277,69	6,95

FONTE: A autora (2018).

FIGURA 2.3 – ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E SEUS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) E ÍNDICES “ d ” E “ c ”, ENTRE A PRODUTIVIDADE DE SOJA MEDIDA E SIMULADA NO PROCESSO DE VALIDAÇÃO COM O MODELO AQUACROP, NAS LOCALIDADES DE: a) ARAPOTI, b) CASTRO, c) ITABERÁ, d) PONTA GROSSA; E, e) ARAPOTI, CASTRO, ITABERÁ E PONTA GROSSA JUNTOS.



FONTE: A autora (2018).

Os índices “*d*” obtidos nas análises tiveram resultados semelhantes aos verificados para os coeficientes de determinação (R^2), sendo superiores aos obtidos por Battisti, Sentelhas e Boote (2017), que obtiveram índice “*d*” = 0,68 para a soja no Sul do Brasil. Assim, verificam-se os seguintes desempenhos: Itaberá obteve desempenho “ótimo” ($c = 0,99$); Castro e Ponta Grossa desempenho “muito bom” ($c = 0,87$ e $0,76$, respectivamente); e, Arapoti desempenho “péssimo” ($c = 0,33$). O resultado de todas as safras analisadas conjuntamente evidenciou $R^2 = 0,79$, $d = 0,92$ e $c = 0,81$ no processo de validação, indicando desempenho “muito bom”. Os resultados são muito promissores, visto que apenas os parâmetros WP^* , $K_{CTR,x}$, CDC e HI_o tiveram seus valores melhor ajustados, conforme a importância identificada no processo de calibração do modelo AquaCrop.

2.5.2.2 Validação do AquaCrop para a cultura do milho

Com os parâmetros calibrados para a cultura do milho (TABELA 2.7), procedeu-se as análises de validação do modelo AquaCrop (TABELA 2.10). Mesmo ajustando os parâmetros, ainda se verificou nas análises de validação erro absoluto $Ea = 1178,0 \text{ kg ha}^{-1}$ e relativo $Er = 9,95\%$, entre as produtividades reais e estimadas, no distrito de Socavão, para o genótipo P30R50YH, na safra 2012/2013. Esse erro é considerado acima do limite de confiança de 1000 kg ha^{-1} (HSIAO et al., 2009).

Conforme observado para a soja, é importante ressaltar que a produtividade observada da safra 2012/2013 do milho ($Yr = 10659 \text{ kg ha}^{-1}$) ficou abaixo 20,8% da média das demais safras utilizadas para validação do milho ($13459,7 \text{ kg ha}^{-1}$), no AquaCrop, em Socavão. Piekarski (2016) também verificou nas análises para a soja e milho, nos Campos Gerais, que os maiores erros ocorreram nas cultivares cujas produtividades medidas mais se afastaram da média geral, concluindo que o modelo possui dificuldade em simular as produtividades que mais se afastam da média. No entanto, de forma geral, as análises realizadas no presente trabalho para Castro e Ponta Grossa apresentaram resultados de Ea e Er na validação bem semelhantes aos obtidos na calibração (TABELA 2.10).

Retirando a safra 2012/2013, para o genótipo P30R50YH, Socavão também apresentou resultados na validação ($Ea = 115,67 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 0,86\%$) muito próximos aos verificados na calibração ($Ea = 51,83 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 0,41\%$). Em média, considerando todas as safras e localidades analisadas, obteve-se $Ea =$

127,25 kg ha⁻¹ e $Er = 1,04\%$ entre as produtividades reais e estimadas, o que correspondeu ao aumento de apenas 0,47% em relação ao $Er = 0,57\%$ verificado na calibração. Na literatura, os valores de Ea médios encontrados foram de 110 kg ha⁻¹ para o milho na Índia (ABENDIPOUR et al., 2012) e 419 kg ha⁻¹ na Nigéria (AKUMAGA; TARHULE; YUSUF, 2017).

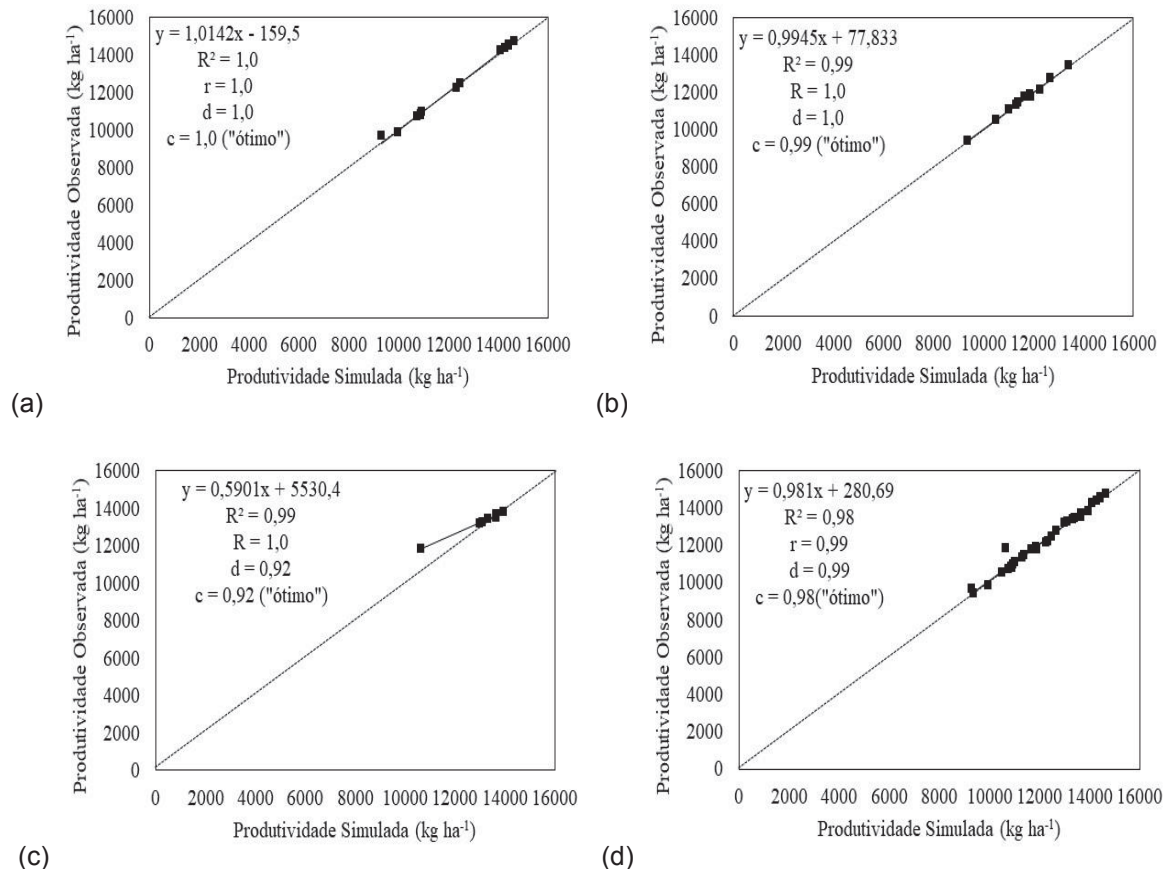
TABELA 2.10 – ERROS ABSOLUTO (Ea) E RELATIVO (Er) OBTIDOS NA VALIDAÇÃO, ENTRE AS PRODUTIVIDADES OBSERVADAS (Yr) E SIMULADAS (Ys) PARA A CULTURA DO MILHO, NO MODELO AQUACROP, PARA OS EXPERIMENTOS INSTALADOS EM CASTRO, PONTA GROSSA E SOCAVÃO.

Local	Genótipo	Safr	Yr	Ys	Ea	Er
			----- (kg ha ⁻¹) -----			
Castro	30R50YH	2014/15	14418	14530	112	0,77
Castro	AG8041PRO	2014/15	14293	14383	90	0,63
Castro	30F53YH	2014/15	14439	14482	43	0,30
Castro	Velox TL	2014/15	14111	14247	136	0,95
Castro	WXA 504 Waxy	2014/15	12495	12474	21	0,17
Castro	DKB 240PRO	2014/15	14663	14741	78	0,53
Castro	30R50YH	2014/15	10940	10948	8	0,07
Castro	AG8041PRO	2014/15	10902	10774	128	1,19
Castro	P32R22H	2014/15	10746	10715	31	0,29
Castro	30F53YH	2014/15	12340	12208	132	1,08
Castro	Velox TL	2014/15	9962	9850	112	1,14
Castro	AS 1656PRO2	2014/15	10884	10812	72	0,67
Castro	WXA 504 Waxy	2014/15	10899	10768	131	1,22
Castro	DKB 240PRO	2014/15	9309	9663	354	3,66
Todas	—	—	12171,5	12185,4	103,43	0,85
Ponta Grossa	30R50YH	2015/16	11902	11738	164	1,40
Ponta Grossa	AG8041PRO	2015/16	12681	12750	69	0,54
Ponta Grossa	P32R22H	2015/16	10520	10517	3	0,03
Ponta Grossa	30F53YH	2015/16	11306	11303	3	0,03
Ponta Grossa	Velox TL	2015/16	11663	11781	118	1,00
Ponta Grossa	AS 1656PRO2	2015/16	13401	13470	69	0,51
Ponta Grossa	WXA 504 Waxy	2015/16	11010	11073	63	0,57
Ponta Grossa	DKB 240PRO	2015/16	12273	12144	129	1,06
Ponta Grossa	30R50YH	2015/16	11878	11885	7	0,06
Ponta Grossa	P32R22H	2015/16	9352	9391	39	0,42
Ponta Grossa	30F53YH	2015/16	11383	11471	88	0,77
Todas	—	—	11579,0	11593	68,36	0,59
Socavão	P30R50YH	2012/13	10659	11837	1178	9,95
Socavão	AG8041PRO	2012/13	13341	13395	54	0,40
Socavão	P30R50YH	2013/14	13110	13239	129	0,97
Socavão	AG8041PRO	2013/14	13661	13686	25	0,18
Socavão	P2530H	2013/14	13674	13507	167	1,24
Socavão	30F53YH	2013/14	13970	13820	150	1,09
Socavão	Celeron TL	2013/14	13002	13171	169	1,28
Todas	—	—	13059,6	13236,4	267,43	2,02
Todas as localidades	—	—	—	—	127,25	1,04

FONTE: A autora (2018).

De forma geral, as análises de validação realizadas nos municípios de Castro ($R^2 = 1,0$), Ponta Grossa ($R^2 = 0,99$) e Socavão ($R^2 = 0,99$) tiveram coeficiente de determinação próximo da unidade, entre as produtividades observadas e simuladas (FIGURA 2.4). Os resultados ressaltam e indicam consistência nos parâmetros calibrados e utilizados nas análises de validação. A análise de regressão envolvendo as três localidades também mostrou excelente resultado ($R^2 = 0,98$).

FIGURA 2.4 - ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E SEUS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2) E ÍNDICES “ d ” E “ c ”, OBTIDOS ENTRE A PRODUTIVIDADE DE MILHO OBSERVADA E SIMULADA NO PROCESSO DE VALIDAÇÃO COM O MODELO AQUACROP, NAS LOCALIDADES DE: a) CASTRO; b) PONTA GROSSA; c) SOCAVÃO; E, d) CASTRO, PONTA GROSSA E SOCAVÃO JUNTOS.



FONTE: A autora (2018).

Os índices “ d ” obtidos nas análises também tiveram resultados semelhantes aos verificados para os coeficientes de determinação (R^2), obtendo-se em todas as análises valores muito próximos da unidade. Os resultados são muito promissores, pois indicam que os valores de produtividade (simulados e reais) além de estarem bem associados, se encontram sobre ou próximos a reta 1:1 no diagrama de

dispersão (FIGURA 2.4). Assim, verificou-se que o modelo AquaCrop obteve desempenho “ótimo” nas estimas de produtividades realizadas em Castro ($c = 1,0$), Ponta Grossa ($c = 0,99$) e Socavão ($c = 0,92$). Os resultados de todas as safras analisadas conjuntamente resultaram $R^2 = 0,98$, $d = 0,99$ e $c = 0,98$ no processo de validação, indicando desempenho “ótimo”. Os resultados são muito promissores, visto que Hsiao et al. (2009) também verificaram boa correlação entre as produtividades medidas e simuladas, obtendo valor de $r = 0,99$ para o milho na Califórnia. Akumaga, Tarhule e Yusuf (2017), por outro lado, obtiveram índice de concordância menor que o encontrado no presente trabalho ($d = 0,67$), para o milho na Nigéria.

2.6 CONCLUSÕES

O AquaCrop tem “ótimo” desempenho para o milho nas localidades de Castro, Ponta Grossa e Socavão. Para a soja, o desempenho varia entre “péssimo” e “ótimo” nas localidades de Arapoti, Castro, Itaberá e Ponta Grossa. O pior resultado foi obtido para o município de Arapoti, provavelmente devido aos poucos dados disponíveis para calibração e validação do modelo, ressaltando a importância da quantidade e consistência dos dados para realizar as análises de calibração e validação do modelo.

Os resultados indicam que o AquaCrop é capaz de estimar adequadamente as produtividades de soja e milho na região dos Campos Gerais - PR, podendo ser utilizado para auxiliar investigações e alternativas para incremento da produtividade das culturas na região.

2.7 REFERÊNCIAS

ABENDIPOUR, M.; SARANGI, A.; RAJPUT, T. B. S.; SINGH, M.; PATHAK, H. ; AHMAD, T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 110, p. 55-66, jul. 2012.

AIMIRI E. Calibration and testing of the AquaCrop model for rice under water and nitrogen management. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 47, n. 3, p. 387-403, fev. 2016.

AKUMAGA, U.; TARHULE, A.; YUSUF, A. A. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in

Nigeria, West Africa. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 225-234, jan. 2017.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**. Roma: FAO, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>>. Acesso em: 13 nov. 2016.

ÁLVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppens's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, dez. 2013.

ANDRADE, C. L. T.; AMARAL, T. A.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; HEINEMANN, A. B.; GARCIA, A. G.; TOJO-SOLER, C. M.; SILVA, D. F.; HICKMANN, C.; SANTANA, C. B.; MOURA, B. F.; CASTRO, L. A. **Modelagem do crescimento de culturas: aplicações à cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. Documentos, 91.

ASSENG, S.; EWERT, F.; ROSENZWEIG, C.; JONES, J. W.; HATFIELD, J. L.; RUANE, A. C.; BOOTE, K. J.; THORBURN, P. J.; RÖTTER, R. P.; CAMMARANO, D.; BRISSON, N.; BASSO, B.; MARTRE, P.; AGGARWAL, P. K.; ÂNGULO, C.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; CHALLINOR, A. J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R.; HENG, L.; HOOKER, J.; HUNT, L. A.; INGWERSEN, J.; IZAURRALDE, R. C.; KERSEBAUM, K. C.; MÜLLER, C.; NARESH KUMAR, S.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.; OLESEN, J. E.; OSBORNE, T. M.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; RIPOCHE, D.; SEMENOV, M. A.; SHCHERBAK, I.; STEDUTO, P.; STÖCKLE, C.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WALLACH, D.; WHITE, J. W.; WILLIAMS, J. R.; WOLF, J. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 6, p. 827-832, jun. 2013.

BATTISTI, R. ; SENTELHAS, P. C. ; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in Southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 200, p. 28-37, jan. 2017.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. New agroclimatic approach for soybean sowing dates recommendation: a case study. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 11, p. 1149-1156, nov. 2014.

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

CORRÊA, S. T. R.; LORENÇONI, R.; DOURADO NETO, D.; SCARPARE, F. V.; VIVIAN, R.; RUIZ, E. T. Aplicações e limitações da modelagem na agricultura – revisão. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 86, n. 1, p. 1-13. 2011.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **AquaCrop**. Rome, 2016 em: <<http://www.fao.org/aquacrop/software/en/>>. Acesso: 20 nov. 2016.

- HE, D.; WANG, E.; WANG, J.; ROBERTSON, M J. Data requirement for effective calibration of process-based crop models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 234, p. 136-148, mar. 2017.
- HENG, L. K.; HSIAO, T.; EVETT, S.; HOWELL, T.; STEDUTO, P. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 3, p. 488-498. 2009.
- 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.
- JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3/4, p. 235-265, jan. 2003.
- LIMA FILHO, A. F.; COELHO FILHO, M. A.; HEINEMANN, A. B. Calibração e avaliação do modelo CROPGRO para a cultura do feijão caupi no Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1286-1293, dez. 2013.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, J. F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J. L.; PALLONE FILHO, W. J.; NASSIF, D. S. P. Parametrization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for brazilian sugarcane. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 2, p. 304-315. 2011.
- MARTÍN, M. M. S.; OLESEN, J. E.; PORTER, J. R. A genotype, environment and management (GxExM) analysis of adaptation in winter wheat to climate change in Denmark. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 187, p. 1-13, abr. 2014.
- NASSIF, D. S. P.; MARIN, F. R.; PALLONE FILHO, W. J.; RESENDE, R. S.; PELLEGRINO, G. Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 311-318, mar. 2012.
- PIEKARSKI, K. R. Produtividades de soja e milho estimadas com o modelo AquaCrop na Região dos Campos Gerais. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- RACKL, M.; HANLEY, K. J. A methodical calibration procedure for discrete element models. **Powder Technology**, v. 307, p. 73-83, fev. 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**, Madison, v. 101, n. 3, p. 438-447. 2009.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual of AquaCrop: Annexes**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-br244e.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2017.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. Crop yield response to water. **FAO Irrigation and Drainage Paper 66**. Rome: FAO, 2012. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/016/i2800e/i2800e.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

STEDUTO, P.; RAES, D.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; HENG, L.; IZZI, G.; HOOGEVEEN, J. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. In: López-Francos A. (Ed.). **Drought management: scientific and technological innovations**. Zaragoza: CIHEAM, 2008. P. 285-292. (Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens; n.80).

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**, Madison, v. 101, n. 3, p. 426-437. 2009.

TIMSINA, J.; HUMPHREYS, E. Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice-wheat systems: a review. **Agricultural Systems**, v. 90, n. 1/3, p. 5-31, out. 2006.

WALLACH, D.; BUIS, S.; LECHARPENTIER, P.; BOURGES, J.; CLASTRE, P.; LAUNAY, M.; BERGEZ, J. E.; GUERIF, M.; SOUDAIS, J.; JUSTES, E. A package of parameter estimation methods and implementation for the STICS crop-soil model. **Environmental Modelling and Software**, v. 26, n. 4, p. 386-394, abr. 2011.

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

3 CAPÍTULO II: RESPOSTA DO AQUACROP ÀS ALTERAÇÕES DE SEUS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A CULTURA DO MILHO, EM CASTRO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS

3.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho analisar a sensibilidade dos principais parâmetros de entrada do AquaCrop, bem como a resposta do modelo nas estimativas da produtividade da cultura do milho, na região dos Campos Gerais, Estado do Paraná. As análises foram realizadas para a cultura do milho, genótipo 30R50YH, safra 2014/15, com plantio em 04/11/2014. Os parâmetros analisados referem-se à cultura (desenvolvimento do dossel e raiz, transpiração da cultura, produção de biomassa, produtividade e estresse devido à temperatura do ar e hídrico), solo (ponto de murcha permanente, capacidade de campo, saturação do solo e condutividade hidráulica do solo saturado) e manejo (fertilidade e cobertura orgânica do solo). Os parâmetros foram modificados individualmente, permanecendo os demais fixos. Posteriormente, com os resultados, foram calculados Índices de Sensibilidade (*IS*) que permitiram a identificação dos parâmetros mais sensíveis do AquaCrop, para a cultura do milho na região dos Campos Gerais. Os parâmetros referentes à cultura apresentaram maior sensibilidade, por estarem relacionados às principais equações do AquaCrop, que determinam a biomassa e a produtividade da cultura. Os parâmetros relacionados ao solo não obtiveram altos índices de sensibilidade no AquaCrop. A fertilidade no solo foi o parâmetro de manejo que apresentou o maior índice de sensibilidade, pois afeta o parâmetro de produção pela água (WP^*), que é atuante na equação que estima a biomassa da cultura e consequentemente determina a produtividade.

Palavras-Chave: Modelagem. Modelos matemáticos. Análise de sensibilidade. Estimativa da produtividade.

3.2 ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the sensitivity of the main input parameters of the AquaCrop, as well as the response of the model to estimates maize productivity in the Campos Gerais, Paraná State. The analyzes were carried out for maize, genotype 30R50YH, crop 2014/15, with planting on 11/11/2014. The analyzed the parameters that refer to the crop (canopy and root development, crop transpiration, biomass production, productivity and stress due to air temperature and water), soil (permanent wilting point, field capacity, soil moisture at saturation and saturated hydraulic conductivity) and management (fertility and organic soil cover). The parameters were modified individually, remaining the others fixed. Afterwards, sensitivity indexes (*IS*) were calculated and allowed the identification of the most sensitive parameters of the AquaCrop. The parameters related to the crop presented greater sensitivity, since they are related to the main equations of AquaCrop, which determine the biomass and crop productivity. The parameters related to the soil did

not show high sensitivity indexes. Soil fertility was the parameter of management that presented the highest sensitivity index, since it affects the parameter of production by water (WP^*), which is the main variable in the equations set estimating the biomass crop productivity.

Key-Words: Modeling. Mathematical models. Sensitivity analysis. Estimation of productivity.

3.3 INTRODUÇÃO

A utilização de modelos de crescimento de culturas vem aumentando, com o objetivo de compreender a interação existente entre o sistema solo-planta-atmosfera. São ferramentas que permitem ganhos em termos de tempo e economia de recursos computacionais e financeiros, podendo ser, também, eficazes na difusão de agrotecnologias (CONFALONIERI et al., 2006; BORGES JÚNIOR et al., 2008).

Modelos de crescimento de culturas são simplificações dos sistemas agroecológicos que pretendem representar. São modelos que podem incluir muitos parâmetros. Na utilização dos modelos, principalmente para locais e culturas diferentes das utilizadas em seu desenvolvimento, a obtenção e estabelecimento de parâmetros confiáveis é importante, pois as respostas do modelo dependem em grande parte de como os parâmetros representam bem o sistema solo-planta-atmosfera em estudo (WALLACH et al., 2001; MAKOWSKI et al., 2006).

Confalonieri et al. (2006) comentam que a compreensão da resposta do modelo em relação à variação dos valores dos parâmetros de suas equações é um dos pré-requisitos fundamentais para realizar a sua utilização. Diversos valores de parâmetros podem ser utilizados nas simulações, possibilitando a determinação do limite de confiança. Se houver grande diferença nos valores de saída em decorrência de pequenas mudanças nos valores dos parâmetros, pode-se suspeitar da confiabilidade do modelo, especialmente se os parâmetros sensíveis são difíceis de serem estimados com precisão.

A análise de sensibilidade é capaz de identificar a contribuição dos parâmetros nas variâncias de predição dos modelos, e ainda estimar aqueles atuantes, cuja incerteza dos valores podem afetar os resultados de saída (MAKOWSKI et al., 2006). A análise de sensibilidade é importante na construção, uso e compreensão de todos os tipos de modelos matemáticos (TARANTOLA;

SALTELLI, 2003), permitindo identificar e quantificar as incertezas que estão frequentemente associadas aos seus parâmetros (NASSIF; ASSAD, 2010).

A análise de sensibilidade é realizada modificando convenientemente um parâmetro do modelo, mantendo os demais fixos e observando as respostas correspondentes nas variáveis de saída. A análise permite determinar o nível de precisão requerido de um parâmetro, para tornar o modelo mais confiável (NASSIF; ASSAD, 2010; PALARETTI; MANTOVANI; SEDIYAMA, 2014).

Na literatura podem ser encontrados vários estudos, os quais já realizaram análise de sensibilidade em vários modelos de simulação de produção agrícola, podendo-se destacar: APSIM (ASSENG et al., 2002), CROPSYST (CONFALONIERI et al., 2006; CONFALONIERI; BREGAGLIO; ACUTIS, 2010), DSSAT (NASSIF; ASSAD, 2010), WARM (CONFALONIERI et al., 2006; CONFALONIERI; BREGAGLIO; ACUTIS, 2016), WOFOST (CONFALONIERI et al., 2006; CONFALONIERI; BREGAGLIO; ACUTIS, 2010; WANG et al., 2013), entre outros.

Buscando atender a demanda por modelos mais simples, a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) desenvolveu o AquaCrop, um modelo de simulação água-cultura que utiliza relativamente poucos parâmetros explícitos e intuitivos, contendo variáveis de entrada que exigem métodos simples de determinação. O AquaCrop procura estabelecer o equilíbrio entre simplicidade, precisão e robustez (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009).

Estudos visando a calibração, validação e entendimento das práticas de manejo nas simulações de produtividade com o AquaCrop já foram realizadas para diversas culturas e locais do mundo. Porém, entender a influência dos parâmetros de entrada no desempenho do modelo, nas estimativas da produtividade, é algo extremamente importante e que ainda precisam ser melhor explorados com o modelo para diversas regiões. Diante das considerações dispostas, teve-se por objetivo no presente trabalho analisar a sensibilidade dos principais parâmetros de entrada do AquaCrop, bem como a resposta do modelo na estimativa da produtividade da cultura do milho, na região dos Campos Gerais, Estado do Paraná.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Descrição da área de estudo

O presente trabalho foi realizado para o município de Castro, Estado do Paraná, latitude 24,85° S, longitude 49,93° W e 1001 metros de altitude. O clima na região, conforme a classificação climática de Koppen é Cfb, descrito como subtropical úmido, clima oceânico sem estação seca, com verão temperado (ÁLVARES et al., 2013). O solo da área experimental é classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico. O relevo da região varia de plano a suave ondulado. O sistema de preparo do solo é o plantio direto com cobertura vegetal homogênea, realizando-se rotação de cultura no inverno (trigo e aveia preta) e verão (soja e milho).

3.4.2 Modelo utilizado e dados de entrada

O modelo utilizado nas análises foi o AquaCrop, versão 5.0, disponibilizada pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO, 2016). Como entrada, o modelo requer dados referentes à cultura, solo, manejo praticado e clima do local.

A cultura utilizada no presente estudo foi o milho, genótipo 30R50YH, safra 2014/15, plantado no município de Castro/PR, em 04/11/2014, colhido em 24/04/2015, com maturação fisiológica em 07/04/2015. Os parâmetros da cultura utilizados para entrada no modelo foram disponibilizados pela Fundação ABC, sendo: estande de plantas (plantas ha⁻¹); datas de semeadura, maturação fisiológica e colheita; produtividade real (kg ha⁻¹); duração dos estádios fenológicos da cultura (emergência, máxima cobertura do dossel, florescimento, senescência e maturidade fisiológica) (TABELA 3.1). Os demais parâmetros de entrada referentes à cultura do milho basearam-se nos valores disponíveis no Manual de Referência do AquaCrop (TABELA 3.1).

As informações referentes à classificação de solo, coordenadas geográficas, altitude das parcelas experimentais e valores dos atributos físico-hídricos (TABELA 3.2) são de um trabalho realizado anteriormente na área experimental em estudo (PIEKARSKI, 2016).

Os dados de solo requeridos para entrada no modelo são a textura do solo, umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), umidade na capacidade de campo (θ_{CC} ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), conteúdo de água na saturação (θ_{SAT} ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e condutividade hidráulica saturada (K_{SAT} ; mm dia^{-1}). O modelo permite a inserção de até cinco camadas de solo, porém no presente estudo foram consideradas apenas três camadas de solo (0-0,10 m; 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m) para inserção dos atributos físico-hídricos.

Quanto ao manejo, foi considerado que houve a utilização de práticas que previnem o escoamento superficial e, por se tratar de área onde há prática do plantio direto, a cobertura do solo por restos vegetais foi considerada em 100%. Segundo o protocolo do experimento disponibilizado pela Fundação ABC, houve a realização do controle fitossanitário na safra. A fertilidade do solo foi considerada próxima ao ideal.

O AquaCrop necessita da entrada dos seguintes dados climáticos: temperaturas máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$); precipitação pluviométrica diária (mm dia^{-1}); evapotranspiração de referência diária (ET_o ; mm dia^{-1}); e, concentração média anual de CO_2 na atmosfera (ppm). Os dados climáticos diários utilizados, medidos na safra 2014/2015, foram disponibilizados pela Fundação ABC, sendo provenientes da estação agrometeorológica instalada à $24,85^{\circ}$ S de latitude, $49,93^{\circ}$ W de longitude e 1001 m de altitude. A evapotranspiração de referência (ET_o) diária durante o ciclo da cultura, na safra 2014/2015, foi estimada com o método de Penman-Monteith padronizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO; ALLEN et al., 1998). Para a concentração média anual de CO_2 na atmosfera (ppm) o modelo disponibiliza opções quanto ao local de obtenção dos dados. Assim, no presente estudo optou-se pela utilização dos dados obtidos no observatório de Mauna Loa, Havaí (RAES et al., 2009).

TABELA 3.1 – DADOS DE ENTRADA UTILIZADOS NO MODELO AQUACROP, PARA A CULTURA DO MILHO, GENÓTIPO 30F53YH, EM CASTRO-PR.

		(continua)
Parâmetro		Valores/ Intervalos
----- Fenologia da cultura -----		
Temperaturas limites do ar		
$T_{b_{inf}}$	Temperatura basal inferior (°C) ⁽¹⁾	8
$T_{b_{sup}}$	Temperatura basal superior (°C) ⁽¹⁾	30
Desenvolvimento da cobertura verde do dossel		
CC_0	Superfície do solo coberta por uma semente individual com 90% de emergência (cm ² planta ⁻¹) ⁽²⁾	6,5
	Número de plantas por hectare (pl ha ⁻¹) ⁽³⁾	67188
	Tempo da semeadura a emergência (graus dia) ⁽³⁾	69
CGC	Coefficiente de crescimento do dossel (% graus dia ⁻¹) ⁽¹⁾	1,053
CC_x	Máxima cobertura do dossel (%) ⁽³⁾	95
	Tempo da semeadura a o início da senescência (graus dia) ⁽⁴⁾	1764
CDC	Coefficiente de declínio do dossel (% graus dia ⁻¹) ⁽¹⁾	0,855
	Tempo da semeadura a maturidade fisiológica (graus dia) ⁽⁴⁾	2065
----- Florescimento -----		
	Tempo da semeadura ao florescimento (graus dia) ⁽⁴⁾	1085
	Duração do período de florescimento (graus dia) ⁽⁴⁾	186
	Determinação da cultura ligada à floração ⁽¹⁾	sim
----- Desenvolvimento da zona radicular -----		
Z_{min}	Profundidade efetiva mínima de enraizamento (m) ⁽³⁾	0,3
Z_{max}	Profundidade efetiva máxima de enraizamento (m) ⁽³⁾	2,8
	Fator de forma descrevendo a zona de expansão da raiz ⁽¹⁾	1,3
----- Transpiração da cultura -----		
$K_{C_{Tr,x}}$	Coefficiente da cultura quando o dossel está incompleto, mas antecede a senescência ⁽¹⁾	1,05
	Coefficiente de declínio da cultura como resultado do envelhecimento, deficiência de nitrogênio, etc. (% dia ⁻¹) ⁽¹⁾	0,3
	Efeito da cobertura do dossel na redução da evaporação do solo na fase final do ciclo ⁽³⁾	50
----- Produção de biomassa e formação do rendimento -----		
Produtividade de água da cultura		
WP^*	Produtividade de água normalizada para ET_0 e CO_2 (g m ⁻²) ⁽¹⁾	33,7
	Produtividade de água normalizada para ET_0 e CO_2 durante a formação da rendimento (como percentagem de WP^* antes da formação do rendimento) ⁽¹⁾	100
----- Índice de Colheita -----		
HI_0	Índice de colheita de referência (%) ⁽⁴⁾	50
	Possível incremento do índice de colheita devido ao estresse hídrico antes do florescimento (%) ⁽¹⁾	nenhum
	Excesso de frutos potenciais (%) ⁽²⁾	pequeno
	Coefficiente descrevendo o impacto positivo do crescimento vegetativo restrito durante a formação do rendimento no índice de colheita ⁽¹⁾	pequeno
	Coefficiente descrevendo o impacto negativo do fechamento estomático durante a formação do rendimento no índice de colheita ⁽¹⁾	forte
	Máximo aumento permitido do índice de colheita especificado (%) ⁽¹⁾	15

TABELA 3.1 – DADOS DE ENTRADA UTILIZADOS NO MODELO AQUACROP, PARA A CULTURA DO MILHO, GENÓTIPO 30F53YH, EM CASTRO-PR.

		(continuação)
Parâmetro		Valores/ Intervalos
----- Estresses -----		
Estresse hídrico no solo		
$\rho_{exp,lower}$	Limite de depleção da água no solo para expansão do dossel - limite inferior ⁽¹⁾	0,14
$\rho_{exp,upper}$	Limite de depleção da água no solo para expansão do dossel - limite superior ⁽¹⁾	0,72
	Fator de forma para o coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel ⁽¹⁾	2,9
ρ_{sto}	Limite de depleção da água no solo para controle estomático - limite superior ⁽¹⁾	0,69
	Fator de forma para o coeficiente de estresse hídrico para o controle estomático ⁽¹⁾	6,0
ρ_{sen}	Limite de depleção da água no solo para senescência do dossel - limite superior ⁽¹⁾	0,69
	Fator de forma para o coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel ⁽¹⁾	2,7
ρ_{pol}	Limite de depleção da água no solo para falha na polinização - limite superior ⁽¹⁾	0,8
	Percentual volumétrico no ponto anaerobiótico (com referência para a saturação) (%) ^{(4)/(3)}	5
Estresse pela temperatura do ar		
	Temperatura mínima do ar abaixo da qual a polinização começa a falhar (estresse pelo frio) (°C) ⁽¹⁾	10
	Temperatura máxima do ar acima da qual a polinização começa a falhar (estresse pelo calor) (°C) ⁽¹⁾	40
	Mínimos graus dias requeridos para total produção de biomassa (°C dia ⁻¹) ⁽¹⁾	12

FONTE: FAO, 2017.

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

TABELA 3.2 – ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO DE EXPERIMENTO COM MILHO, GENÓTIPO 30F53YH, REALIZADO NA FUNDAÇÃO ABC, EM CASTRO-PR, SAFRA 2014/15.

Textura	Camada (m)	----- Conteúdo de água no solo (m ³ m ⁻³) -----			$K_{sat}^{(4)}$ (mm dia ⁻¹)
		$\theta_{PMP}^{(1)}$	$\theta_{CC}^{(2)}$	$\theta_{SAT}^{(3)}$	
Argilosa	0-0,10	0,36	0,50	0,60	418,3
Argilosa	0,10-0,25	0,33	0,47	0,60	368,3
Argilosa	0,25-0,40	0,32	0,45	0,60	325,7

FONTE: Adaptado de Piekarski (2016).

NOTA: Umidade volumétrica do solo no: ⁽¹⁾ Ponto de murcha permanente; ⁽²⁾ Capacidade de campo; ⁽³⁾ Saturação; ⁽⁴⁾ Condutividade hidráulica do solo saturado.

A aba denominada condições iniciais do solo no momento do plantio, disponível no AquaCrop, permite a inserção do conteúdo inicial de água e salinidade no solo, bem como do desenvolvimento inicial da cultura e sua produção. No presente estudo considerou-se o conteúdo inicial de água no solo em 50% do total de água disponível no solo (entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente), equivalente a capacidade de retenção de água no solo na zona radicular. A salinidade não foi considerada para avaliação.

3.4.3 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade do AquaCrop foi realizada para os parâmetros de entrada referentes à cultura e manejo do solo. O procedimento consistiu em variar individualmente cada parâmetro de entrada (TABELA 3.1), permanecendo os demais fixos, observando-se as mudanças nos valores de produtividade estimada. Para avaliação da sensibilidade do modelo, utilizou-se o Índice de Sensibilidade (*IS*; EQUAÇÃO 3.1), conforme apresentado por Silva et al. (2009):

$$IS = \frac{I_{12} \cdot (R_1 - R_2)}{R_{12} \cdot (I_1 - I_2)} \quad (3.1)$$

Sendo: *IS* – índice de sensibilidade do parâmetro de entrada no modelo (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; *I*₂ – maior valor de entrada; *I*₁₂ – média dos valores de entrada.

Referente ao *IS*, quanto maior for o índice obtido (em módulo), mais sensível será o modelo ao parâmetro. Valores próximos a zero indicam que o modelo não apresenta sensibilidade ao parâmetro.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas análises realizadas, os cinco parâmetros que apresentaram maior sensibilidade, em ordem decrescente, foram (TABELA 3.3; FIGURA 3.1): coeficiente da cultura com completa expansão do dossel (*K*_{CTR,x}; *IS* = 1,0777); índice de colheita de referência (*HI*₀; *IS* = 1,0002); produtividade de água normalizada para *ET*₀ e CO₂ (*WP**; *IS* = 0,8828); máxima cobertura do dossel (*CC*_x; *IS* = 0,8578); e, fertilidade do solo (*IS* = 0,6045).

O coeficiente da cultura com completa expansão do dossel (*K*_{CTR,x}; *IS* = 1,077; Ranking 1) é um parâmetro conservativo e aproximadamente equivalente ao coeficiente basal da cultura na meia estação, para diferentes culturas, recomendados por Allen et al. (1998) somente para situações de total cobertura do dossel. O *K*_{CTR,x}, para solo totalmente coberto pelo dossel (*CC* próximo de 1,0) e

sem condições de estresse, quando multiplicado pela cobertura efetiva (ou ajustada por microadvecção) do dossel e a evapotranspiração de referência (ET_o) resulta em valores de transpiração da cultura (Tr) (EQUAÇÃO 3.2; RAES et al., 2009). Logo, a Tr depende da fração da área do solo coberta pelo dossel quando não há estresse suficiente para limitar a abertura estomática (STEDUTO et al., 2012), bem como faz parte das duas principais equações do AquaCrop, sendo uma delas a que determina a biomassa (EQUAÇÃO 1.1). Assim, pode-se inferir que a maior sensibilidade do $K_{CTR,x}$ se deve ao fato dele ser um parâmetro que contribui para a determinação da biomassa da cultura e posteriormente a produtividade de grãos.

$$Tr = CC^* \cdot K_{CTR,x} \cdot ET_o \quad (3.2)$$

Sendo: Tr – transpiração da cultura (mm); CC^* – fração da superfície de solo coberta pelo dossel, ajustada para efeitos de microadvecção ($\% \text{ dia}^{-1}$); $K_{CTR,x}$ – coeficiente da cultura com completa expansão do dossel (adimensional); ET_o – evapotranspiração de referência (mm) (RAES et al., 2009).

$$B = WP \cdot \sum_{i=1}^n Tr_i \quad (1.1)$$

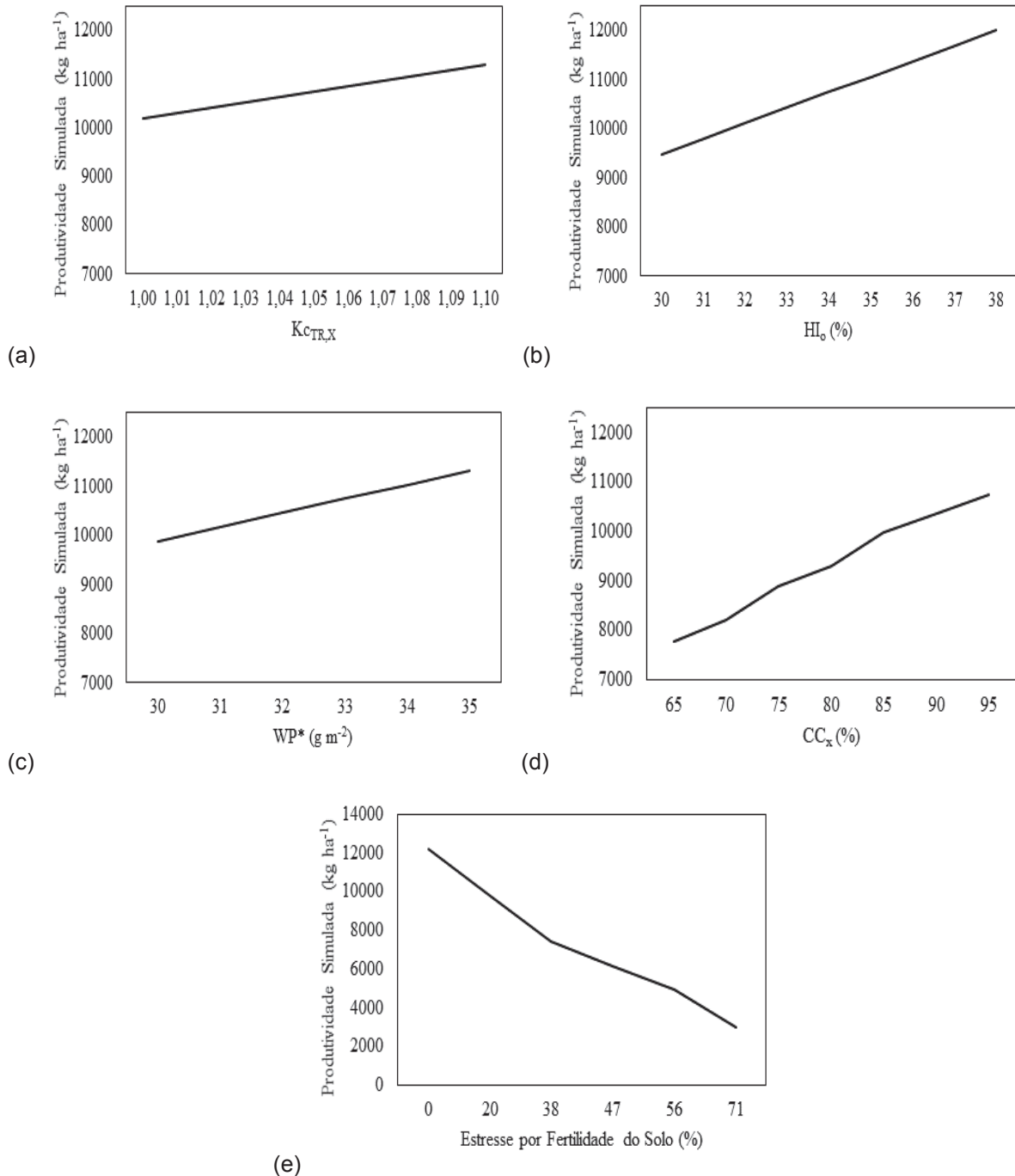
Sendo: B – biomassa acumulada (kg); WP – parâmetro de produção pela água (g m^{-2}); Tr_i – transpiração da cultura no i -ésimo intervalo de período (mm); n – período considerado (unidade) (STEDUTO et al., 2008).

TABELA 3.3 – PARÂMETROS UTILIZADOS 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 CULTURA DO MILHO, GENÓTIPO 30R50YH, EM CASTRO – PR.

Símbolo	Descrição	<i>IS</i>	Ranking
----- Fenologia da cultura -----			
	Desenvolvimento do dossel		
CC_o	Cobertura inicial do dossel com 90% de emergência das plantas (%)	0,0389	10
	Densidade de plantas (plantas ha ⁻¹)	0,0400	9
CC_x	Máxima cobertura do dossel (%)	0,8578	4
CDC	Coefficiente de declínio do dossel (% dia ⁻¹)	0,1385	7
----- Desenvolvimento da zona radicular -----			
Z_{min}	Profundidade radicular mínima efetiva (m)	0,0001	16
$Z_{máx}$	Profundidade radicular máxima efetiva (m)	0,0005	14
----- Transpiração da cultura -----			
$KC_{TR,x}$	Coefficiente da cultura com completa expansão do dossel	1,0777	1
----- Produção de biomassa e formação de rendimento -----			
	Produtividade de água da cultura		
WP^*	Produtividade de água normalizada para <i>ETo</i> e CO ₂ (g m ⁻²)	0,8828	3
----- Índice de Colheita -----			
HI_o	Índice de colheita de referência (%)	1,0002	2
	Possível incremento no <i>HI</i> devido ao estresse hídrico antes do florescimento	0,0000	17
	Coefficiente descrevendo o impacto positivo da restrição do crescimento vegetativo durante a formação de rendimento no <i>HI</i>	0,0000	17
	Coefficiente descrevendo o impacto negativo do fechamento estomático durante a formação de rendimento no <i>HI</i>	0,0000	17
----- Estresse -----			
	Estresse hídrico no solo		
$\rho_{exp,lower}$	Limite inferior de depleção da água no solo para expansão do dossel	0,0006	13
$\rho_{exp,upper}$	Limite superior de depleção da água no solo para expansão do dossel	0,0000	17
ρ_{sto}	Limite superior de depleção da água no solo para controle estomático	0,0000	17
ρ_{sen}	Limite superior de depleção da água no solo para senescência do dossel	0,0000	17
ρ_{pol}	Limite superior de depleção de água no solo para falhar a polinização	0,0000	17
	Falta de aeração (%) (com referência para saturação de água no solo)	0,0298	11
----- Estresse pela temperatura do ar -----			
	Mínima temperatura do ar abaixo da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo frio) (°C)	0,0000	17
	Máxima temperatura do ar acima da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo calor) (°C)	0,0000	17
----- Atributos físicos do solo -----			
	Teor de umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP})	0,0016	12
	Teor de umidade na capacidade de campo (θ_{CC})	0,0220	8
	Teor de umidade na saturação (θ_{SAT})	0,0563	6
	Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{SAT})	0,0000	17
----- Manejo do solo -----			
	Fertilidade do solo (%)	0,6045	5
	Cobertura do solo com restos vegetais (%)	0,0003	15

FONTE: A autora (2018).

FIGURA 3.1 – VARIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE MILHO EM FUNÇÃO DA MUDANÇA NOS VALORES DOS PARÂMETROS MAIS SENSÍVEIS NO MODELO AQUACROP, QUAIS SEJAM A) COEFICIENTE DA CULTURA COM COMPLETA EXPANSÃO DO DOSSEL ($Kc_{TR,X}$; ADIMENSIONAL); B) ÍNDICE DE COLHEITA DE REFERÊNCIA (HI_0 ; %); C) ÍNDICE DE PRODUTIVIDADE DE ÁGUA NORMALIZADA (WP^* ; $g\ m^{-2}$); D) MÁXIMA COBERTURA DO DOSSEL (CC_x ; %); E, E) ESTRESSE POR FERTILIDADE DO SOLO (%).



FONTE: A autora (2017).

O índice de colheita de referência (HI_0 ; $IS = 1,0002$; Ranking 2) é um parâmetro considerado não conservativo, dependente do cultivar, que deve ser ajustado conforme necessidade. Os valores do HI_0 na literatura foram encontrados

para cultivares de alto rendimento, sem qualquer condição de estresse, podendo ser considerado um parâmetro conservador. Porém, alguns cultivares em especial podem ter o HI_0 ligeiramente mais elevado ou baixo do que cultivares comuns, o que justificaria o seu ajuste (STEDUTO et al., 2012). Quando a cultura sofre algum estresse durante o ciclo, seja no período vegetativo, florescimento ou formação de grãos, o HI_0 é ajustado por meio do coeficiente de estresse (K_s), específico para cada momento do ciclo (RAES et al., 2009). Assim, muitas vezes, o valor de referência não é o mesmo verificado no decorrer do desenvolvimento da planta, podendo ser incrementado ou diminuído. O índice de colheita (HI) é um parâmetro importante, que influencia diretamente a determinação da produtividade de grãos da cultura (EQUAÇÃO 1.2).

$$Y = B \cdot HI \quad (1.2)$$

Sendo: Y – rendimento da cultura (kg ha^{-1}); B – biomassa acumulada (kg ha^{-1}); HI – índice de colheita da cultura (adimensional) (STEDUTO et al., 2008).

O índice de produtividade de água normalizada (WP^* ; $IS = 0,8828$; Ranking 3) consiste na relação de biomassa produzida por água transpirada, normalizada para demanda evaporativa (ET_0) e concentração de CO_2 na atmosfera, podendo variar moderadamente em resposta ao regime de fertilidade e permanecer constante sob condições de déficit hídrico, exceto quando estresses hídricos severos são alcançados. O mecanismo de crescimento da planta no AquaCrop é conduzido principalmente pela água. Assim, o WP^* (EQUAÇÃO 3.3) é importante, pois é o parâmetro que integra a equação que determinará a biomassa. O AquaCrop não simula passos intermediários envolvendo acúmulo de biomassa, os processos subjacentes são resumidos e integrados no parâmetro WP^* (STEDUTO et al., 2008; STEDUTO et al., 2009; STEDUTO et al., 2012).

$$WP^* = \left[\frac{B}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Tr_i}{ETo_i} \right)} \right]_{CO_2} \quad (3.3)$$

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

A máxima cobertura do dossel (CC_x ; IS = 0,8578; Ranking 4) é determinada pela densidade de plantio e manejo praticado, sendo que o usuário do programa deve ajustá-la para as atuais condições de campo praticadas na propriedade (STEDUTO et al., 2009). A CC_x é um parâmetro importante, pois integra as Equações 3.4 e 3.5 que determinam duas das quatro fases da cobertura do dossel (CC): o crescimento e o declínio. Como visto na Equação 3.2, a CC auxilia na determinação da Tr , que por sua vez integra a equação de biomassa do modelo. A curva de crescimento do dossel possui quatro fases. Na Fase 1 a CC é equivalente a cobertura inicial do dossel com 90% de emergência das plantas. Na Fase 2, a CC cresce exponencialmente, sendo determinada com a Equação 3.4, que tem como variável a CC_x , CC_o e CGC . A Fase 3 é o momento em que a CC atinge o máximo crescimento, sendo igual a CC_x . Na Fase 4 (última fase), a CC é determinada com a Equação 3.5, a qual tem como variável os parâmetros CC_x e CDC (STEDUTO et al., 2009). Assim, a identificação dos valores de CC_x (visualizados a campo) é de extrema importância, visto que sub ou superestimativas dos valores causarão grandes alterações nos valores finais das produtividades simuladas (FIGURA 3.1d).

$$CC = CC_x - (CC_x - CC_o) \cdot e^{-CGC \cdot t} \quad (3.4)$$

$$CC = CC_x \cdot \left[1 - 0,05 \cdot \left(e^{\frac{CDC}{CC_x}} - 1 \right) \right] \quad (3.5)$$

Sendo: CC – máxima cobertura do dossel em ótimas condições (%); CC_x – máxima cobertura do dossel (%); CC_o – cobertura inicial do dossel com 90% de emergência das plantas (%); CGC – coeficiente de crescimento do dossel ($\% \text{ dia}^{-1}$); t – tempo (dias); CDC – coeficiente de declínio do dossel ($\% \text{ dia}^{-1}$).

Dentre os parâmetros relacionados ao manejo, a fertilidade do solo ($IS = 0,6045$; Ranking 5) apresentou maior sensibilidade (TABELA 3.3 e FIGURA 3.1e). O AquaCrop não calcula o ciclo e balanço de nutrientes, mas fornece opções de ajustes para avaliação dos efeitos da fertilidade sobre a produção da cultura. As opções fornecidas variam de “não limitante” a “pobre”, definindo o nível de fertilidade em que a planta está exposta durante o ciclo. Nas simulações, a opção é realizada por meio do indicador do estresse de fertilidade do solo, que pode variar de zero, quando a fertilidade não é fator limitante ($K_s = 1,0$), até 100%, quando o estresse é tão alto que a produção da cultura não é mais possível ($K_s = 0$). A opção escolhida pelo usuário, de acordo com o observado a campo, pode ocasionar reduções crescentes no WP^* , coeficiente de crescimento do dossel (CGC) e CC_x , e proporcionar aceleração na senescência do dossel com a diminuição no nível de fertilidade (STEDUTO et al., 2009; STEDUTO et al., 2012). Alterações nos parâmetros WP^* , CGC e CC_x (Equações 2.4, 2.5 e 2.5) afetam diretamente a produção de biomassa e grãos no modelo (FIGURA 3.1e).

Nas análises realizadas, os seguintes parâmetros não apresentaram sensibilidade no AquaCrop para as condições avaliadas (TABELA 3.3): condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}); parâmetros relacionados ao estresse hídrico no solo ($p_{exp,upper}$; p_{sto} ; p_{sen} ; p_{pol}); estresse pela temperatura do ar; e, parâmetros relacionados ao índice de colheita.

A densidade de plantas ($IS = 0,04$; Ranking 9) é um parâmetro dependente do manejo praticado no local de cultivo (TABELA 3.3). A população de plantas acima do considerado ideal, ocasiona competitividade entre elas e menor produção. Por outro lado, menor população proporciona maior exposição da superfície do solo e maior perda de água do solo por evaporação. Dois parâmetros são afetados diretamente pela densidade de plantas: CC_x e CC_o ($IS = 0,0389$; Ranking 10), ambos importantes para determinar a CC no decorrer do ciclo da cultura, cada qual em seu momento.

Os parâmetros p_{upper} e p_{lower} estão relacionados ao tipo de estresse, definindo a sensibilidade e severidade do perfil de solo em condição limite. O p_{upper} determina quando o estresse começa, enquanto o p_{lower} é o ponto no qual os processos fisiológicos cessam completamente. No AquaCrop o estresse hídrico é dividido em expansão foliar, fechamento estomático e senescência do dossel (ABENDIPOUR et al., 2012). Os valores de p tanto para a expansão do dossel (p_{upper}

e p_{lower}), como para a condutância estomática e senescência do dossel (p_{upper}), foram modificados variando os valores de p para que o estresse hídrico variasse de “extremamente sensível” a “extremamente tolerante”. Observou-se que apenas o p_{lower} ($IS = 0,0006$; Ranking 13) da expansão do dossel mostrou alguma sensibilidade quando teve seus valores modificados (TABELA 3.3), principalmente quando exposto à “extrema sensibilidade” e “sensibilidade” ao estresse hídrico. O resultado indica que durante o período de cultivo não houve estresse hídrico para a planta, não havendo modificações significativas na produtividade do milho.

A baixa sensibilidade (p_{lower}) à expansão do dossel já é estabelecida na literatura nas relações água-planta, em que a expansão foliar é mais sensível aos processos de estresse hídrico em comparação à condução estomática e senescência do dossel, que são menos sensíveis (STEDUTO et al., 2009).

A sensibilidade da cultura ao encharcamento de água no solo é especificada no AquaCrop e define o limite máximo de estresse, cujos valores podem variar de zero (“sem estresse por encharcamento”) à 15% de saturação (“muito sensível ao estresse por encharcamento”), bem como o número de dias que o solo pode permanecer encharcado antes do estresse se efetivar e a Tr ser afetada (STEDUTO et al., 2012). No presente estudo, somente quando o nível de estresse foi modificado para “muito sensível ao encharcamento” a cultura do milho apresentou diminuição da produtividade em 621 kg ha^{-1} (caindo de 10747 kg ha^{-1} para 10126 kg ha^{-1}). O resultado obtido explica a baixa sensibilidade obtida para o estresse por falta de aeração ($IS = 0,0298$).

A cobertura do solo por restos vegetais ($IS = 0,0003$; Ranking 15) apresentou sensibilidade baixa, mesmo havendo variação de zero a 100% de solo coberto. A cobertura somente permite verificar se há ou não diminuição da evaporação do solo. Uma das distinções do AquaCrop consiste em separar a evaporação não produtiva do solo (E) da transpiração produtiva da cultura (Tr), estimando a produção de biomassa diretamente da transpiração real da cultura, conforme o WP^* (STEDUTO et al., 2012). Assim, a cobertura do solo contribui pouco para o cálculo da produção de biomassa no modelo, trabalhando mais para conter a evaporação de água na superfície do solo, mantendo sua umidade.

A profundidade efetiva mínima Z_{min} ($IS = 0,0001$; Ranking 16) e máxima Z_{max} ($IS = 0,0005$; Ranking 14) de enraizamento também apresentaram baixa sensibilidade no AquaCrop (TABELA 3.3). A sensibilidade da Z_{max} foi baixa, pois a

maior parte da água extraída pela planta é retirada da parte superficial, aproximadamente 70% da camada de solo explorada pelas raízes. Assim, mesmo que haja aumento significativo na $Z_{máx}$, a água absorvida pela planta será praticamente a mesma que ocorre com o menor enraizamento, não aumentando significativamente a produtividade da cultura. Steduto et al. (2012) consideram adequada a profundidade de enraizamento efetiva mínima entre 0,2 e 0,3 m no início do ciclo da cultura, para o cálculo do balanço de água no AquaCrop.

3.6 CONCLUSÕES

Os parâmetros referentes à cultura do milho proporcionam maior sensibilidade no AquaCrop por estarem relacionados às principais equações que determinam a biomassa e produtividade da cultura.

Os parâmetros físico-hídricos relacionados ao solo não obtiveram altos índices de sensibilidade no AquaCrop para a cultura do milho.

A fertilidade no solo é o parâmetro de manejo mais sensível do AquaCrop, afetando o parâmetro WP , que é variável direta (biomassa) e indireta (produtividade) das principais equações do modelo.

3.7 REFERÊNCIAS

ABENDIPOUR, M.; SARANGI, A.; RAJPUT, T. B. S.; SINGH, M.; PATHAK, H.; AHMAD, T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 110, p. 55-56, jul. 2012.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**. Roma: FAO, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>>. Acesso em: 13 nov. 2016.

ÁLVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppens's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, dez. 2013.

ASSENG, A.; BAR-TAL, A.; BOWDEN, J. W.; KEATING, B. A.; VAN HERWAARDEN, A.; PALTA, J. A.; HUTH, N. I.; PROBERT, M. E. Simulation of grain protein content with APSIM-N wheat. **European Journal of Agronomy**, v. 16, n. 1, p. 25-42, jan. 2002.

BORGES JUNIOR, J. C. F.; FERREIRA, P. A.; HEDDEN-DUNKHORST, B.; ANDRADE, C. L. T. Modelo computacional para suporte à decisão em áreas irrigadas. Parte I: Desenvolvimento e análise de sensibilidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 1, p. 3-11, jan./fev. 2008.

CONFALONIERI, R.; ACUTIS, M.; BELLOCHI, G.; CERRANI, I.; TARANTOLA, S.; DONATELLI, M.; GENOVESE, G. Exploratory sensitivity analysis of CropSyst, WARM and WOFOST: a case study with rice biomass simulations. **Italian Journal of Agrometeorology**, v. 11, n. 3, p. 35-39. 2006.

CONFALONIERI, R.; BREGAGLIO, S.; ACUTIS, M. A proposal of an indicator for quantifying model robustness based on the relationship between variability of errors and of explored conditions. **Ecological Modelling**, v. 221, n. 6, p. 960-964, mar. 2010.

CONFALONIERI, R.; BREGAGLIO, S.; ACUTIS, M. Quantifying uncertainty in crop model predictions due the uncertainty in the observation used for calibration. **Ecological Modelling**, v. 328, p. 72-77, mai. 2016.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **AquaCrop**. Rome, 2016 em: <<http://www.fao.org/aquacrop/software/en/>>. Acesso: 20 nov. 2016.

MAKOWSKI, D.; NAUD, C.; JEUFFROY, M. H.; BARBOTTIN, A.; MONOD, H. Global sensitivity analysis for calculating the contribution of genetic parameters to the variance of crop model prediction. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 91, n. 10/11, p. 1142-1147, out./nov.. 2006.

NASSIF, D. S. P.; ASSAD, E. D. Análise de sensibilidade local do modelo Canegro/DSSAT. In: MOSTRA DE ESTAGIÁRIOS E BOLSISTAS DA EMBRAPA INFORMÁTICA AGROPECUÁRIA, 2010, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2010. p.53-56.

PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Análise de sensibilidade dos componentes da equação de Hargreaves-Samani para a região de Bebedouro-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 299-306, jun. 2014.

PIEKARSKI, K. R. Produtividades de soja e milho estimadas com o modelo AquaCrop na Região dos Campos Gerais. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

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**, Madison, v. 101, n. 3, p. 438-447. 2009.

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**, Recife, v. 4, n. 1, p. 78-84, jan./mar. 2009.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. Crop yield response to water. **FAO Irrigation and Drainage Paper 66**. Rome: FAO, 2012. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/016/i2800e/i2800e.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

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**, Madison, v. 101, n. 3, p. 426-437. 2009.

STEDUTO, P.; RAES, D.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; HENG, L.; IZZI, G.; HOOGEVEEN, J. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. In: López-Francos A. (Ed.). **Drought management: scientific and technological innovations**. Zaragoza: CIHEAM, 2008. P. 285-292. (Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens; n.80).

TARANTOLA, S.; SALTELLI, A. SAMO 2001: methodological advances and innovative application of sensitivity analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 79, n. 2, p. 121-122, fev. 2003.

WALLACH, D.; GOFFINET, B.; BERGEZ, J. F.; DEBAEKE, P.; LEENHARDT, A. Parameter estimation for crop models: a new approach and application to a corn model. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 4, p. 757-766. 2001.

WANG, J.; LI, X.; LU, L.; FANG, F. Parameter sensitivity analysis of crop growth models based on the extended Fourier amplitude sensitivity test method. **Environmental Modelling and Software**, v. 48, p. 171-182, out. 2013.

4 CAPÍTULO III: ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DE MILHO EM DIFERENTES ÉPOCAS DE SEMEADURA NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS

4.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho identificar as épocas de semeadura mais promissoras para a cultura do milho em Castro e Socavão, localizadas na região dos Campos Gerais, Estado do Paraná, com o auxílio do modelo AquaCrop, utilizando parâmetros calibrados e validados em estudo anterior na região. Os dados experimentais utilizados (clima, cultura, solo e manejo), referentes à cultura do milho nas safras 2012/13 a 2014/15, foram disponibilizados pela Fundação ABC. O levantamento dos dados foi realizado nas estações experimentais instaladas em Castro e Socavão (distrito de Castro), no Estado do Paraná. O período de plantio analisado foi estipulado acrescentando um mês anterior e um mês posterior ao recomendado pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura do milho no Estado do Paraná. As produtividades simuladas (Y_s) das culturas do milho foram comparadas com as respectivas produtividades observadas (Y_r) nos locais de estudo. Os desvios percentuais foram computados para determinação da época de semeadura mais promissora para o milho na região. Os melhores períodos de plantios foram verificados para a primeira quinzena de dezembro, em decorrência dos menores déficits hídricos nos períodos iniciais da cultura. Porém, recomenda-se que o plantio seja realizado em setembro, para que a cultura possa se desenvolver em uma época menos propícia ao desenvolvimento de problemas fitossanitários.

Palavras-Chave: Modelagem. Simulação. Produtividade. AquaCrop. *Zea mays* L.

4.2 ABSTRACT

The objective of this work was to identify the better planting periods of the maize crop for Castro and Socavão, localities in the Campos Gerais region, State of Paraná, with the AquaCrop model, using calibrated and validated parameters in a preliminary study in region. The experimental data used (climate, crop, soil and management), referring to the maize crop in the harvests from 2012/13 to 2014/15, were made available by the ABC Foundation. Data were collected at the experimental stations located in Castro and Socavão (Castro district), in Paraná State. The planting period analyzed was stipulated by adding one month before and one month later than recommended by the Agricultural Climate Risk Zoning for the maize crop in the Paraná State. The simulated yields (Y_s) of corn crops were compared with the respective observed yields (Y_r) at the study sites. The percentage deviations were computed to determine the better planting period for maize in the region. The best planting periods were verified for the first fortnight of December, due to the lower water deficits in the initial periods of the crop. However, it is recommended to carry out the crop in September, so that the crop can develop in a less favorable period of occurrence of phytosanitary problems.

Key-Words: Modeling. Simulation of productivity. Grain production. *Zea mays* L.

4.3 INTRODUÇÃO

A previsão da produção agrícola de uma safra é uma questão estratégica para o país, permitindo o planejamento do abastecimento interno ou mesmo a orientação das ações no mercado externo (JONES et al., 2003; SANTOS; CAMARGO, 2006).

A variação da produtividade agrícola nas safras é, principalmente, influenciada pelas condições climáticas durante o ciclo da cultura, especialmente quando são cultivadas em condições onde há restrição hídrica (BATTISTI; SENDELHAS, 2014). No entanto, o problema pode ser contornado mediante a adoção de melhores estratégias de gerenciamento da plantação, como, por exemplo, identificando as melhores épocas de plantio para ajustar o ciclo da cultura em períodos com condições climáticas mais favoráveis ao seu desenvolvimento, o que aumenta conseqüentemente a produtividade das culturas cultivadas (BATTISTI; SENDELHAS, 2014; ANDARZIAN et al., 2015; SRIVASTAVA et al., 2016).

Há na literatura vários estudos tratando da determinação das melhores datas de plantio e dos efeitos sobre a produtividade das culturas (ANDARZIAN et al., 2015; SRIVASTAVA et al., 2016; LU et al., 2017). No Brasil, tem-se o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), um instrumento de política agrícola e gestão de riscos na agricultura cujo objetivo é diminuir os riscos relacionados à adversidade climática, possibilitando aos municípios brasileiros identificar a melhor época de plantio das culturas, em diferentes tipos de solo e ciclos de cultivares (BRASIL, 2017).

Modelos de crescimento de culturas são ótimas ferramentas para encontrar os melhores períodos de plantio de uma cultura, para determinada localidade (BATTISTI; SENDELHAS, 2014). São modelos matemáticos, especialmente desenvolvidos para auxiliar o planejamento e gerenciamento da produção agrícola, bem como auxiliar pesquisadores na definição de prioridades para seus estudos (DOURADO NETO et al., 1998). São modelos que buscam simular a produção agrícola englobando processos biofísicos e bioquímicos (respiração, fotossíntese, transpiração, matéria seca e senescência), considerando os efeitos do solo, água, nutrientes e clima (ABENDIPOUR et al., 2012; WANG et al., 2013).

Os modelos de simulação de culturas também podem ser utilizados para auxiliar nos experimentos convencionais, principalmente nas decisões das melhores alternativas que a experimentação a campo deve seguir. A vantagem dos modelos em relação aos experimentos de campo está na facilidade e velocidade de execução. Enquanto um experimento demora dias, meses ou anos para obter algum resultado, a simulação com modelos reduz drasticamente o tempo. Logo, é possível verificar as seguintes vantagens dos modelos em relação aos experimentos em campo: diminuição dos custos, pois os experimentos a campo possuem elevado custo de instalação, manutenção e obtenção de dados; maior quantidade de informações extraídas, pois nos experimentos de campo as informações se restringem aos parâmetros avaliados; criação e suposição de cenários ideais que ainda não são conhecidos, sendo impossível em condições experimentais, mesmo estes sendo cuidadosamente executados (CORRÊA et al., 2011).

Visando auxiliar pesquisadores e outros profissionais agrícolas a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) desenvolveu o modelo AquaCrop. O modelo possibilita estimar a produtividade das culturas levando em consideração o suprimento de água e manejo agrícola, baseando-se em conceitos fisiológicos da planta e disponibilidade de água no solo. Apesar de mais simplificada em relação a outros modelos, a estrutura do AquaCrop busca manter o equilíbrio entre precisão e robustez em suas simulações (RAES et al., 2009). Maiores detalhes sobre o funcionamento do AquaCrop podem ser obtidos em Steduto et al. (2008), Raes et al. (2009) e Steduto et al. (2009).

Vários são os estudos que utilizaram o AquaCrop como ferramenta de gerenciamento agrícola e comprovaram sua capacidade na simulação da produção para diferentes culturas em diversos ambientes ao redor do mundo (NYAKUDYA; STROOSNIJDER, 2014; STRICEVIC et al., 2015; HAILESELASSIE et al., 2016; MIRSAFI et al., 2016; TOUMI et al., 2016). Contudo, a utilização do modelo no Brasil não é expressiva, principalmente para a previsão dos melhores períodos de plantio para as culturas agrícolas.

Teve-se por objetivo no presente trabalho identificar as épocas de semeadura mais promissoras para a cultura do milho em Castro e Socavão, localizadas na região dos Campos Gerais, Estado do Paraná, com o auxílio do modelo AquaCrop, utilizando parâmetros calibrados e validados em estudo anterior na região.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Descrição da área de estudo

O presente trabalho foi realizado para o município de Castro e distrito de Socavão, localizados na região dos Campos Gerais, Estado do Paraná. O clima na região, conforme a classificação climática de Koppen é Cfb, descrito como subtropical úmido, clima oceânico sem estação seca com verão temperado (ÁLVARES et al., 2013). Os dados experimentais foram disponibilizados pela Fundação ABC, a partir de Estações Experimentais localizadas nos municípios em estudo. O relevo da região varia de plano à suave ondulado. O sistema de preparo do solo é o plantio direto com cobertura vegetal homogênea, realizando-se rotação de cultura no inverno (trigo e aveia preta) e verão (soja e milho).

Os dados de classificação de solo e clima, coordenadas geográficas e altitude (TABELA 4.1), bem como os atributos físico-hídricos (ANEXO 1) das parcelas experimentais, são de um trabalho anterior desenvolvido por Piekarski (2016).

TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, NAS LOCALIDADES DE CASTRO E SOCAVÃO ⁽¹⁾.

Local	Solo	Classificação Climática ⁽²⁾	Latitude ----- (graus)	Longitude -----	Altitude (m)
Castro	CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Cfb	24,85° S	49,93° W	1001
Socavão	ORGANOSSOLO VERMELHO Sáprico típico	Cfb	24,68° S	49,75° W	1026

FONTE: ⁽¹⁾ Adaptado de Piekarski (2016); ⁽²⁾ Álvares et al. (2013).

4.4.2 Modelo utilizado e dados de entrada necessários

O modelo utilizado nas análises de simulação foi o AquaCrop, versão 5.0, disponibilizada pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (FAO, 2016).

Os dados de entrada necessários no AquaCrop para iniciar as simulações das produtividades foram:

a) Clima: Temperaturas máxima e mínima do ar (°C), precipitação pluviométrica (mm dia⁻¹), evapotranspiração de referência diária (*ET_o*; mm dia⁻¹) e

concentração média anual de CO₂. Os dados climáticos diários necessários foram disponibilizados pela Fundação ABC, obtidos para os anos de 2012 a 2014, em Socavão, e 2013 a 2015 para Castro. As medidas foram realizadas nas estações agrometeorológicas instaladas nas estações experimentais analisadas. A evapotranspiração de referência diária (mm dia⁻¹) foi estimada com o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), para os mesmos anos. Para concentração média anual de CO₂ na atmosfera (ppm), o modelo disponibiliza opções quanto ao local de obtenção dos dados. Assim, no presente estudo optou-se pela utilização dos dados obtidos no observatório de Mauna Loa, Havaí (RAES et al., 2009);

b) Cultura: As datas de semeadura e colheita do milho, população de plantas (plantas ha⁻¹), produtividade (kg ha⁻¹) (TABELA 4.2) e duração dos estádios fenológicos da cultura (dia; emergência, florescimento, senescência e maturidade) foram disponibilizados pela Fundação ABC, para as safras 2012/13 e 2013/14 (Socavão) e 2013/14 e 2014/15 (Castro). Os parâmetros como coeficiente de declínio do dossel, índice de colheita de referência, índice de produtividade de água e coeficiente da cultura com completa expansão do dossel foram calibrados em estudo anterior realizado para a mesma área (CAPÍTULO 1; APÊNDICE 1). Os demais parâmetros relacionados às temperaturas limites do ar, desenvolvimento do dossel e raiz, transpiração da cultura, produtividade de água, índice de colheita, estresses hídricos e temperatura foram obtidos da literatura (APÊNDICE 1).

TABELA 4.2 – DATAS DE PLANTIO E COLHEITA, ESTANDE DE PLANTAS E PRODUTIVIDADE DOS GENÓTIPOS P30F53YH, P30R50YH E AG8041PRO, NAS SAFRAS 2013/14 E 2014/15 (CASTRO) E 2012/13 E 2013/14 (SOCAVÃO).

Local	Genótipo	Safrá	----- Datas -----		Estande de Plantas (plantas ha ⁻¹)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
			Plantio	Colheita		
Castro	P30F53YH	2013/14	14/Out.	01/Abr.	74219	14681
	P30R50YH		14/Out.	15/Abr.	71094	13554
	AG8041PRO		14/Out.	15/Abr.	71094	13078
	P30F53YH	2014/15	07/Out.	31/Mar.	69531	14439
	P30R50YH		07/Out.	31/Mar.	75000	14418
	AG8041PRO		07/Out.	07/Abr.	64844	14293
Socavão	P30F53YH	2012/13	06/Nov.	23/Abr.	89583	13155
	P30R50YH		06/Nov.	13/Abr.	90104	10659
	AG8041PRO		06/Nov.	09/Abr.	89063	13341
	P30F53YH	2013/14	28/Nov.	16/Abr.	84896	13970
	P30R50YH		28/Nov.	12/Abr.	81771	13110
	AG8041PRO		28/Nov.	16/Abr.	81250	13661

FONTE: A autora (2018).

c) Manejo: O AquaCrop permite inserir dados sobre a utilização e tipo de irrigação, frequência de irrigação (dias), volume de irrigação (mm) e qualidade da água de irrigação. O modelo permite também inserir dados sobre a presença ou não de cobertura do solo, tipo de cobertura e porcentagem de solo coberta (%). As práticas culturais que evitam o escoamento superficial da água e a possibilidade de quatro níveis de fertilização (alto, próximo ao ideal, médio e baixo) também podem ser inseridos. Contudo, no presente trabalho a irrigação não foi considerada, o nível de fertilização foi considerado próximo ao ideal e, por serem áreas onde há prática do plantio direto, a cobertura do solo por restos vegetais foi considerada fixa em 100% em todas as estações experimentais. Foram realizados o controle fitossanitário e a adubação de acordo com o requerido pelas culturas;

d) Solo: Os dados de solo requeridos para entrada no modelo são a textura do solo, umidade no ponto de murcha permanente ($m^3 m^{-3}$), umidade na capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$), conteúdo de água na saturação ($m^3 m^{-3}$) e condutividade hidráulica saturada ($mm dia^{-1}$) (ANEXO 1). O modelo permite a inserção de até cinco camadas de solo, porém no presente estudo foram consideradas três camadas de solo (0-0,1 m; 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m) para inserção dos atributos físico-hídricos.

4.4.3 Definição dos períodos de plantio

Os melhores períodos para o plantio do milho em Castro e Socavão foram identificados em um Zoneamento Agrícola de Risco Climático (BRASIL, 2017). O Zoneamento realizado em Brasil (2017) identifica os municípios aptos, bem como os períodos de plantio com menor risco climático para o cultivo de algumas culturas nos municípios brasileiros.

A definição dos períodos de plantio no zoneamento é realizada a partir de análises térmicas e hídricas dos municípios dos Estados brasileiros. Nas análises, as cultivares são divididas em grupos de características homogêneas: Grupo I ($n < 110$ dias); Grupo II ($110 \text{ dias} \leq n \leq 145 \text{ dias}$); e Grupo III ($n > 145 \text{ dias}$), em que n corresponde a duração do ciclo da cultura (emergência a maturação). Ao final tem-se tabelas contendo as cidades, grupos de cultivares, textura do solo (média, argilosa e arenosa) para cada grupo e respectivas datas inicial e final de plantio recomendadas para cada cidade dos Estados (BRASIL, 2017).

A partir dos períodos de plantios recomendados no Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura do milho (BRASIL, 2017), foi estipulado para Castro e Socavão um período maior, abrangendo um mês anterior ao começo do zoneamento e um mês posterior ao término do zoneamento para a realização das análises. Em cada localidade, as simulações foram realizadas para duas safras, tendo como início e final o período: 01/08 a 30/01, para as safras 2012/13 e 2013/14 (Socavão) e 2013/14 e 2014/15 (Castro) (TABELA 4.3). A partir do dia 01/08, as produtividades foram simuladas em intervalos de sete dias até o último dia do período.

TABELA 4.3 – DATAS INICIAIS E FINAIS DE PLANTIO DA CULTURA DO MILHO, CONSIDERANDO OS GRUPOS EM QUE AS CULTIVARES ESTÃO INSERIDAS, SEGUNDO O ZONEAMENTO AGRÍCOLA DE RISCO CLIMÁTICO, E SEUS RESPECTIVOS LOCAIS DE PLANTIO.

Grupos	Cultivares	Local	----- Datas -----			
			Início ⁽¹⁾	Final ⁽¹⁾	Início ⁽²⁾	Final ⁽²⁾
I	AG8041PRO	Castro e Socavão	01/set.	31/dez.	01/ago.	31/jan.
II	P30F53YH	Castro e Socavão	01/set.	31/dez.	01/ago.	31/jan.
	P30R50YH	Castro e Socavão	01/set.	31/dez.	01/ago.	31/jan.

FONTE: A autora (2018).

NOTA:⁽¹⁾ Data inicial e final de plantio da cultura do milho, segundo o Zoneamento Agrícola de Risco Climático; ⁽²⁾ Data inicial e final de plantio da cultura do milho, consideradas nas análises dos melhores períodos de plantio.

4.4.4 Análise dos dados

As produtividades reais e simuladas no AquaCrop no período analisado foram dispostas em gráficos, e os desvios percentuais (%) foram calculados em relação a produtividade observada na safra. Posteriormente, foram identificados os períodos mais promissores, em que houve maiores produtividades.

$$D = \frac{(Y_{s_i} - Y_r)}{Y_r} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Sendo: D – desvio percentual entre as produtividades observada e simulada na safra (%); Y_r – produtividade observada nas safras (kg ha^{-1}); Y_{s_i} – produtividade simulada na safra para o i -ésimo dia de plantio (kg ha^{-1}).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de biomassa e grãos ao longo do período de plantio analisado (01/08 a 30/01), considerando diferentes cultivares (P30F53YH, P30R50YH e AG8041PRO), safras (2012/13 a 2014/15) e localidades (Castro e Socavão) apresentou oscilações crescentes e decrescentes praticamente nos mesmos períodos, evidenciando tendência entre as safras (FIGURAS 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, TABELA 4.4 e APÊNDICES 2, 3, 4 e 5). As oscilações ocorreram devido às quatro estações do ano que o período de plantio e ciclos de desenvolvimento da planta abrangeram, compreendendo períodos com variações de temperaturas e precipitações.

No geral, nas safras 2012/13 e 2013/14 em Socavão e 2013/14 em Castro, as produções de biomassa e grãos das três cultivares analisadas (P30F53YH, P30R50YH e AG8041PRO) cresceram, para plantios realizados até o final de setembro, com decréscimo até final de outubro/início de novembro. Após esse período, a produção retomou seu crescimento até início de janeiro, com decréscimo até o final do mesmo mês. Em Castro, na safra 2014/15, houve redução da produção de biomassa e grãos até início de outubro, com crescimento até o começo de janeiro, permanecendo praticamente constante até o final do mesmo mês (FIGURAS 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4).

No período de plantio analisado, o consumo hídrico (*ETR*) das cultivares estudadas variou entre 300 a 500 mm, ocorrendo decréscimo gradual dos valores com o atraso da data de plantio de 01/08 a 31/01 (FIGURAS 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4). Os valores obtidos nas análises, envolvendo a variação da data de plantio, estão dentro dos limites dispostos na literatura. O milho é uma cultura altamente exigente quanto à disponibilidade hídrica. Para uma boa condição de desenvolvimento e produção de grãos em seu ciclo, Fancelli e Dourado Neto (1997) relatam que a cultura do milho necessita entre 400 mm e 600 mm de água, dependendo do cultivar, estágio de desenvolvimento e ciclo da planta, conjuntamente com fatores ambientais. Bergamaschi et al. (2001) e Magalhães e Durães (2006) comentam que a produção máxima de grãos de uma cultivar de ciclo médio necessita em torno de 650 mm de água.

O período de plantio mais crítico ficou compreendido entre o final de setembro e início de novembro. Nesse período, observou-se na safra 2013/14 para

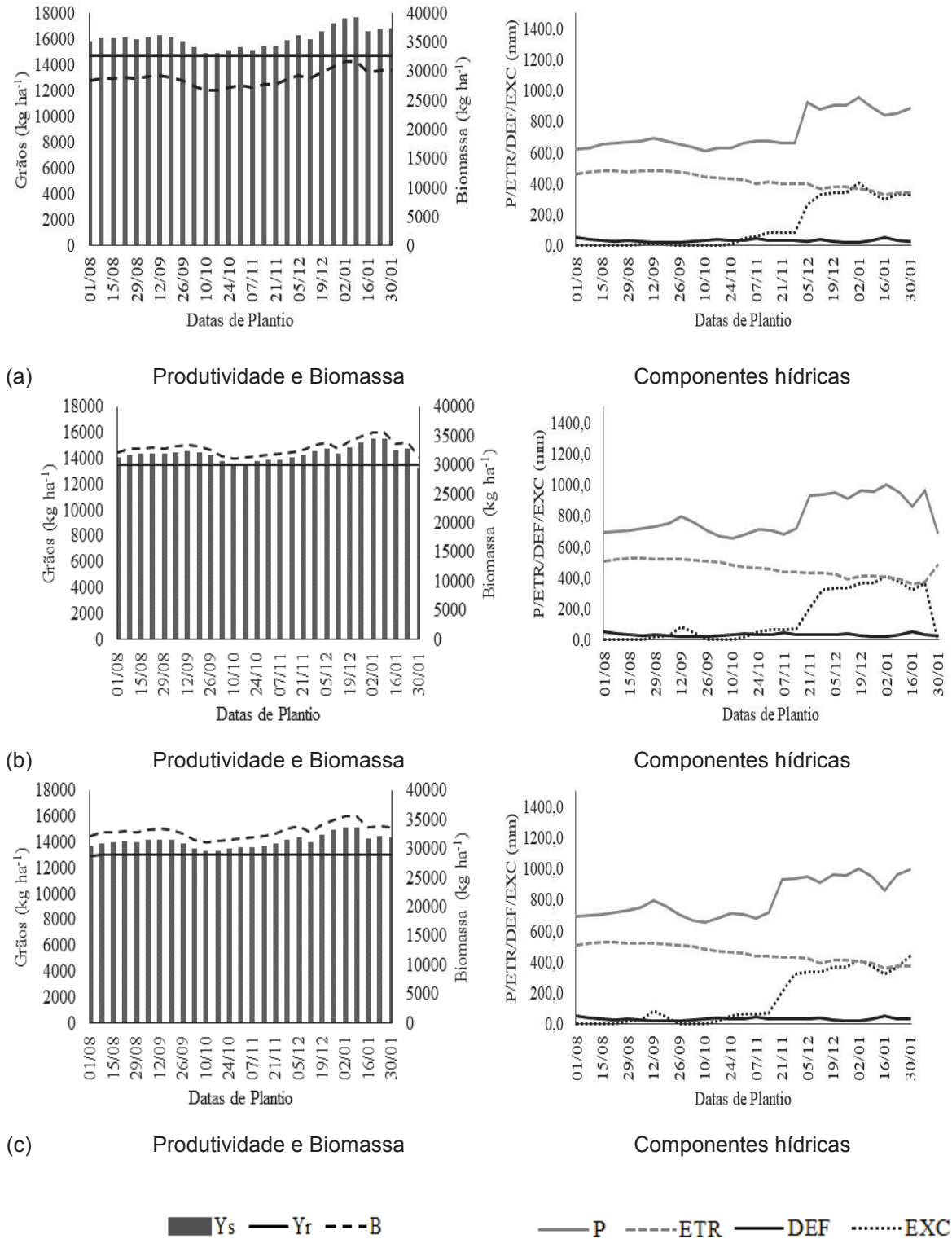
Castro e Socavão (FIGURAS 4.1 e 4.4), que os déficits hídricos foram iguais ou superiores aos excedentes. Porém, para os demais períodos da safra os excedentes foram superiores aos déficits. Nas safras 2012/13 (Socavão) e 2014/15 (Castro), os excedentes foram sempre superiores aos déficits, entre o final de setembro e início de novembro (FIGURAS 4.2 e 4.3).

Foram constatadas deficiências hídricas nas fases de emergência e vegetativa em todas as datas de plantio, para as três cultivares e safras analisadas (2012/13 e 2014/15). Porém, as maiores deficiências hídricas foram observadas no período entre o final de setembro e início de novembro, não afetando a fase crítica da cultura do milho. Wrege et al. (1999) consideram que a região dos Campos Gerais apresenta baixo risco de deficiência hídrica até o final de setembro ou após 20 de novembro, com probabilidades de 15% a 20% de ocorrência. Assim, comprova-se o déficit hídrico entre final de setembro a início de novembro.

Em Castro, nas simulações com a safra 2014/15 (FIGURA 4.2), observou-se no plantio realizado em 3 de outubro que não houve produtividade. Não somente na data, mas também nos primeiros dias do mês de outubro o modelo não foi capaz de simular as produtividades dos plantios. Constatou-se como causa que não houve cobertura verde (dossel) no florescimento, não ocorrendo produção de biomassa e grãos. Analisando-se as precipitações no mês de outubro, notou-se que a média mensal foi próxima a 1 mm dia^{-1} , e nos primeiros dias de outubro não houve precipitação. Provavelmente, a água disponível não foi suficiente para que ocorresse a germinação da semente de milho.

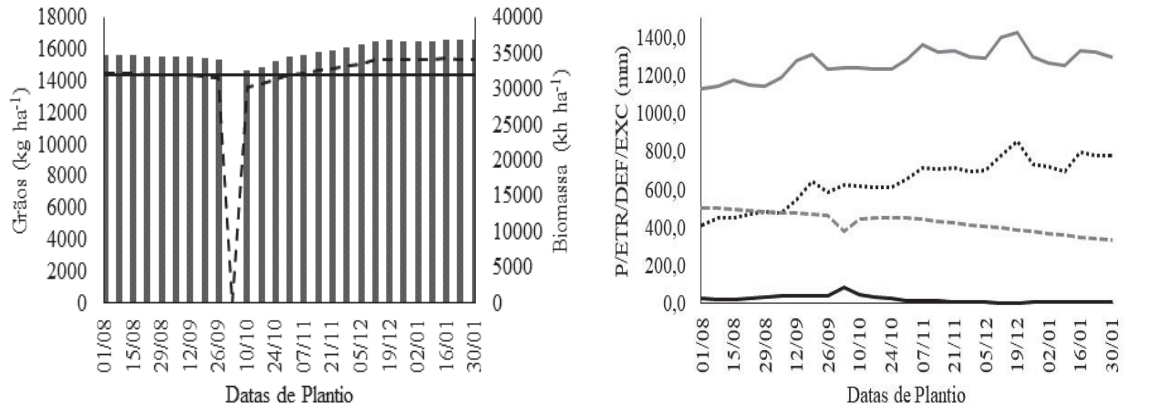
Na fase de emergência, a deficiência hídrica afeta a germinação das sementes, resultando na diminuição da população de plantas. Contudo, na fase vegetativa o déficit causa redução da área foliar, resultando na redução da taxa de crescimento da planta. Como a absorção da radiação solar depende da área foliar, em períodos de estresse hídrico a interceptação da radiação é reduzida em razão da redução da área foliar, além de causar murcha e enrolamento das folhas (FANCELLI, 2002; BERGAMASCHI et al., 2006).

FIGURA 4.1 – PRODUTIVIDADE SIMULADA (Y_s), BIOMASSA (B), PRECIPITAÇÃO (P), EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR), DEFICIÊNCIA HÍDRICA (DEF) E EXCEDENTE HÍDRICO (EXC), ESTIMADOS PARA CASTRO-PR AO LONGO DOS PERÍODOS DE PLANTIO ANALISADOS (01/08/2013 A 30/01/2014), PARA AS CULTIVARES: a) P30F53YH; b) P30R50YH; E, c) AG8041PRO.

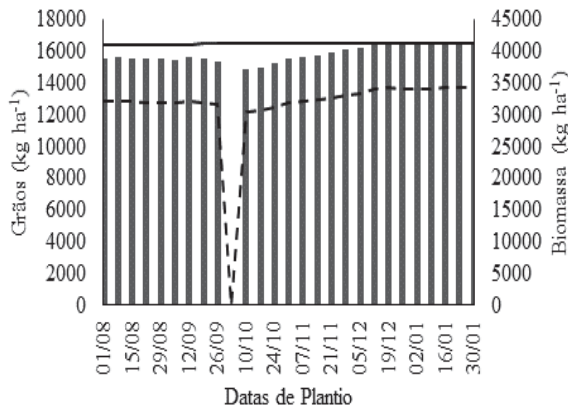


FONTE: A autora (2018).

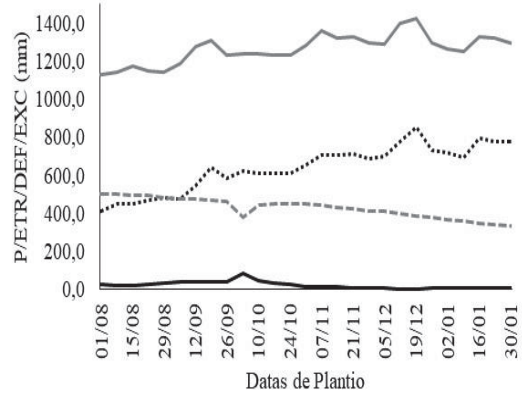
FIGURA 4.2 – PRODUTIVIDADE SIMULADA (Y_s), BIOMASSA (B), PRECIPITAÇÃO (P), EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR), DEFICIÊNCIA HÍDRICA (DEF) E EXCEDENTE HÍDRICO (EXC), ESTIMADOS PARA CASTRO-PR AO LONGO DOS PERÍODOS DE PLANTIO ANALISADOS (01/08/2014 A 30/01/2015), PARA AS CULTIVARES: a) P30F53YH; b) P30R50YH; E, c) AG8041PRO.



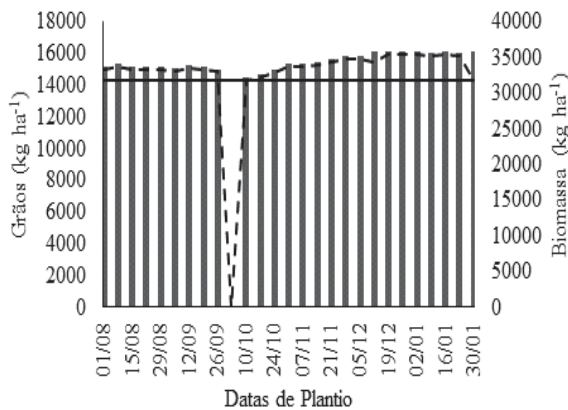
(a) Produtividade e Biomassa



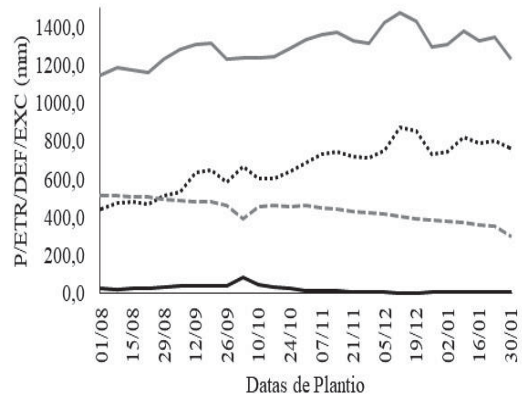
Componentes hídricas



(b) Produtividade e Biomassa



Componentes hídricas



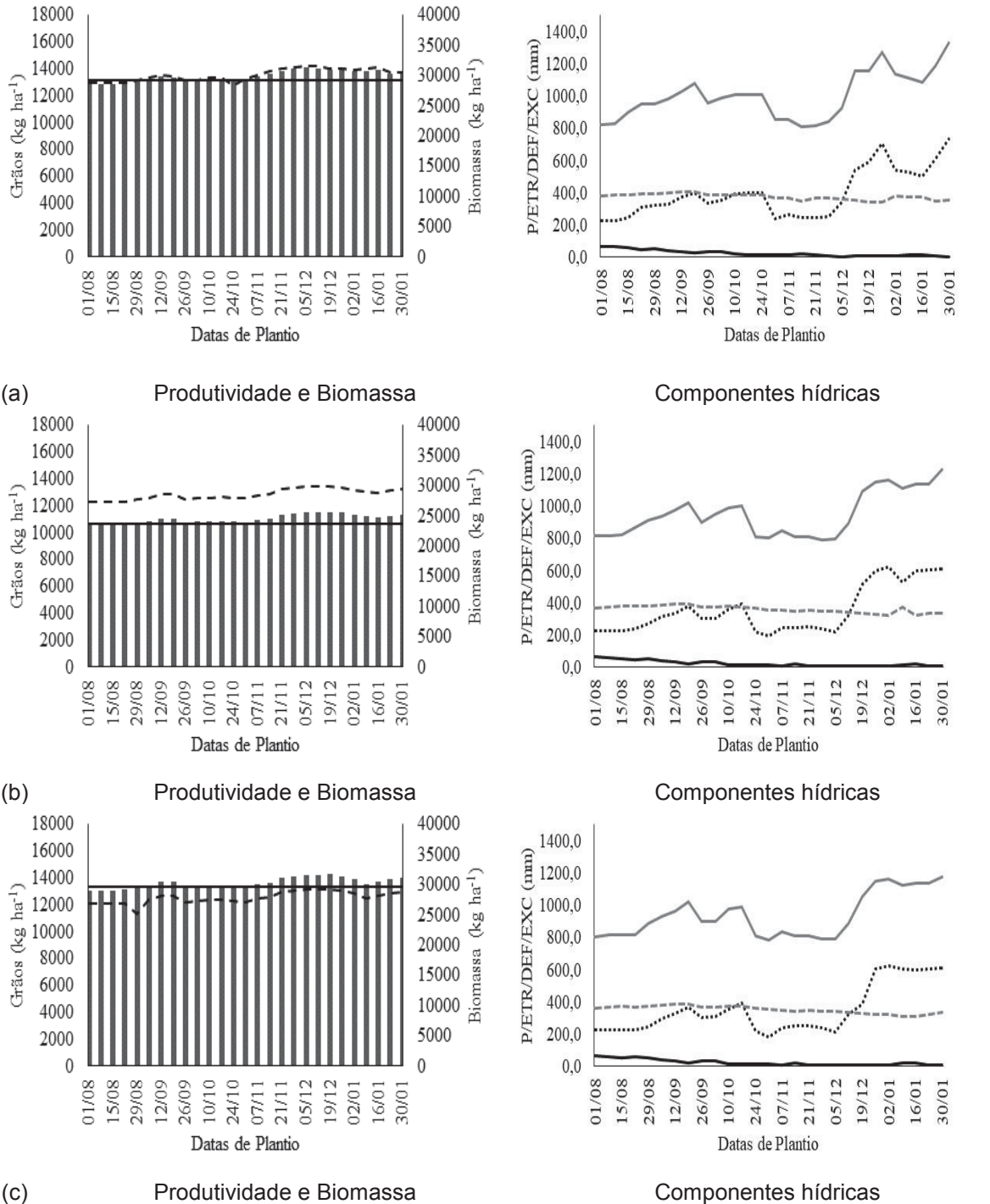
(c) Produtividade e Biomassa

Componentes hídricas

■ Y_s — Y_r - - - B — P - - - ETR — DEF ····· EXC

FONTE: A autora (2018).

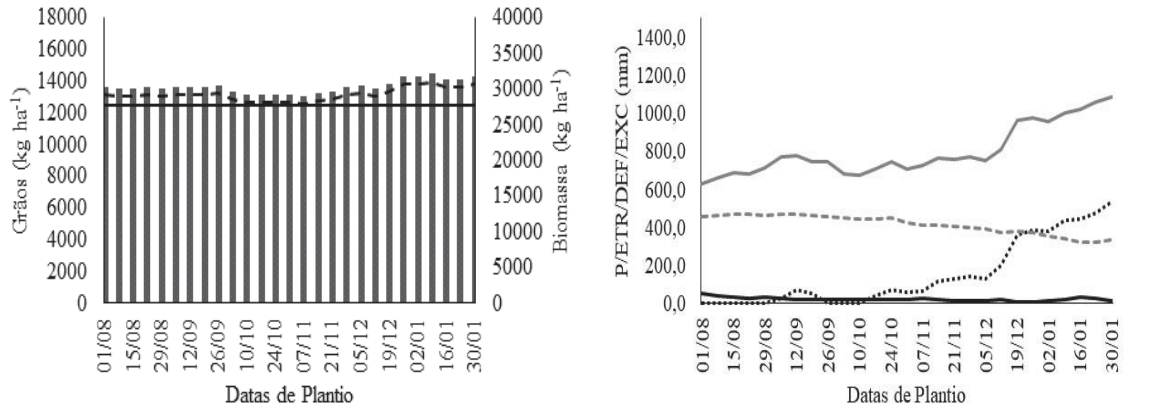
FIGURA 4.3 – PRODUTIVIDADE SIMULADA (Y_s), BIOMASSA (B), PRECIPITAÇÃO (P), EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR), DEFICIÊNCIA HÍDRICA (DEF) E EXCEDENTE HÍDRICO (EXC), ESTIMADOS PARA O DISTRITO DE SOCAVÃO-PR AO LONGO DOS PERÍODOS DE PLANTIO ANALISADOS (01/08/2012 A 30/01/2013), PARA AS CULTIVARES: a) P30F53YH; b) P30R50YH; E, c) AG8041PRO.



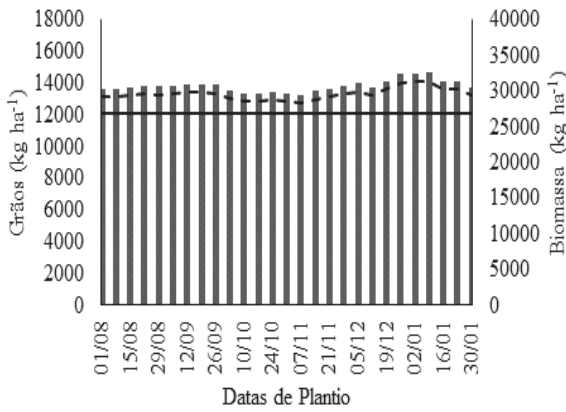
■ Y_s — Y_r - - - B — P - - - - ETR — DEF EXC

FONTE: A autora (2018).

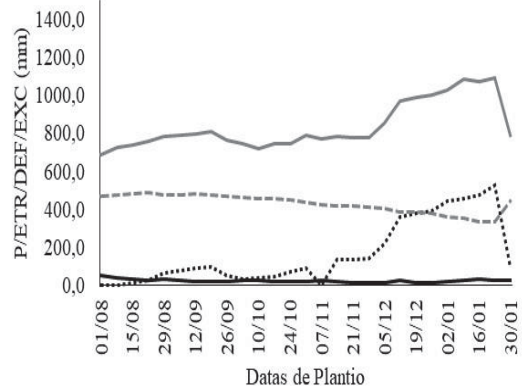
FIGURA 4.4 – PRODUTIVIDADE SIMULADA (Y_s), BIOMASSA (B), PRECIPITAÇÃO (P), EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR), DEFICIÊNCIA HÍDRICA (DEF) E EXCEDENTE HÍDRICO (EXC), ESTIMADOS PARA O DISTRITO DE SOCAVÃO-PR AO LONGO DOS PERÍODOS DE PLANTIO ANALISADOS (01/08/2013 A 30/01/2014), PARA AS CULTIVARES: a) P30F53YH; b) P30R50YH; E, c) AG8041PRO.



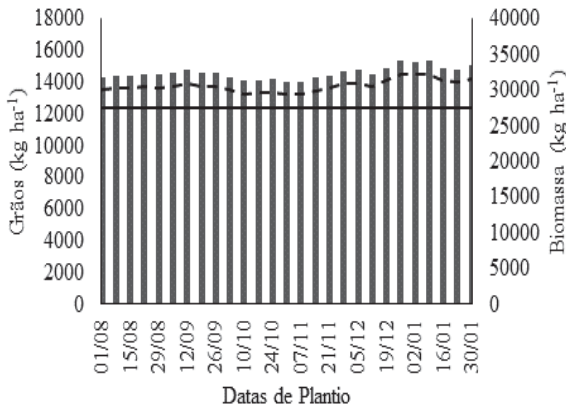
(a) Produtividade e Biomassa



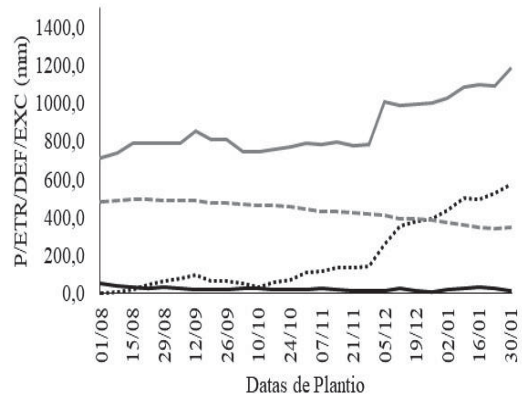
Componentes hídricas



(b) Produtividade e Biomassa



Componentes hídricas



(c) Produtividade e Biomassa

Componentes hídricas

■ Y_s — Y_r - - - B — P - - - ETR — DEF ····· EXC

FONTE: A autora (2018).

TABELA 4.4 – DESVIOS PERCENTUAIS RELATIVOS ENTRE AS RESPECTIVAS PRODUTIVIDADES ESTIMADAS (Y_s) E OBSERVADAS (Y_r), NAS LOCALIDADES DE CASTRO E SOCAVÃO, PARA OS PERÍODOS DE PLANTIO ENTRE 01/08 E 31/01, NAS SAFRAS 2012/13 A 2014/15, CONSIDERANDO AS CULTIVARES P30F53YH, P30R50YH E AG8041PRO.

Datas de Plantio	Castro						Socavão					
	30F53YH		P30R50YH		AG8041PRO		30F53YH		P30R50YH		AG8041PRO	
	2013/14	2014/15	2013/14	2014/15	2013/14	2014/15	2012/13	2013/14	2012/13	2013/14	2012/13	2013/14
1/8	6,5	6,9	2,5	6,7	3,8	4,9	-3,9	7,8	-2,6	10,7	-3,5	13,7
8/8	7,7	7,4	4,0	7,3	5,3	5,9	-3,8	7,3	-2,5	11,3	-3,4	14,2
15/8	7,9	7,0	4,5	6,9	5,8	5,0	-3,9	7,5	-2,6	12,0	-3,5	14,5
22/8	8,2	6,7	4,9	6,5	6,2	4,6	-3,5	7,7	-2,6	12,5	-3,0	15,1
29/8	7,5	6,7	4,5	6,6	5,8	4,7	-2,1	6,9	-1,4	12,1	-2,3	14,8
5/9	8,7	6,2	5,7	6,1	6,9	4,2	-1,1	7,7	-0,3	12,6	-1,1	15,6
12/9	9,4	6,7	6,2	7,1	7,5	5,3	0,6	8,2	2,1	13,5	1,4	17,1
19/9	8,6	6,0	5,7	6,4	6,9	4,8	0,3	8,3	2,2	13,1	1,5	15,8
26/9	6,6	5,3	3,9	5,2	5,1	3,2	-2,6	8,5	-1,2	13,0	-2,4	15,8
3/10	3,1	-100	0,7	-100	1,9	-100	-2,0	5,6	-0,5	10,2	-1,6	13,5
10/10	0,2	0,4	-0,7	1,6	0,4	0,1	-1,1	4,4	-0,1	8,6	-1,2	11,8
17/10	-0,1	2,0	-0,8	2,6	0,4	1,7	-1,1	4,2	0,3	8,8	-0,9	12,1
24/10	1,7	4,5	0,5	4,3	1,7	3,3	-0,9	4,0	0,0	9,3	-1,4	12,6
31/10	2,9	6,5	1,2	6,4	2,3	5,8	-1,3	3,8	-0,7	8,2	-2,2	11,5
7/11	1,7	7,1	1,3	6,9	2,4	6,0	0,8	3,1	1,3	7,8	-0,2	11,1
14/11	3,5	8,2	2,5	8,1	3,7	7,1	4,0	4,7	2,1	9,7	0,7	13,2
21/11	3,8	9,0	4,0	9,0	5,1	8,2	4,0	5,9	4,9	10,7	3,4	14,5
28/11	6,7	10,5	6,0	10,4	7,2	9,4	5,0	7,7	5,8	12,9	4,4	16,8
5/12	9,3	11,5	7,6	11,4	8,8	9,3	5,5	8,6	6,4	13,7	5,0	17,5
12/12	7,5	13,3	4,5	13,7	5,7	11,5	5,4	7,4	6,5	12,1	5,2	15,3
19/12	11,4	13,5	8,6	13,9	9,7	11,6	4,4	9,6	6,7	15,3	5,5	18,5
26/12	15,5	13,4	11,3	13,7	12,5	11,4	4,4	13,2	6,0	18,5	4,4	21,7
2/1	18,4	13,3	13,1	13,7	14,3	11,5	3,7	13,5	4,3	18,8	2,9	21,6
9/1	18,8	13,3	13,0	13,3	14,2	11,0	3,9	14,6	3,3	19,4	0,0	22,0
16/1	11,5	14,0	6,8	14,1	7,9	11,4	4,6	11,9	2,8	15,2	1,5	18,4
23/1	12,6	13,8	7,7	14,0	8,9	10,9	1,9	11,6	3,9	15,2	2,6	17,5
30/1	12,9	13,5	-2,9	13,9	8,3	11,3	2,3	13,1	4,9	11,5	3,6	19,6

FONTE: A autora (2018).

O milho é uma planta com rota metabólica C_4 , estando no grupo de maior eficiência do uso da radiação solar. Sua fisiologia permite que a planta alcance a

máxima produtividade de grãos quando a máxima área foliar ocorre com a interceptação da maior radiação solar disponível, permitindo a maximização da fotossíntese, aumentando a necessidade hídrica da cultura, pois o alto fluxo de energia incidente eleva a evapotranspiração (BERGAMASCHI et al., 2004).

Os coeficientes que penalizam a produtividade potencial no AquaCrop referem-se as funções de resposta de estresse hídrico no decorrer do ciclo da cultura, quais sejam: redução da expansão foliar; indução do fechamento estomatal; senescência precoce do dossel; e, salinidade. No período analisado, a menor produção de grãos ocorreu quando houve estresse hídrico durante a fase vegetativa o qual afetou a expansão foliar, penalizando a produtividade da cultura.

O AquaCrop não utiliza o índice de área foliar nos cálculos, mas sim a cobertura do dossel (CC), que corresponde à fração do solo coberta pelo dossel. A CC é um dos parâmetros utilizados no cálculo da transpiração da cultura (Tr), que por sua vez é utilizado no cálculo da biomassa, sendo uma variável para estimar a produção de grãos (RAES et al., 2009). Assim, menores valores da CC proporcionam consecutivamente diminuição da Tr , biomassa e produção de grãos, explicando baixos valores de produção verificados nos plantios realizados entre setembro e novembro. No entanto, mesmo assim, as produtividades das cultivares de milho em Castro e Socavão, nas safras analisadas, foram superiores à média paranaense e nacional (CONAB, 2017):

– Na safra 2013/14 (Castro e Socavão), nos plantios realizados entre meados de dezembro e início de janeiro, ocorreram os maiores desvios positivos em relação à produtividade observada (4,5 a 21,7%; FIGURAS 4.1 e 4.4);

– Para a safra 2012/13, em Socavão, os maiores desvios em relação à produtividade observada variaram entre 4,4 a 6,7% no final de novembro e meados de janeiro (FIGURA 4.3). Em Castro, safra 2014/15, os maiores desvios variaram entre 10,9 a 14,1% para plantio entre meados de dezembro ao final de janeiro (FIGURA 4.2). Nesses períodos, foram verificadas as maiores precipitações e excedentes hídricos durante o ciclo, bem como as menores deficiências e consumo de água pela cultura.

Caramori et al. (2003) ressalta que ao escolher a data de plantio, deve-se observar o Zoneamento Agrícola de Risco Climático, a fim de diminuir os riscos de perda de produção em função da baixa disponibilidade de água às plantas no período de plantio escolhido. Assim, observa-se que a primeira quinzena de

dezembro foi propícia em ambas as safras, contribuindo com as maiores produções de grãos de milho, bem como biomassa. Wagner et al. (2013) verificaram que o dia 10 de novembro é a data mais recomendada para o plantio de milho em Guarapuava-PR, por resultar em maior produção de grãos e menor probabilidade de déficit hídrico no período crítico para a cultura (floração a fecundação). Kopp et al. (2015) relataram que a melhor data de plantio foi 15 de dezembro para os municípios do Rio Grande do Sul, devido a menor deficiência hídrica durante o ciclo de cultivo.

Apesar do AquaCrop estimar as maiores produtividades no período de semeadura compreendido entre novembro e dezembro, vale-se ressaltar que o modelo não leva em conta aspectos como pragas e doenças. O milho semeado nesse período iria se desenvolver em períodos de altas temperaturas e precipitações, fatores que propiciam a ocorrência de pragas e doenças. Com isso, os produtores da região optam por plantarem o milho preferencialmente em setembro, período em que a cultura exigiria menor controle fitossanitário e conseqüentemente menor gasto com defensivos agrícolas.

4.6 CONCLUSÕES

A primeira quinzena de dezembro é o período que proporciona as maiores produtividades simuladas da cultura do milho no AquaCrop, em relação as produtividades observadas em Castro e Socavão, no mesmo período.

O AquaCrop não leva em consideração aspectos como pragas e doenças e o plantio entre novembro e dezembro exigiria maior controle fitossanitário da cultura.

O plantio de milho em setembro não maximiza a produtividade da cultura da região de Castro e Socavão, mas é a melhor opção, em decorrência da menor exposição da cultura aos fatores favoráveis ao desenvolvimento de problemas fitossanitários, bem como diminui as aplicações e gastos com defensivos agrícolas.

4.7 REFERÊNCIAS

ABENDIPOUR, M.; SARANGI, A.; RAJPUT, T. B. S.; SINGH, M.; PATHAK, H. ; AHMAD, T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 110, p. 55-66, jul. 2012.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**. Roma: FAO, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>>. Acesso em: 13 nov. 2016.

ÁLVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppens's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, dez. 2013.

ANDARZIAN, B.; HOOGENBOOM, G.; BANNAYAN, M.; SHIRALI, M.; ANDARZIAN, B. Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 14, n. 2, p. 189-199, jun. 2015.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. New agroclimatic approach for soybean sowing dates recommendation: a case study. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 11, p. 1149-1156, nov. 2014.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MULLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 831-839, set. 2004.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MULLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P. G. Déficit Hídrico e Produtividade na Cultura do Milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 243-249, fev. 2006.

BERGAMASCHI, H.; RADIN, B.; ROSA, L. M. G.; BERGONCI, J. I.; ARAGONÉS, R. S.; SANTOS, A. O.; FRANÇA, S.; LANGENSIEPEN, M. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorologia**, Córdoba, v. 1, p. 23-27. 2001.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento Agrícola**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuario/portarias/safra-vigente/parana>>. Acesso em: 13 mar. 2017.

CARAMORI, P. H.; GONÇALVES, S. L.; FARIA, R. T.; CAVIOGLIONE, J. H.; OLIVEIRA, D.; GALDINO, J.; PUGSLEY, L.; WREGE, M. S. Zoneamento agrícola do estado do Paraná. In: _____. **Zoneamento da cultura do milho safra normal**. Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 2003. 76p.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Séries históricas de área plantada, produtividade e produção, relativas às safras 1976/77 a 2015/16 de grãos, 2001 a 2016 de café, 2005/06 a 2016/17 de cana-de-açúcar**. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&Pagina_objcmsconteudos=3#A_objcmsconteudos>. Acesso em: 23 jan. 2017.

CORRÊA, T. R. C.; LORENÇONI, R.; DOURADO NETO, D.; SACARPARE, F. V.; VIVIAN, R.; RUIZ, E. T. Aplicações e limitações da modelagem na agricultura – revisão. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 86, n. 1, p. 1-13. 2011.

DOURADO NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARD, K.; NIELSEN, D. R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O. O. S. Principles of crop modelling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. especial, p. 46-50, ago. 1998.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Fenologia do milho. In: _____. **Tecnologia da produção de milho**. Piracicaba: Publique, 1997. p.131-140.

FANCELLI, A. L. O sistema de plantio direto. Curso de Especialização à Distância: Tecnologia da produção de milho. Piracicaba-SP, 2002.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **AquaCrop**. Rome, 2016 em: <<http://www.fao.org/aquacrop/software/en/>>. Acesso: 20 nov. 2016.

HAILESELASSIE, H.; ARAYA, A.; HABTU, S.; MELES, K. G.; GEBRU, G.; KISEKKA, I.; GIRMA, A.; HADGU, K. M.; FOSTER, A. J. Exploring optimal farm resources management strategy for *Quncho-teff (Eragrostis tef (Zucc.) Trotter)* using AquaCrop model. **Agricultural Water Management**, v. 178, p. 148-158, dez. 2016.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Florence, v. 18, n. 3/4, p. 235-265, jan. 2003.

KOPP, L. M.; PEITER, M. X.; BEN, L. H. B.; NOGUEIRA, H. M. C. M.; PADRÓN, R. A. R.; ROBAINA, A. D.; BUSKE, T. C. Simulação da necessidade hídrica e estimativa de produtividade para a cultura do milho em municípios do RS. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 14, n. 2, p. 235-246, ago. 2015.

LU, H.; DAI, J.; LI, WEIJIANG.; TANG, W.; ZHANG, D.; ENEJI, A. E.; DONG, H. Yield and economic benefits of late planted short-season cotton versus full-season cotton relayed with garlic. **Field Crops Research**, v. 200, p. 80-87, jan. 2017.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 2006. Circular Técnica, 76.

MIRSAFI, Z. S.; SEPASKHAH, A. R.; AHMADI, S. H.; HAGHGHI, A. A. K. Assessment of AquaCrop model for simulating growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 211, p. 343-351, nov. 2016.

NYAKUDYA, I. W.; STROOSNIJDER, L. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: modelling with AquaCrop. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 280-296, dez. 2014.

PIEKARSKI, K. R. Produtividades de soja e milho estimadas com o modelo AquaCrop na Região dos Campos Gerais. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

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**, Madison, v. 101, n. 3, p. 438-447. 2009.

SANTOS, M. A.; CAMARGO, M. B. P. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 1, p. 173-183, 2006.

SRIVASTAVA, A. K.; MBOH, C. M.; GAISER, T.; WEBBER, H.; EWERT, F. Effect of sowing date distributions on simulation of maize yields at regional scale – a case study in Central Ghana, West Africa. **Agricultural Systems**, v. 147, p. 10-23, set. 2016.

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**, Madison, v. 101, n. 3, p. 426-437. 2009.

STEDUTO, P.; RAES, D.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; HENG, L.; IZZI, G.; HOOGEVEEN, J. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. In: López-Francos A. (Ed.). **Drought management: scientific and technological innovations**. Zaragoza: CIHEAM, 2008. P. 285-292. (Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens; n.80).

STRICEVIC, R.; DZELETOVIC, Z.; DJUROVIC, N.; COSIC, M. Application of the AquaCrop model to simulate the biomass of *Miscanthus x giganteus* under different nutrient supply conditions. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 7, n. 6, p. 1203-1210, nov. 2015.

TOUMI, J.; ER-RAKI, S.; EZZAHAR, J.; KHABBA, S.; JARLAN, L.; CHEHBOUNI, A. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensif Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 219-235, jan. 2016.

WAGNER, M. V.; JADOSKI, S. O.; MAGGI, M. F.; SAITO, L. R.; LIMA, A. S. Estimativa da produtividade do milho em função da disponibilidade hídrica em Guarapuava, PR, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 170-179, fev. 2013.

WANG, J.; LI, X.; LU, L.; FANG, F. Parameter sensitivity analysis of crop growth models based on the extended fourier amplitude sensitivity test method. **Environmental Modelling and Software**, v. 48, p. 171-182, out. 2013.

WREGGE, M. S.; GONÇALVES, S. L.; CARAMORI, P. H.; VASCONCELLOS, M. E. C.; OLIVEIRA, D.; ABUCARUB NETO, M.; BORROZZINO, E.; CAVIGLIONE, J. H.

Risco de deficiência hídrica na cultura do milho no estado do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 7, p. 1119-1124, jul. 1999.

5 CONCLUSÕES GERAIS

Conforme resultados obtidos nas análises de calibração e validação, o AquaCrop é capaz de estimar adequadamente as produtividades de soja (desempenho variando de “péssimo” a “ótimo”) e milho (desempenho “ótimo”) na região dos Campos Gerais-PR, podendo ser utilizado como ferramenta alternativa na busca por maiores produtividades das culturas na região.

Quanto às análises de sensibilidade dos parâmetros do AquaCrop para a cultura do milho pode-se afirmar que: *i)* Os parâmetros referentes à cultura proporcionam maior sensibilidade por estarem relacionados às principais equações que determinam a biomassa e produtividade da cultura; *ii)* Os parâmetros físico-hídricos relacionados ao solo não obtiveram altos índices de sensibilidade; *iii)* A fertilidade no solo é o parâmetro de manejo mais sensível no modelo.

A primeira quinzena de dezembro é o período que proporciona as maiores produtividades simuladas da cultura do milho no AquaCrop, em relação às produtividades observadas em Castro e Socavão, no mesmo período. Contudo, o plantio de milho em setembro não maximiza a produtividade da cultura da região de Castro e Socavão, mas é a melhor opção, em decorrência da menor exposição da cultura aos fatores favoráveis ao desenvolvimento de problemas fitossanitários, bem como diminui as aplicações e gastos com defensivos agrícolas.

REFERÊNCIAS

- ABENDIPOUR, M.; SARANGI, A.; RAJPUT, T. B. S.; SINGH, M.; PATHAK, H.; AHMAD, T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 110, p. 55-66, jul. 2012.
- AIMIRI E. Calibration and testing of the AquaCrop model for rice under water and nitrogen management. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 47, n. 3, p. 387-403, fev. 2016.
- AKUMAGA, U.; TARHULE, A.; YUSUF, A. A. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 225-234, jan. 2017.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**. Roma: FAO, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>>. Acesso em: 13 nov. 2016.
- ÁLVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppens's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, dez. 2013.
- ANDARZIAN, B.; HOOGENBOOM, G.; BANNAYAN, M.; SHIRALI, M.; ANDARZIAN, B. Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 14, n. 2, p. 189-199, jun. 2015.
- ANDRADE, C. L. T.; AMARAL, T. A.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; HEINEMANN, A. B.; GARCIA, A. G.; TOJO-SOLER, C. M.; SILVA, D. F.; HICKMANN, C.; SANTANA, C. B.; MOURA, B. F.; CASTRO, L. A. **Modelagem do crescimento de culturas: aplicações à cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. Documentos, 91.
- ARAÚJO, M. A.; SOUZA, J. L. M.; BRONDANI, G. E.; PAULETTI, V. Sistemas de manejo e relações hídricas do solo na produtividade da cultura da soja, em Ponta Grossa-Paraná. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 10, n. 5, p. 403-412, set./out. 2009.
- ARAÚJO, M. A.; SOUZA, J. L. M.; TSUKAHARA, R. Y. Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 23-31, set./mar. 2011.
- ASSENG, A.; BAR-TAL, A.; BOWDEN, J. W.; KEATING, B. A.; VAN HERWAARDEN, A.; PALTA, J. A.; HUTH, N. I.; PROBERT, M. E. Simulation of grain protein content with APSIM-N wheat. **European Journal of Agronomy**, v. 16, n. 1, p. 25-42, jan. 2002.

ASSENG, S.; EWERT, F.; ROSENZWEIG, C.; JONES, J. W.; HATFIELD, J. L.; RUANE, A. C.; BOOTE, K. J.; THORBURN, P. J.; RÖTTER, R. P.; CAMMARANO, D.; BRISSON, N.; BASSO, B.; MARTRE, P.; AGGARWAL, P. K.; ÂNGULO, C.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; CHALLINOR, A. J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R.; HENG, L.; HOOKER, J.; HUNT, L. A.; INGWERSEN, J.; IZAURRALDE, R. C.; KERSEBAUM, K. C.; MÜLLER, C.; NARESH KUMAR, S.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.; OLESEN, J. E.; OSBORNE, T. M.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; RIPOCHE, D.; SEMENOV, M. A.; SHCHERBAK, I.; STEDUTO, P.; STÖCKLE, C.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WALLACH, D.; WHITE, J. W.; WILLIAMS, J. R.; WOLF, J. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 6, p. 827-832, jun. 2013.

BATTISTI, R. ; SENTELHAS, P. C. ; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in Southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 200, p. 28-37, jan. 2017.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. New agroclimatic approach for soybean sowing dates recommendation: a case study. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 11, p. 1149-1156, nov. 2014.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MULLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 831-839, set. 2004.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MULLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P. G. Déficit Hídrico e Produtividade na Cultura do Milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 243-249, fev. 2006.

BERGAMASCHI, H.; RADIN, B.; ROSA, L. M. G.; BERGONCI, J. I.; ARAGONÉS, R. S.; SANTOS, A. O.; FRANÇA, S.; LANGENSIEPEN, M. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorologia**, Córdoba, v. 1, p. 23-27. 2001.

BERNADON, T.; CALGARO, M. Modelo de simulação do crescimento de plantas. **Ambiência**, Guarapuava, v. 3, n. 2, p. 283-294, mai./ago. 2007.

BORGES JUNIOR, J. C. F.; FERREIRA, P. A.; HEDDEN-DUNKHORST, B.; ANDRADE, C. L. T. Modelo computacional para suporte à decisão em áreas irrigadas. Parte I: Desenvolvimento e análise de sensibilidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 1, p. 3-11, jan./fev. 2008.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento Agrícola**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuario/portarias/safra-vigente/parana>>. Acesso em: 13 mar. 2017.

BRISSON, N.; GARY, C.; JUSTES, E.; ROCHE, R.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; ZIMMER, D.; SIERRA, J.; BERTUZZI, P.; BURGER, P.; BUSSIÈRE, F.; CABIDOCHÉ, Y. M.; CELLIER, P.; DEBAEKE, P.; GAUDILLÈRE, J. P.; HÉNAULT, C.; MARAUX, F.; SEGUIN, B.; SINOQUET, H. An overview of the crop model STICS. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3/4, p. 309-332, jan. 2003.

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

CARAMORI, P. H.; GONÇALVES, S. L.; FARIA, R. T.; CAVIOGLIONE, J. H.; OLIVEIRA, D.; GALDINO, J.; PUGSLEY, L.; WREGE, M. S. Zoneamento agrícola do estado do Paraná. In: _____. **Zoneamento da cultura do milho safra normal**. Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 2003. 76p.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Séries históricas de área plantada, produtividade e produção, relativas às safras 1976/77 a 2015/16 de grãos, 2001 a 2016 de café, 2005/06 a 2016/17 de cana-de-açúcar**. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&Pagina_objcmsconteudos=3#A_objcmsconteudos>. Acesso em: 23 jan. 2017.

CONFALONIERI, R.; ACUTIS, M.; BELLOCHI, G.; CERRANI, I.; TARANTOLA, S.; DONATELLI, M.; GENOVESE, G. Exploratory sensitivity analysis of CropSyst, WARM and WOFOST: a case study with rice biomass simulations. **Italian Journal of Agrometeorology**, v. 11, n. 3, p. 35-39. 2006.

CONFALONIERI, R.; BREGAGLIO, S.; ACUTIS, M. A proposal of an indicator for quantifying model robustness based on the relationship between variability of errors and of explored conditions. **Ecological Modelling**, v. 221, n. 6, p. 960-964, mar. 2010.

CONFALONIERI, R.; BREGAGLIO, S.; ACUTIS, M. Quantifying uncertainty in crop model predictions due the uncertainty in the observation used for calibration. **Ecological Modelling**, v. 328, p. 72-77, mai. 2016.

CORRÊA, T. R. C.; LORENÇONI, R.; DOURADO NETO, D.; SACARPARE, F. V.; VIVIAN, R.; RUIZ, E. T. Aplicações e limitações da modelagem na agricultura – revisão. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 86, n. 1, p. 1-13. 2011.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1979. 193p. (FAO Irrigation and Drainage, paper 33).

DOURADO NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARD, K.; NIELSEN, D. R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O. O. S. Principles of crop modelling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. especial, p. 46-50, ago. 1998.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Fenologia do milho. In: _____.
Tecnologia da produção de milho. Piracicaba: Publique, 1997. p.131-140.

FANCELLI, A. L. O sistema de plantio direto. Curso de Especialização à Distância:
 Tecnologia da produção de milho. Piracicaba, 2002.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **AquaCrop**. Rome,
 2016 em: <<http://www.fao.org/aquacrop/software/en/>>. Acesso: 20 nov. 2016.

HAILESELASSIE, H.; ARAYA, A.; HABTU, S.; MELES, K. G.; GEBRU, G.; KISEKKA,
 I.; GIRMA, A.; HADGU, K. M.; FOSTER, A. J. Exploring optimal farm resources
 management strategy for *Quncho-teff (Eragrostis tef (Zucc.) Trotter)* using AquaCrop
 model. **Agricultural Water Management**, v. 178, p. 148-158, dez. 2016.

HE, D.; WANG, E.; WANG, J.; ROBERTSON, M J. Data requirement for effective
 calibration of process-based crop models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.
 234, p. 136-148, mar. 2017.

HENG, L. K.; HSIAO, T.; EVETT, S.; HOWELL, T.; STEDUTO, P. Validating the FAO
 AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. **Agronomy Journal**,
 Madison, v. 101, n. 3, p. 488-498. 2009.

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.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR,
 W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T.
 The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Florence, v.
 18, n. 3/4, p. 235-265, jan. 2003.

KEATING, B. A.; CARBERRY, P. S.; HAMMER, G. L.; PROBERT, M. E.;
 ROBERTSON, M. J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N. I.; HARGREAVAR, J. N. G.;
 MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; MCLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J. P.;
 SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, E.; BRISTOW, K. L.; ASSENG, S.; CHAPMAN,
 S.; MCCOWN, R. L.; FREEBAIRN, D. M.; SMITH, C. J. An overview of APSIM, a
 model designed for farming systems simulation. **European Journal Agronomy**, v.
 18, n. 3/4, p.267-288, jan. 2003.

KOPP, L. M.; PEITER, M. X.; BEN, L. H. B.; NOGUEIRA, H. M. C. M.; PADRÓN, R.
 A. R.; ROBAINA, A. D.; BUSKE, T. C. Simulação da necessidade hídrica e
 estimativa de produtividade para a cultura do milho em municípios do RS. **Revista
 Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 14, n. 2, p. 235-246, ago. 2015.

LIMA FILHO, A. F.; COELHO FILHO, M. A.; HEINEMANN, A. B. Calibração e
 avaliação do modelo CROPGRO para a cultura do feijão caupi no Recôncavo
 Baiano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina
 Grande, v. 17, n. 12, p. 1286-1293, dez. 2013.

LU, H.; DAI, J.; LI, WEIJIANG.; TANG, W.; ZHANG, D.; ENEJI, A. E.; DONG, H. Yield and economic benefits of late planted short-season cotton versus full-season cotton relayed with garlic. **Field Crops Research**, v. 200, p. 80-87, jan. 2017.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 2006. Circular Técnica, 76.

MAKOWSKI, D.; NAUD, C.; JEUFFROY, M. H.; BARBOTTIN, A.; MONOD, H. Global sensitivity analysis for calculating the contribution of genetic parameters to the variance of crop model prediction. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 91, n. 10/11, p. 1142-1147, out./nov.. 2006.

MANIRUZZAMAN, M.; TALUKDER, M. S. U.; KHAN, M. H.; BISWAS, J. C.; NEMES, A. Validation of the AquaCrop model for irrigated rice production under varied water regimes in Bangladesh. **Agricultural Water Management**, v. 159, p. 331-340, set. 2015.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, J. F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J. L.; PALLONE FILHO, W. J.; NASSIF, D. S. P. Parametrization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for brazilian sugarcane. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 2, p. 304-315. 2011.

MARTÍN, M. M. S.; OLESEN, J. E.; PORTER, J. R. A genotype, environment and management (GxExM) analysis of adaptation in winter wheat to climate change in Denmark. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 187, p. 1-13, abr. 2014.

MIRSAFI, Z. S.; SEPASKHAH, A. R.; AHMADI, S. H.; KAMGAR-HAGHIGHI, A. A. Assessment of AquaCrop model for simulating growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 211, p. 343-351, nov. 2016.

NASSIF, D. S. P.; ASSAD, E. D. Análise de sensibilidade local do modelo Canegro/DSSAT. In: MOSTRA DE ESTAGIÁRIOS E BOLSISTAS DA EMBRAPA INFORMÁTICA AGROPECUÁRIA, 2010, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2010. p.53-56.

NASSIF, D. S. P.; MARIN, F. R.; PALLONE FILHO, W. J.; RESENDE, R. S.; PELLEGRINO, G. Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 311-318, mar. 2012.

NYAKUDYA, I. W.; STROOSNIJDER, L. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: modelling with AquaCrop. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 280-296, dez. 2014.

PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Análise de sensibilidade dos componentes da equação de Hargreaves-Samani para a região de Bebedouro-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 299-306, jun. 2014.

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

PIEKARSKI, K. R. Produtividades de soja e milho estimadas com o modelo AquaCrop na Região dos Campos Gerais. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

RACKL, M.; HANLEY, K. J. A methodical calibration procedure for discrete element models. **Powder Technology**, v. 307, p. 73-83, fev. 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**, Madison, v. 101, n. 3, p. 438-447. 2009.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual of AquaCrop: Annexes**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-br244e.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2017.

RAUFF, K. O.; BELLO, R. A review of crop growth simulation models as tools for agricultural meteorology. **Agricultural Sciences**, v. 6, n. 9, p. 1098-1105, set. 2015.

SANTOS, M. A.; CAMARGO, M. B. P. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 1, p. 173-183, 2006.

SCHIMANDEIRO, A.; WEIRICH NETO, P. H.; GIMENEZ, L. M.; COLET, M. J.; GARBUIO, P. W. Distribuição longitudinal de plantas de milho (*Zea mays* L.) na região dos Campos Gerais, Paraná. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 977-980, mai./jun. 2006.

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**, Recife, v. 4, n. 1, p. 78-84, jan./mar. 2009.

SOUZA, J. L. M.; GERSTEMBERGER, E.; ARAÚJO, M. A. Calibração de modelos agrometeorológicos para estimar a produtividade da cultura do trigo, considerando sistemas de manejo do solo, em Ponta Grossa-PR. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 409-418, dez. 2013.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; GOMES, S. Precipitação e evapotranspiração de referência prováveis na região de Ponta Grossa-PR. **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, Botucatu, v. 19, n. 2, p. 279-291, abr./jun. 2014.

SRIVASTAVA, A. K.; MBOH, C. M.; GAISER, T.; WEBBER, H.; EWERT, F. Effect of sowing date distributions on simulation of maize yields at regional scale – a case

study in Central Ghana, West Africa. **Agricultural Systems**, v. 147, p. 10-23, set. 2016.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. Crop yield response to water. **FAO Irrigation and Drainage Paper 66**. Rome: FAO, 2012. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/016/i2800e/i2800e.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

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**, Madison, v. 101, n. 3, p. 426-437. 2009.

STEDUTO, P.; RAES, D.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; HENG, L.; IZZI, G.; HOOGEVEEN, J. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. In: López-Francos A. (Ed.). **Drought management: scientific and technological innovations**. Zaragoza: CIHEAM, 2008. p. 285-292. (Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens; n.80).

STOCKLE, C. O.; DONATELLI, M.; NELSON, R. CropSyst, a cropping systems simulation model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3/4, p. 289-307, jan. 2003.

STRICEVIC, R.; DZELETOVIC, Z.; DJUROVIC, N.; COSIC, M. Application of the AquaCrop model to simulate the biomass of *Miscanthus x giganteus* under different nutrient supply conditions. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 7, n. 6, p. 1203-1210, nov. 2015.

TARANTOLA, S.; SALTELLI, A. SAMO 2001: methodological advances and innovative application of sensitivity analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 79, n. 2, p. 121-122, fev. 2003.

TAVAKOLI, A. R.; MOGHADAM, M. M.; SEPASKHAH, A. R. Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 161, p. 136-146, nov. 2015.

TIMSINA, J.; HUMPHREYS, E. Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice-wheat systems: a review. **Agricultural Systems**, v. 90, n. 1/3, p. 5-31, out. 2006.

TOUMI, J.; ER-RAKI, S.; EZZAHAR, J.; KHABBA, S.; JARLAN, L.; CHEHBOUNI, A. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensif Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 219-235, jan. 2016.

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**, v. 62, p. 351-360, dez. 2014.

- WAGNER, M. V.; JADOSKI, S. O.; MAGGI, M. F.; SAITO, L. R.; LIMA, A. S. Estimativa da produtividade do milho em função da disponibilidade hídrica em Guarapuava, PR, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 170-179, fev. 2013.
- WALLACH, D.; BUIS, S.; LECHARPENTIER, P.; BOURGES, J.; CLASTRE, P.; LAUNAY, M.; BERGEZ, J. E.; GUERIF, M.; SOUDAIS, J.; JUSTES, E. A package of parameter estimation methods and implementation for the STICS crop-soil model. **Environmental Modelling and Software**, v. 26, n. 4, p. 386-394, abr. 2011.
- WALLACH, D.; GOFFINET, B.; BERGEZ, J. F.; DEBAEKE, P.; LEENHARDT, A. Parameter estimation for crop models: a new approach and application to a corn model. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 4, p. 757-766. 2001.
- WANG, J.; LI, X.; LU, L.; FANG, F. Parameter sensitivity analysis of crop growth models based on the extended fourier amplitude sensitivity test method. **Environmental Modelling and Software**, v. 48, p. 171-182, out. 2013.
- WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorology Society**, Boston, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, nov. 1982.
- WREGGE, M. S.; GONÇALVES, S. L.; CARAMORI, P. H.; VASCONCELLOS, M. E. C.; OLIVEIRA, D.; ABUCARUB NETO, M.; BORROZZINO, E.; CAVIGLIONE, J. H. Risco de deficiência hídrica na cultura do milho no estado do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 7, p. 1119-1124, jul. 1999.

**APÊNDICE 1 – DADOS DE ENTRADA UTILIZADOS NO MODELO AQUACROP,
PARA A CULTURA DO MILHO, GENÓTIPOS P30F53YH, P30R50YH E
AG8041PRO, EM CASTRO E SOCAVÃO**

(continua)

Símbolo	Descrição	Valores		
		30F53YH	30R50YH	AG8041PRO
	Temperaturas limites do ar			
T_b	Temperatura base (°C) ⁽¹⁾		8	
T_B	Temperatura superior (°C) ⁽¹⁾		44	
	Desenvolvimento do dossel			
CC_o	Cobertura inicial do dossel com 90% de emergência das plantas (%) ⁽²⁾	0,35	0,38	0,32
CGC	Coeficiente de crescimento do dossel (% dia ⁻¹) ⁽¹⁾		11,6	
CC_x	Máxima cobertura do dossel (%) ⁽³⁾		95	
CDC	Coeficiente de declínio do dossel (% dia ⁻¹) ⁽¹⁾	6,6	6,7	6,3
	Desenvolvimento da zona radicular			
Z_{min}	Profundidade radicular mínima efetiva (m) ⁽³⁾		0,3	
$Z_{máx}$	Profundidade radicular máxima efetiva (m) ⁽³⁾		2,8	
	Fator descrevendo a expansão da zona radicular ⁽¹⁾		1,3	
$K_{CTR,x}$	Coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ⁽¹⁾		1,05	
	Coeficiente de declínio da cultura como resultado da idade, deficiência de nitrogênio, etc. (% dia ⁻¹) ⁽¹⁾		0,3	
	Efeito da cobertura do dossel na redução da evaporação do solo no último estágio da cultura ⁽³⁾		50	
	Produtividade de água da cultura			
WP^*	Produtividade de água normalizada para ET_o e CO_2 (g m ⁻²) ⁽¹⁾	33	33	33
	Produtividade de água normalizada para ET_o e CO_2 durante a formação de rendimento ⁽¹⁾		100	
	Índice de Colheita			
HI_o	Índice de colheita de referência (%) ⁽⁴⁾	46	46	44
	Possível incremento no HI devido ao estresse hídrico antes do florescimento ⁽¹⁾		Nenhum	
	Excesso de frutos potenciais (%) ⁽²⁾		Pequeno	
	Coeficiente descrevendo o impacto positivo da restrição do crescimento vegetativo durante a formação de rendimento no HI ⁽¹⁾		Pequeno	
	Coeficiente descrevendo o impacto negativo do fechamento estomático durante a formação de rendimento no HI ⁽¹⁾		Forte	
	Máximo aumento permitido do HI especificado ⁽¹⁾		15	

**APÊNDICE 1 – DADOS DE ENTRADA UTILIZADOS NO MODELO AQUACROP,
PARA A CULTURA DO MILHO, GENÓTIPOS P30F53YH, P30R50YH E
AG8041PRO, EM CASTRO E SOCAVÃO**

(continuação)

Símbolo	Descrição	Valores		
		30F53YH	30R50YH	AG8041PRO
----- Estresse -----				
	Estresse hídrico no solo			
$p_{exp,lower}$	Limite inferior de depleção da água no solo para expansão do dossel ⁽¹⁾		0,14	
$p_{exp,upper}$	Limite superior de depleção da água no solo para expansão do dossel ⁽¹⁾		0,72	
	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel ⁽¹⁾		2,9	
p_{sto}	Limite superior de depleção da água no solo para controle estomático ⁽¹⁾		0,69	
	Fator do coeficiente de estresse hídrico para controle estomático ⁽¹⁾		6	
p_{sen}	Limite superior de depleção da água no solo para senescência do dossel ⁽¹⁾		0,69	
	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel ⁽¹⁾		2,7	
p_{pol}	Limite superior de depleção de água no solo para falhar a polinização ⁽¹⁾		0,8	
	Volume (%) no ponto anaerobiótico (com referência para saturação ⁽³⁾⁽⁴⁾)		5	
----- Manejo do solo -----				
	Estresse pela temperatura do ar			
	Mínima temperatura do ar abaixo da qual o começo da polinização começa a falhar ⁽¹⁾		10	
	Máxima temperatura do ar acima da qual o começo da polinização começa a falhar ⁽¹⁾		40	
	Mínimo graus dias requerido para completa produção de biomassa (°C dia ⁻¹) ⁽¹⁾		12	
	Fertilidade ⁽³⁾		Próxima ao ideal (90%)	
	Cobertura orgânica do solo ⁽³⁾		50%	

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

APÊNDICE 2 – PRODUTIVIDADE (Ys) E BIOMASSA SIMULADA (Bs), PRECIPITAÇÃO (P), EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAIS (ETR), DEFICIÊNCIA HÍDRICA (DEF) E EXCEDENTE HÍDRICO (EXC), OBTIDA PARA A CULTURA DO MILHO, COM AS CULTIVARES, P30F53YH, P30R50YH E AG8041PRO, NAS DATAS DE PLANTIOS ENTRE 01/08/2013 E 30/01/2014, EM CASTRO – PR

Datas de Plantio	P30F53YH					P30R50YH					AG8041PRO							
	Ys (kg ha ⁻¹)	Bs	P	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC	Ys (kg ha ⁻¹)	Bs	P	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC	Ys (kg ha ⁻¹)	Bs	P	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC
01/08/2013	15638	28415	621,5	461,2	56,1	0,0	13892	32288	692,9	507,0	54,0	0,0	13569	32288	692,9	507,0	54,0	0,0
08/08/2013	15817	28745	632,9	476,5	44,6	0,0	14094	32764	701,5	520,9	43,4	0,0	13767	32764	701,5	520,9	43,4	0,0
15/08/2013	15845	28800	655,5	483,1	35,0	0,0	14164	32932	706,3	527,8	34,3	0,0	13835	32932	706,3	527,8	34,3	0,0
22/08/2013	15882	28868	660,5	485,5	29,8	0,0	14218	33055	717,9	528,2	29,3	0,0	13887	33055	717,9	528,2	29,3	0,0
29/08/2013	15775	28667	669,9	475,4	34,5	3,3	14167	32931	732,5	519,1	33,8	21,6	13837	32931	732,5	519,1	33,8	21,6
05/09/2013	15953	28986	677,1	480,9	27,3	11,2	14321	33286	750,3	522,7	27,0	29,8	13988	33286	750,3	522,7	27,0	29,8
12/09/2013	16054	29167	694,3	484,6	22,3	17,0	14395	33454	798,7	523,9	22,8	87,4	14060	33454	798,7	523,9	22,8	87,4
19/09/2013	15938	28918	676,5	481,3	20,2	10,4	14321	33247	760,7	518,1	20,1	48,9	13988	33247	760,7	518,1	20,1	48,9
26/09/2013	15645	28336	655,3	475,3	22,7	0,0	14086	32651	706,1	511,9	22,7	5,4	13758	32651	706,1	511,9	22,7	5,4
03/10/2013	15140	27425	639,3	465,3	27,4	0,0	13653	31653	670,7	502,4	26,7	0,0	13335	31653	670,7	502,4	26,7	0,0
10/10/2013	14707	26689	613,5	445,8	37,7	0,0	13459	31252	658,5	481,7	37,0	0,0	13146	31252	658,5	481,7	37,0	0,0
17/10/2013	14670	26667	631,1	437,5	39,9	3,4	13452	31280	684,1	472,6	38,6	22,5	13139	31280	684,1	472,6	38,6	22,5
24/10/2013	14925	27128	632,7	432,4	38,2	10,6	13626	31681	711,1	464,6	37,5	54,2	13309	31681	711,1	464,6	37,5	54,2
31/10/2013	15113	27470	661,6	424,5	37,5	47,4	13717	31892	706,4	456,2	37,1	68,3	13398	31892	706,4	456,2	37,1	68,3
07/11/2013	14924	27125	675,2	402,9	49,7	58,0	13731	31924	684,4	435,6	49,8	69,8	13412	31924	684,4	435,6	49,8	69,8
14/11/2013	15197	27617	677,8	410,1	37,0	85,4	13897	32306	723,2	440,7	36,8	72,1	13574	32306	723,2	440,7	36,8	72,1
21/11/2013	15234	27676	665,0	401,3	36,6	83,7	14091	32748	933,4	432,8	36,6	206,4	13763	32748	933,4	432,8	36,6	206,4
28/11/2013	15665	28473	663,2	402,2	33,8	83,1	14367	33402	936,0	433,5	33,8	320,7	14033	33402	936,0	433,5	33,8	320,7
05/12/2013	16051	29182	923,2	397,1	31,8	267,4	14584	33915	949,8	425,2	32,0	335,0	14245	33915	949,8	425,2	32,0	335,0
12/12/2013	15788	28704	882,4	368,3	44,1	331,6	14168	32948	910,4	396,4	44,1	333,1	13838	32948	910,4	396,4	44,1	333,1
19/12/2013	16359	29743	905,8	379,7	30,0	340,0	14714	34219	960,8	409,7	30,6	368,1	14372	34219	960,8	409,7	30,6	368,1
26/12/2013	16960	30837	905,8	380,6	20,1	344,9	15090	35093	960,0	412,7	20,7	370,2	14739	35093	960,0	412,7	20,7	370,2
02/01/2014	17382	31604	955,4	370,6	24,4	404,9	15325	35639	1000,7	406,1	24,7	411,5	14968	35639	1000,7	406,1	24,7	411,5
09/01/2014	17437	31703	894,2	358,3	34,5	345,5	15321	35631	953,4	395,0	34,6	373,1	14965	35631	953,4	395,0	34,6	373,1
16/01/2014	16362	29750	842,5	329,1	52,0	298,6	14473	33658	859,6	363,5	52,8	320,5	14136	33658	859,6	363,5	52,8	320,5
23/01/2014	16528	30051	857,0	340,2	34,2	335,2	14603	33960	960,6	374,1	35,0	370,3	14263	33960	960,6	374,1	35,0	370,3
30/01/2014	16579	30143	885,8	340,8	31,8	330,9	13156	31310	696,5	483,7	29,6	4,6	14196	33799	992,6	374,6	33,2	438,6

APÊNDICE 3 – PRODUTIVIDADE (Ys) E BIOMASSA SIMULADA (Bs), PRECIPITAÇÃO (P), EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAIS (ETR), DEFICIÊNCIA HÍDRICA (DEF) E EXCEDENTE HÍDRICO (EXC), OBTIDA PARA A CULTURA DO MILHO, COM AS CULTIVARES, P30F53YH, P30R50YH E AG8041PRO, NAS DATAS DE PLANTIOS ENTRE 01/08/2014 E 30/01/2015, EM

CASTRO – PR

Datas de Plantio	P30F53YH						P30R50YH						AG8041PRO					
	Ys ---- (kg ha ⁻¹) ----	Bs	P	ETR	DEF ----- (mm) -----	EXC	Ys ---- (kg ha ⁻¹) ----	Bs	P	ETR	DEF ----- (mm) -----	EXC	Ys ---- (kg ha ⁻¹) ----	Bs	P	ETR	DEF ----- (mm) -----	EXC
01/08/2014	15429	32140	1131,2	501,2	26,1	413,9	15386	32050	1131,2	502,4	25,7	413,2	14994	33315	1146,4	516,0	26,1	444,0
08/08/2014	15504	32298	1145,2	502,3	22,8	451,3	15470	32228	1145,2	503,6	22,0	450,2	15135	33631	1187,2	516,5	23,5	478,7
15/08/2014	15448	32182	1171,8	496,5	25,2	450,9	15408	32099	1171,8	497,9	24,4	450,1	15007	33347	1173,4	511,3	26,1	482,5
22/08/2014	15401	32085	1149,2	492,6	30,3	471,9	15360	32000	1149,2	493,5	30,3	470,4	14955	33234	1161,8	505,7	30,8	468,4
29/08/2014	15405	32095	1144,3	484,4	32,9	481,2	15367	32015	1144,3	485,2	32,7	480,2	14963	33251	1233,5	498,2	32,5	517,9
05/09/2014	15336	31950	1185,9	474,3	43,0	475,9	15293	31861	1185,9	475,0	42,7	475,6	14899	33108	1281,5	488,9	43,2	537,5
12/09/2014	15402	32088	1275,6	474,1	40,6	545,8	15439	32164	1275,6	474,5	40,3	545,3	15051	33446	1310,6	486,0	40,5	636,5
19/09/2014	15308	31893	1306,6	467,9	40,6	644,2	15345	31969	1306,6	468,1	40,6	643,8	14985	33300	1313,8	480,9	41,0	651,6
26/09/2014	15205	31677	1234,6	462,6	42,6	587,3	15170	31605	1234,6	463,2	42,6	586,5	14755	33030	1234,6	463,2	42,6	586,5
03/10/2014	0	0	1240,0	383,6	84,5	623,7	0	0	1240,0	383,6	84,5	623,7	0	0	1240,4	391,7	87,1	671,9
10/10/2014	14502	30213	1240,0	445,3	47,4	614,8	14654	30530	1240,0	446,4	47,6	612,1	14306	31790	1240,4	456,7	47,8	607,6
17/10/2014	14724	30675	1235,0	450,5	33,3	611,8	14792	30817	1235,0	451,7	32,9	610,4	14543	32318	1241,8	461,8	32,9	607,8
24/10/2014	15082	31420	1229,8	448,5	29,1	609,3	15031	31315	1229,8	449,1	28,7	608,3	14764	32809	1288,0	458,7	28,9	644,5
31/10/2014	15374	32029	1286,4	450,1	17,2	654,6	15336	31951	1286,4	450,9	17,3	654,3	15123	33606	1335,4	460,8	17,4	691,2
07/11/2014	15459	32205	1362,8	442,1	17,6	710,8	15420	32125	1362,8	443,0	17,5	710,0	15157	33682	1363,2	450,7	17,2	731,6
14/11/2014	15626	32544	1320,4	433,0	14,3	707,1	15591	32481	1320,4	433,7	14,0	706,9	15308	34017	1371,0	442,0	14,2	744,2
21/11/2014	15745	32801	1328,1	423,1	11,3	716,2	15711	32730	1328,1	423,9	10,8	715,0	15461	34357	1330,3	431,2	11,2	717,5
28/11/2014	15949	33228	1298,5	415,0	11,3	691,6	15914	33153	1298,5	415,6	11,1	691,0	15632	34738	1317,1	422,4	11,4	713,1
05/12/2014	16102	33545	1289,7	409,5	6,8	698,6	16066	33470	1289,7	410,4	7,0	697,9	15621	34869	1425,3	417,5	7,2	752,2
12/12/2014	16357	34077	1397,1	401,4	5,1	777,3	16390	34145	1397,1	401,6	5,0	777,2	15938	34418	1474,7	407,9	5,2	873,8
19/12/2014	16395	34156	1426,2	386,7	4,6	852,4	16428	34225	1426,2	387,0	4,7	852,1	15954	35453	1433,0	395,9	5,4	857,2
26/12/2014	16367	34097	1294,6	380,0	6,3	735,9	16400	34167	1294,6	380,1	6,3	735,7	15919	35376	1295,4	388,5	6,5	732,5
02/01/2015	16366	34096	1264,6	369,3	8,2	718,0	16399	34164	1264,6	369,6	8,2	717,8	15931	35402	1306,4	380,1	8,2	743,2
09/01/2015	16355	34072	1252,6	360,7	8,9	696,8	16341	34045	1252,6	361,1	9,1	695,4	15870	35266	1376,8	371,8	9,2	822,8
16/01/2015	16456	34284	1330,0	349,9	9,7	797,1	16449	34269	1330,0	350,5	10,1	796,3	15919	35375	1331,0	362,2	10,4	792,7
23/01/2015	16437	34243	1319,8	342,8	8,5	776,5	16436	34242	1319,8	343,6	8,9	775,4	15853	35229	1345,0	353,0	8,4	803,1
30/01/2015	16385	34136	1296,6	335,5	9,0	776,3	16420	34209	1296,6	335,5	9,1	776,2	15907	31813	1239,8	307,1	9,3	763,0

APÊNDICE 4 – PRODUTIVIDADE (Ys) E BIOMASSA SIMULADA (Bs), PRECIPITAÇÃO (P), EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAIS (ETR), DEFICIÊNCIA HÍDRICA (DEF) E EXCEDENTE HÍDRICO (EXC), OBTIDA PARA A CULTURA DO MILHO, COM AS CULTIVARES, P30F53YH, P30R50YH E AG8041PRO, NAS DATAS DE PLANTIOS ENTRE 01/08/2012 E 30/01/2013, EM

SOCAVÃO, DISTRITO DE CASTRO – PR

Datas de Plantio	P30F53YH					P30R50YH					AG8041PRO							
	Ys ----(kg ha ⁻¹)----	Bs	P	ETR ----- (mm)-----	DEF ----- (mm)-----	EXC	Ys ----(kg ha ⁻¹)----	Bs	P	ETR ----- (mm)-----	DEF ----- (mm)-----	EXC	Ys ----(kg ha ⁻¹)----	Bs	P	ETR ----- (mm)-----	DEF ----- (mm)-----	EXC
01/08/2012	12639	28725	822,1	380,2	70,1	225,4	10383	27323	816,1	368,4	66,0	225,0	12870	26814	805,7	363,3	66,0	226,7
08/08/2012	12649	28747	830,3	384,8	63,9	228,2	10390	27343	816,1	373,4	60,9	227,1	12887	26848	815,5	367,3	60,9	228,5
15/08/2012	12639	28725	901,1	388,7	57,9	246,5	10377	27307	819,9	377,6	54,7	229,8	12876	26826	815,1	372,0	54,8	230,2
22/08/2012	12690	28840	947,7	395,8	51,0	308,7	10382	27320	868,1	382,8	49,3	237,9	12947	26973	815,7	365,2	63,3	227,7
29/08/2012	12882	29278	947,5	394,9	53,2	321,5	10506	27647	915,1	378,8	51,8	270,0	13034	25155	888,5	374,7	51,6	249,1
05/09/2012	13010	29569	981,9	400,8	44,4	332,3	10627	27965	935,3	385,0	43,6	316,5	13189	27476	932,3	379,9	43,7	299,6
12/09/2012	13237	30083	1024,3	404,8	33,8	372,8	10887	28650	978,5	392,3	33,0	336,5	13530	28187	963,5	388,3	33,1	327,2
19/09/2012	13188	29973	1080,5	408,3	26,7	402,3	10894	28669	1023,7	394,6	25,2	383,2	13540	28209	1023,7	389,7	25,3	368,1
26/09/2012	12819	29134	959,7	387,6	35,5	333,6	10527	27703	898,3	374,9	36,9	306,2	13019	27123	898,1	368,9	36,8	304,2
03/10/2012	12889	29293	989,9	384,7	33,1	358,0	10610	27922	947,7	372,9	32,1	306,1	13127	27348	897,7	367,3	31,9	308,0
10/10/2012	13010	29568	1009,1	390,1	20,4	391,9	10646	28017	989,9	379,2	18,9	363,8	13178	27454	973,7	374,9	18,9	354,2
17/10/2012	13007	29561	1007,1	387,3	17,9	398,5	10692	28138	999,7	376,5	15,7	392,4	13215	27531	990,5	372,2	15,9	390,8
24/10/2012	13036	28314	1007,1	387,3	17,9	398,5	10658	28046	810,9	366,5	15,8	222,8	13152	27401	808,7	361,8	15,8	222,8
31/10/2012	12987	29517	856,9	367,8	17,5	241,4	10582	27846	804,1	357,6	17,0	191,9	13053	27193	781,7	353,3	17,1	180,1
07/11/2012	13266	30151	852,2	369,7	13,1	266,7	10795	28409	851,0	355,2	12,2	247,7	13320	27751	838,2	351,3	12,2	238,4
14/11/2012	13475	30677	811,8	348,4	20,5	247,4	10888	28653	811,8	348,4	20,5	247,4	13433	27984	811,4	343,8	20,5	249,7
21/11/2012	13678	31087	813,0	367,0	13,4	246,9	11181	29424	810,8	352,8	9,9	249,8	13799	28749	810,6	348,4	10,1	251,7
28/11/2012	13817	31403	844,3	364,9	8,6	252,5	11277	29676	790,6	350,5	9,5	241,2	13928	29017	790,2	345,4	9,1	242,3
05/12/2012	13878	31540	926,9	362,6	5,6	342,8	11342	29846	797,3	348,6	6,5	221,9	14014	29196	791,7	343,3	6,9	214,8
12/12/2012	13867	31517	1153,7	353,1	6,4	539,1	11351	29871	895,1	342,6	6,9	322,8	14034	29238	886,3	338,5	7,5	324,5
19/12/2012	13729	31202	1153,6	342,8	10,3	590,0	11370	29921	1089,5	334,6	10,1	513,2	14073	29319	1051,3	331,0	10,3	387,2
26/12/2012	13736	31218	1270,6	344,4	8,6	709,0	11295	29724	1150,0	329,0	7,9	600,9	13933	29026	1149,0	323,9	8,0	603,0
02/01/2013	13637	30993	1137,4	380,7	12,3	538,2	11113	29244	1163,4	326,0	10,7	620,8	13726	28595	1163,4	321,2	10,0	623,4
09/01/2013	13663	31053	1112,0	373,5	14,5	529,2	11009	29050	1112,0	373,5	14,5	529,2	13346	27803	1125,8	309,4	22,4	603,8
16/01/2013	13761	31276	1086,1	372,5	15,5	504,4	10959	28840	1138,2	323,0	20,6	599,8	13542	28213	1135,2	313,3	20,4	600,3
23/01/2013	13400	30454	1185,6	349,4	9,8	611,2	11078	29153	1136,2	333,4	9,3	602,2	13694	28530	1136,0	325,4	9,1	602,8
30/01/2013	13454	30577	1327,6	357,6	5,3	733,5	11176	29410	1228,8	339,1	7,5	612,5	13819	28790	1173,2	333,4	8,0	608,1

APÊNDICE 5 – PRODUTIVIDADE (Ys) E BIOMASSA SIMULADA (Bs), PRECIPITAÇÃO (P), EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAIS (ETR), DEFICIÊNCIA HÍDRICA (DEF) E EXCEDENTE HÍDRICO (EXC), OBTIDA PARA A CULTURA DO MILHO, COM AS CULTIVARES, P30F53YH, P30R50YH E AG8041PRO, NAS DATAS DE PLANTIOS ENTRE 01/08/2013 E 30/01/2014, EM

SOCAVÃO, DISTRITO DE CASTRO – PR

Datas de Plantio	P30F53YH					P30R50YH					AG8041PRO							
	Ys ---- (kg ha ⁻¹) ----	Bs	P	ETR ----- (mm) -----	DEF ----- (mm) -----	EXC	Ys ---- (kg ha ⁻¹) ----	Bs	P	ETR ----- (mm) -----	DEF ----- (mm) -----	EXC	Ys ---- (kg ha ⁻¹) ----	Bs	P	ETR ----- (mm) -----	DEF ----- (mm) -----	EXC
01/08/2013	13421	29174	631,6	456,0	51,9	0,0	13415	29164	689,6	469,5	52,3	0,0	14136	30077	715,4	482,8	52,6	0,0
08/08/2013	13366	29057	664,0	465,8	42,0	0,0	13484	29312	727,8	479,3	43,8	0,0	14193	30197	741,4	490,2	43,1	11,5
15/08/2013	13381	29090	685,0	470,2	33,4	0,0	13569	29497	738,2	484,4	34,6	15,1	14231	30278	792,4	495,3	34,1	23,5
22/08/2013	13417	29167	684,8	472,5	29,1	0,0	13632	29635	757,8	486,7	30,8	27,1	14308	30442	792,4	496,4	31,2	47,5
29/08/2013	13317	28950	715,8	462,3	34,5	3,5	13586	29535	783,6	477,2	36,6	67,9	14273	30367	792,4	487,0	35,7	68,7
05/09/2013	13415	29163	768,6	467,7	27,4	27,2	13647	29668	789,8	478,2	28,9	79,9	14373	30581	791,6	488,9	28,7	81,1
12/09/2013	13478	29301	780,6	469,0	21,3	73,0	13759	29911	795,6	481,1	23,2	90,6	14552	30962	857,6	490,6	22,3	96,8
19/09/2013	13487	29318	742,8	464,6	19,3	54,0	13707	29795	809,8	476,2	21,0	98,5	14395	30609	809,4	479,8	23,5	66,5
26/09/2013	13511	29354	744,0	460,7	20,7	1,0	13691	29746	762,8	471,6	24,0	55,5	14395	30609	809,4	479,8	23,5	66,5
03/10/2013	13152	28554	682,4	452,6	24,7	0,0	13350	28987	747,4	463,9	25,8	35,4	14106	29978	747,8	472,7	25,7	52,3
10/10/2013	13006	28237	673,6	447,2	24,0	0,0	13158	28574	720,6	457,5	26,2	43,9	13901	29548	743,6	465,0	26,0	38,0
17/10/2013	12976	28182	707,2	446,2	20,0	40,3	13184	28633	745,4	457,4	19,9	48,7	13938	29628	756,8	465,0	19,7	60,1
24/10/2013	12950	28139	743,6	448,6	21,2	72,9	13246	28777	743,6	448,6	21,2	72,9	13994	29755	768,4	455,9	20,7	75,5
31/10/2013	12930	28086	710,0	428,4	22,2	58,8	13116	28501	788,8	436,2	24,6	91,3	13856	29468	789,8	442,8	24,4	114,5
07/11/2013	12842	27904	728,2	414,0	29,4	65,0	13066	28383	769,4	423,4	30,5	0,0	13811	29366	786,2	430,0	30,2	119,1
14/11/2013	13038	28329	764,6	414,0	19,8	120,9	13299	28885	784,8	421,9	22,0	139,8	14078	29930	797,8	429,8	21,6	137,0
21/11/2013	13183	28637	760,6	404,9	18,8	130,7	13416	29136	777,6	416,3	18,8	140,2	14231	30252	778,2	422,9	18,7	135,3
28/11/2013	13408	29125	768,2	400,9	18,2	145,8	13677	29702	780,6	411,3	18,5	145,6	14518	30866	781,6	419,2	18,3	142,1
05/12/2013	13528	29383	749,4	394,4	15,5	131,2	13782	29926	856,6	404,2	16,2	222,2	14602	31033	1007,8	411,5	16,1	256,4
12/12/2013	13378	29042	808,8	376,5	23,6	202,6	13585	29517	968,4	384,4	25,5	362,2	14329	30468	986,6	391,0	25,6	357,9
19/12/2013	13651	29662	966,2	379,0	12,6	364,6	13967	30356	987,2	387,0	14,8	379,9	14732	31336	994,8	394,2	14,9	378,4
26/12/2013	14097	30644	978,6	371,2	10,4	385,8	14359	31214	1002,8	378,7	12,7	390,5	15123	32176	1003,2	385,0	12,4	396,5
02/01/2014	14139	30737	957,6	354,1	18,6	379,7	14396	31295	1029,8	363,9	21,4	446,0	15119	32168	1030,0	371,4	21,4	441,4
09/01/2014	14266	31014	1004,8	343,9	25,3	440,9	14469	31455	1084,4	354,0	28,4	459,8	15164	32263	1085,2	362,3	27,8	500,8
16/01/2014	13936	30296	1023,0	325,7	34,1	444,9	13955	30337	1075,0	338,4	34,5	476,8	14717	31313	1095,8	346,4	34,4	498,6
23/01/2014	13899	30216	1058,4	324,9	29,0	477,5	13955	30337	1090,2	335,8	29,7	530,5	14604	31073	1090,4	343,5	29,8	529,5
30/01/2014	14090	30630	1084,4	333,6	17,7	531,2	13509	29350	790,8	446,2	25,9	101,4	14868	31634	1182,6	351,5	19,0	574,6

ANEXO 1 – CLASSES TEXTURAIS E VALORES MÉDIOS DA UMIDADE VOLUMÉTRICA NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE (θ_{PMP}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (θ_{CC}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA SATURAÇÃO (θ_{SAT}) E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA EM TRÊS CAMADAS DE SOLO DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC EM ARAPOTI, CASTRO, SOCAVÃO E PONTA GROSSA, ESTADO DO PARANÁ, E ITABERÁ, ESTADO DE SÃO PAULO

Local	Camada (m)	Classe Textural	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{SAT}	K_{sat}
			-----	(m ³ m ⁻³)	-----	(mm dia ⁻¹)
Arapoti	0,0 - 0,10	Franco argilo - arenoso	0,15	0,34	0,49	1394,86
Arapoti	0,10 - 0,25	Franco argilo - arenoso	0,15	0,3	0,47	1268,41
Arapoti	0,25 - 0,40	Franco argilo - arenoso	0,16	0,3	0,49	1124,48
Castro	0,0 - 0,10	Argiloso	0,36	0,5	0,63	418,32
Castro	0,10 - 0,25	Argiloso	0,33	0,47	0,6	368,32
Castro	0,25 - 0,40	Muito argiloso	0,32	0,45	0,62	325,74
Itaberá	0,0 - 0,10	Argiloso	0,28	0,4	0,55	516,46
Itaberá	0,10 - 0,25	Argiloso	0,24	0,37	0,54	462,25
Itaberá	0,25 - 0,40	Argiloso	0,22	0,37	0,54	420,37
Ponta Grossa	0,0 - 0,10	Argilo - arenoso	0,2	0,39	0,51	743,27
Ponta Grossa	0,10 - 0,25	Argilo - arenoso	0,2	0,35	0,5	732,57
Ponta Grossa	0,25 - 0,40	Argilo - arenoso	0,25	0,36	0,54	636,3
Socavão	0,0 - 0,10	Argiloso	0,28	0,43	0,57	335,96
Socavão	0,10 - 0,25	Muito argiloso	0,27	0,41	0,59	351,07
Socavão	0,25 - 0,40	Muito argiloso	0,24	0,4	0,59	355,54

FONTE: Adaptado de Piekarski (2016).