

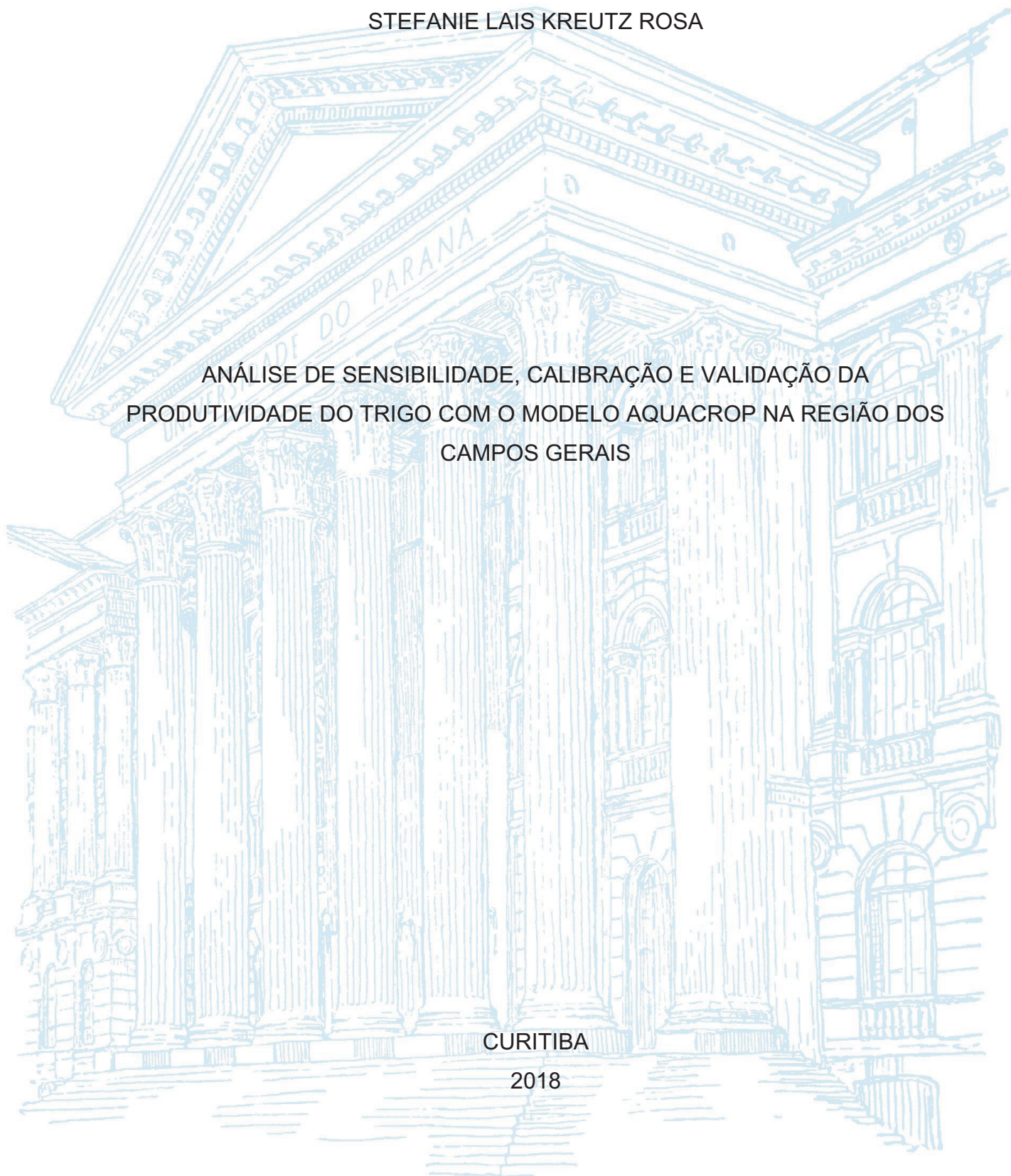
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

STEFANIE LAIS KREUTZ ROSA

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DA
PRODUTIVIDADE DO TRIGO COM O MODELO AQUACROP NA REGIÃO DOS
CAMPOS GERAIS

CURITIBA

2018



STEFANIE LAIS KREUTZ ROSA

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DA
PRODUTIVIDADE DO TRIGO COM O MODELO AQUACROP 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.

Co-orientador: Dr. Rodrigo Yoiti Tsukahara.

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

R788a Rosa, Stefanie Lais Kreutz
Análise de sensibilidade, calibração e validação da
produtividade do trigo com o modelo Aquacrop na região dos
Campos Gerais / Stefanie Lais Kreutz Rosa. - Curitiba, 2018.
147 p.: il.

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. Trigo - Métodos de simulação. 2. Produtividade agrícola. 3.
Triticum. 4. Cultivo agrícola - Rendimento. I. Souza, Jorge Luiz
Moretti de. II. Tsukahara, Rodrigo Yoiti. III. Título. IV.
Universidade Federal do Paraná.

CDU 633.111

TERMO DE APROVAÇÃO



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS DO SOLO

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **STEFANIE LAIS KREUTZ ROSA** intitulada: **Análise de sensibilidade, calibração e validação da produtividade do trigo com o modelo Aquacrop na região dos Campos Gerais**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 31 de Agosto de 2018.

JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

BRUNO CÉSAR GURSKI

Avaliador Externo (FERTIPAR)

RODRIGO YORN TSUKAHARA

Avaliador Externo (FUNDABC)

JOÃO CARLOS BEZPALHOK FILHO

Avaliador Externo (UFPR)

AGRADECIMENTOS

- À Deus, pelo dom da vida;
- Aos meus pais Leocir e Eliane, e minha irmã Letícia, pelo apoio e carinho em todos os momentos;
- À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade em realizar o Mestrado em Ciência do Solo, fornecendo todo suporte necessário para a realização das atividades requeridas durante estes dois anos;
- Ao meu orientador e amigo, Professor Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, por estender a mão no momento que precisei e por toda ajuda, ensinamentos e conselhos a mim concedidos durante este período;
- A Fundação ABC Pesquisa e Desenvolvimento Agropecuário, em especial ao Dr. Rodrigo Yoiti Tsukahara, coordenador do Setor de Agrometeorologia, e ao pesquisador Edson Giovanni Kochinski, pela cordialidade e fornecimento dos dados necessários e das amostras de solo;
- Ao Departamento de Solos e Engenharia Agrícola pela infraestrutura, funcionários, e ao corpo docente da Instituição que contribuíram com agregação de conhecimento relacionado a diversas áreas;
- Aos colegas que direta ou indiretamente auxiliaram na conclusão desta dissertação, em especial à amiga Aline Aparecida dos Santos.

RESUMO

A utilização de modelos computacionais para estimar o rendimento de cultivos agrícolas contribui significativamente na adoção de alternativas de plantio e manejo de culturas. A principal vantagem da utilização da modelagem na agricultura está relacionada ao planejamento da safra antes da implantação a campo, sendo possível ajustar técnicas para melhorar o rendimento final. Além disso, o uso dos modelos consolidados dispensam experimentos com práticas a campo, que demandam tempo relativamente longo. Porém, sua utilização muitas vezes apresenta certa complexidade. A principal limitação consiste na disponibilidade dos dados de entrada, os quais geralmente são de difícil obtenção e custo elevado, exigindo do usuário conhecimento detalhado para compreensão da funcionalidade do modelo. Na busca por solucionar limitações, a *Food and Agriculture Organization* desenvolveu o modelo de cultivo AquaCrop. A consolidação do modelo AquaCrop deve-se ao menor número de parâmetros e variáveis de entrada necessárias, as quais requerem métodos simples de determinação. O programa é composto por parâmetros conservativos e não conservativos. O AquaCrop é atualmente muito utilizado para diversas culturas e localidades, porém sua utilização no cenário brasileiro ainda é limitada, principalmente com a cultura do trigo. Com isso, teve-se por objetivo no presente trabalho determinar atributos físico-hídricos de três tipos de solos, para realizar a análise de sensibilidade, calibrar e validar o modelo AquaCrop para a cultura do trigo, nas condições edafoclimáticas da região dos Campos Gerais, Estados do Paraná e São Paulo. O trabalho foi estruturado em três capítulos, sendo: i) O Capítulo I consistiu em avaliar os atributos físico-hídricos dos solos de Arapoti e Ponta Grossa, Estado do Paraná, e Itaberá, Estado de São Paulo. Para tal, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas em três camadas de solo. Os valores médios dos atributos obtidos para Itaberá e Ponta Grossa foram inseridos no programa AquaCrop; ii) No Capítulo II foram realizadas análises de sensibilidade dos parâmetros do AquaCrop para a cultura do trigo. Os dados de clima foram provenientes das estações agrometeorológicas de Castro e Ponta Grossa, Estado do Paraná, e Itaberá, Estado de São Paulo. Os dados das culturas foram provenientes dos protocolos de dados da Fundação ABC e da literatura. Os dados de solo foram obtidos em análise laboratorial para Itaberá e Ponta Grossa e de um estudo anterior para Castro. Parâmetros referentes ao manejo do solo foram selecionados das opções do programa, considerando condições não limitantes ao crescimento e desenvolvimento da cultura. As análises de sensibilidade foram realizadas para a cultivar TBIO Sinuelo, nas três localidades, no ano agrícola de 2014; iii) Com os parâmetros mais sensíveis obtidos foi realizado o Capítulo III, que consistiu na calibração e validação do AquaCrop para a cultura do trigo. Na calibração, verificou-se a impossibilidade de se estabelecer um único valor para cada parâmetro. Os coeficientes de determinação (r^2) e índice "d" obtidos apresentaram excelentes resultados, com perfeita correlação positiva para todas as cultivares e localidades. A validação apresentou desempenhos variando entre "péssimo" a "ótimo", indicando a necessidade de mais experimentos e ausência de períodos de estiagem para as simulações.

Palavras-chave: Modelagem, relações hídricas, cultivo agrícola, desempenho, *Triticum aestivum*.

ABSTRACT

The use of computational models to estimate the agricultural crop yield contributes significantly to the adoption of planting alternatives and crop management. The main advantage of modeling in agriculture is related to the crop planning before field deployment, and it is possible to adjust techniques to improve final yield. In addition, the use of consolidated models dispenses experiments with field practices, which require relatively long time. However, the use often presents a certain complexity. The main limitation is the availability of input data, which are usually difficult to obtain and costly, requiring the user have knowledge detailed to understand the model functionality. In seeking solutions to these limitations, the *Food and Agriculture Organization* developed the AquaCrop cultivation model. The consolidation of AquaCrop model is related to the smaller number of parameters and input variables, which require simple methods for determination. The program is composed of conservative and non-conservative parameters. AquaCrop is currently widely used for various crops and localities, but in the Brazilian scenario is still limited, mainly with wheat. The aim of this study was to determine the physical and hydraulic properties of three types soils, to perform the sensitivity analysis, calibrate and validate the AquaCrop model for wheat crop, under the edaphoclimatic conditions in the Campos Gerais region, States of Parana and São Paulo. The work was structured in three chapters: *i)* The Chapter I consisted to determine the physical and hydraulic properties of the soils in Arapoti and Ponta Grossa, Paraná State, and Itaberá, São Paulo State. For this, disturbed and undisturbed soil samples were collected in three soil layers. The average values of the soil attributes obtained for Itaberá and Ponta Grossa were inserted in the AquaCrop program; *ii)* In Chapter II, sensitivity analyzes of AquaCrop parameters for wheat crop were carried out. The climate data were obtained from the Agrometeorological stations of Castro and Ponta Grossa, Paraná State, and Itaberá, São Paulo State. The crop data were obtained from the ABC Foundation protocols and from the literature. Soil data were obtained in laboratory analysis for Itaberá and Ponta Grossa and an earlier study for Castro. Parameters related to soil management were selected from the program options, considering non-limiting conditions to the crop growth and development. The sensitivity analyzes were carried out for TBIO Sinuelo cultivar, in the three localities in the agricultural year of 2014; *iii)* With the most sensitive parameters obtained the Chapter III were realized, which consisted in the calibration and validation of AquaCrop for wheat crop. In the calibration it was verified the impossibility of establishing a single value for each parameter. The determination (r^2) and “*d*” index coefficients obtained presented an excellent result, with a perfect positive correlation for all cultivars and localities. The validation presented performances ranging from “poor” to “optimum”, indicating demand of more experiments and absence of drought periods for the simulations.

Keywords: Modeling, water relations, crop cultivation, performance, *Triticum aestivum*.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	10
1.1	REFERÊNCIAS	19
2	CAPÍTULO I – ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE SOLOS DOS CAMPOS GERAIS SOB SISTEMA DE PLANTIO DIRETO	23
2.1	RESUMO	23
2.2	ABSTRACT	24
2.3	INTRODUÇÃO	25
2.4	MATERIAL E MÉTODOS	29
2.4.1	Descrição das áreas	29
2.4.2	Coleta e análise das amostras	30
2.4.2.1	Amostras deformadas	30
2.4.2.2	Amostras indeformadas	31
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
2.5.1	Textura do solo	34
2.5.2	Massa específica do solo ou densidade aparente (ρ_s)	35
2.5.3	Massa específica das partículas do solo ou densidade real (ρ_{ps})	36
2.5.4	Porosidade total, macroporosidade e microporosidade	37
2.5.5	Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível	40
2.5.6	Correlações entre os atributos físico-hídricos avaliados	45
2.6	CONCLUSÕES	47
2.7	REFERÊNCIAS	48
3	CAPÍTULO II – SENSIBILIDADE DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DO TRIGO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, PARANÁ.....	54
3.1	RESUMO	54
3.2	ABSTRACT	55
3.3	INTRODUÇÃO	56
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	58
3.4.1	Caracterização da área de estudo	58
3.4.2	Descrição do modelo AquaCrop	59
3.4.3	Análise de sensibilidade	64
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
3.5.1	Fenologia da cultura	65
3.5.2	Transpiração da cultura	70
3.5.3	Produção de biomassa e formação de rendimento	72
3.5.4	Estresse	74
3.5.4.1	Resposta ao estresse hídrico	74
3.5.4.2	Resposta ao estresse pelo ar	75
3.5.5	Manejo do solo	75
3.6	CONCLUSÕES	76
3.7	REFERÊNCIAS	76

4	CAPÍTULO III – CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP NA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO TRIGO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, BRASIL	81
4.1	RESUMO	81
4.2	ABSTRACT	82
4.3	INTRODUÇÃO	83
4.4	MATERIAL E MÉTODOS	85
4.4.1	Descrição da área de estudo	85
4.4.2	Modelo AquaCrop e dados necessários	86
4.4.2.1	Dados de clima, cultura e manejo	86
4.4.2.2	Dados de solo	87
4.4.3	Parametrização do modelo AquaCrop	88
4.4.4	Calibração modelo AquaCrop	89
4.4.5	Validação do modelo AquaCrop	91
4.4.6	Análises estatísticas dos dados	91
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
4.5.1	Calibração dos parâmetros do AquaCrop	93
4.5.2	Validação dos parâmetros do AquaCrop	99
4.6	CONCLUSÕES	106
4.7	REFERÊNCIAS	106
5	CONCLUSÕES GERAIS	111
6	CONSIDERAÇÕES GERAIS	112
7	REFERÊNCIAS GERAIS	113
	APÊNDICE 1 – DETERMINAÇÃO DA TEXTURA DO SOLO COM O MÉTODO DO HIDRÔMETRO DE BOUYOUCOS (1951)	128
	APÊNDICE 2 – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DO SOLO COM O MÉTODO DO BALÃO VOLUMÉTRICO MODIFICADO (Adaptado de Gubiani et al., 2006)	130
	APÊNDICE 3 – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO SOLO COM O MÉTODO DO ANEL VOLUMÉTRICO (Adaptado de Embrapa, 1997)	132
	APÊNDICE 4 – DETERMINAÇÃO DA UMIDADE NA CAPACIDADE DE CAMPO COM O MÉTODO DA MESA DE TENSÃO, PARA OBTENÇÃO DA MICROPOROSIDADE DO SOLO (Adaptado de Embrapa, 1997)	133
	APÊNDICE 5 – DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO, COM O MÉTODO DE CARGA DECRESCENTE (Adaptado de Reynolds e Elrick 2002)	135
	APÊNDICE 6 – ATRIBUTOS FÍSICOS HÍDRICOS OBTIDOS PARA AS LOCALIDADES DE ARAPOTI, ITABERÁ E PONTA GROSSA	137
	APÊNDICE 7 – SÉRIE TEMPORAL DOS DADOS CLIMÁTICOS DAS LOCALIDADES DE CASTRO-PR, ITABERÁ-SP E PONTA GROSSA-PR, INSERIDOS NO AQUACROP PARA REALIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	140
	APÊNDICE 8 – ASPECTOS AGRONÔMICOS DA CULTURA DO TRIGO ...	143

1 INTRODUÇÃO GERAL

A interação existente entre as plantas e o ambiente que as envolve é constituída por processos físicos, químicos e biológicos de elevada complexidade. Para que se possa obter resultado satisfatório de um sistema cultivado é necessário o entendimento destas interações. Para auxiliar na obtenção do melhor conhecimento, modelos de simulação são cada vez mais desenvolvidos e utilizados. São ferramentas para investigar os efeitos interativos de fatores abióticos, compostos por uma série de parâmetros de entrada (Waha et al., 2015). Os modelos auxiliam no entendimento do comportamento de uma cultura agrícola, bem como no desenvolvimento de estratégias adaptativas em cenários distintos (Soares, 2011; Nuttall et al., 2018).

O rendimento máximo de uma cultura depende de condições ideais de crescimento. Para que isso ocorra é necessário conhecer todas as variáveis que compõe o sistema de produção, bem como suas exigências climáticas. A obtenção das informações com práticas a campo demanda período de tempo relativamente longo, pois há necessidade de ensaios por vários anos para obtenção de resultados consistentes. Assim, apesar da complexidade envolvida na construção, os modelos de produção apresentam-se como ferramenta imprescindíveis na realização de simulações, permitindo: analisar grande quantidade de informações; facilitar a aplicação de conhecimentos; gerar resultados em curto prazo e baixo custo; auxiliar pesquisadores e administradores na definição de políticas agrícolas, mediante a realização de zoneamento agroclimático, estudo de mudanças climáticas e planejamento de produção (Cardoso et al., 2004; Andrade et al., 2015; Christensen et al., 2018).

Para aumentar a confiança e reduzir as incertezas do modelo, os parâmetros devem ser submetidos ao processo de calibração (Angulo et al., 2013; He et al., 2017). A calibração consiste em ajustar o valor dos parâmetros de entrada para que os resultados simulados do programa se assemelhem ao máximo aos reais observados a campo. Já o processo de validação considera a qualidade dos dados de saída (Van Vliet et al., 2016), indicando se a calibração foi adequada nas condições estudadas. Em modelos de simulação agrícola, as safras utilizadas na calibração e validação devem ser distintas.

Mesmo sendo alternativa rápida e precisa, a utilização de modelos de simulação é complexa. A principal limitação consiste no levantamento ou disponibilidade dos dados de entrada, que na maioria das vezes são de difícil obtenção e custo elevado. Buscando a solução das limitações, bem como alcançar o equilíbrio entre precisão, simplicidade e robustez, o modelo de cultivo denominado AquaCrop foi desenvolvido por pesquisadores vinculados à *Food and Agriculture Organization* (FAO).

Por ser direcionado pelo balanço hídrico do solo (Raes et al., 2011; Steduto et al., 2012; Raes et al., 2018), o AquaCrop descreve as interações planta-solo e simula o rendimento de culturas herbáceas, sendo particularmente adequado para abordar condições em que a água é fator limitante na produção agrícola (Steduto et al., 2012; Raes, 2017). O modelo calcula o balanço hídrico diário e separa a evapotranspiração em componentes de evaporação e transpiração (Jin et al., 2014; Raes et al., 2018). O balanço hídrico agrícola do AquaCrop é contabilizado pelo: *i*) armazenamento de água no solo na zona radicular, o qual compreende a umidade do solo e profundidade efetiva do sistema radicular; *ii*) drenagem profunda; *iii*) escoamento superficial; *iv*) infiltração de água no solo; *v*) ascensão capilar; *vi*) evaporação do solo; e, *vii*) transpiração da cultura. A descrição detalhada do balanço hídrico no AquaCrop pode ser encontrada no estudo de Gurski (2018).

O AquaCrop considera a disponibilidade de água para a cultura e relaciona a produção de biomassa com a transpiração da cultura com o parâmetro de produtividade da água (Vanuytrecht al., 2011). O programa também considera poucos parâmetros e variáveis de entrada, requerendo métodos simples para sua determinação (Alencar, 2014; Toumi et al., 2016).

A literatura dispõe de diversos modelos utilizados para avaliar a produção agrícola. Os principais estão descritos em Oliveira (2017), incluindo seus respectivos componentes, limitações e aplicações. Em um modelo robusto é necessário que os dados de saída reflitam as respostas das plantas aos principais estresses abióticos. Assim, muitos modelos abordam fatores que influenciam as mudanças climáticas, como concentração de CO₂ na atmosfera, disponibilidade hídrica, temperatura, entre outros. No entanto, são poucos os modelos que consideram a temperatura na fase reprodutiva e no enchimento dos grãos de trigo (Nuttall et al., 2018). O AquaCrop possui valores pré-estabelecidos de máxima e mínima temperatura do ar para

ocasionar falha na polinização da cultura do trigo, sendo um diferencial para a estimativa de rendimento (Raes et al., 2017).

O AquaCrop progrediu da função de produção empírica de Doorenbos e Kassam (1979) (Equação 1.1) usada para avaliar a resposta do rendimento da cultura à água, em que a evapotranspiração da cultura (ET_c) é fundamental no cálculo da produtividade (Y):

$$\left(1 - \frac{Y_r}{Y_p}\right) = K_y \cdot \left(1 - \frac{ER}{ET_c}\right) \quad (1.1)$$

Sendo: Y_r – produtividade real estimada para a cultura no local (kg ha^{-1}); Y_p – produtividade potencial da cultura na região (kg ha^{-1}); ER – evapotranspiração real da cultura no ciclo (mm ciclo^{-1}); ET_c – evapotranspiração da cultura no ciclo (mm ciclo^{-1}); k_y – coeficiente de penalização hídrica da produtividade por déficit no ciclo da cultura (adimensional) (Steduto et al., 2012; Raes et al., 2018).

Baseado na equação de Doorenbos e Kassam (1979) o AquaCrop progrediu em duas etapas (Equações 2 e 3): *i*) Separação da evapotranspiração da cultura (ET) em transpiração da cultura (Tr) e evaporação do solo (E); e, *ii*) Rendimento final (Y) em função da biomassa final (B) e do índice de colheita (HI) (Raes et al., 2018):

$$ET = E + Tr \quad (1.2)$$

$$Y = HI \cdot B \quad (1.3)$$

Sendo: ET – Evapotranspiração atual (mm); E – Evaporação do solo (mm); Tr – transpiração da cultura (mm); Y – produtividade da cultura (kg ha^{-1}); HI – Índice de colheita (adimensional); B – biomassa acumulada (kg m^{-2}) (Steduto et al., 2012; Raes et al., 2018).

O AquaCrop separa a evapotranspiração (ET) em componentes da transpiração da cultura (Tr) e evaporação do solo (E), evitando o efeito confuso que pode gerar com o consumo não produtivo da água (E). A separação é importante principalmente durante a cobertura incompleta do solo, que ocorre no início do estabelecimento da cultura ou condições de plantio esparço. A separação de rendimento final (Y) em biomassa final (B) e índice de colheita (HI) permite a distinção das relações funcionais básicas entre ambiente e biomassa final (B),

daquelas entre ambiente e índice de colheita (*HI*) (Raes et al., 2018). As relações são fundamentalmente diferentes e levaram ao desenvolvimento da equação baseada no núcleo do mecanismo de crescimento do AquaCrop (Equação 1.4). A robustez do AquaCrop por meio da evolução da Equação 1.1 para a Equação 1.4 deve-se ao conservadorismo do parâmetro de produção pela água (*WP*).

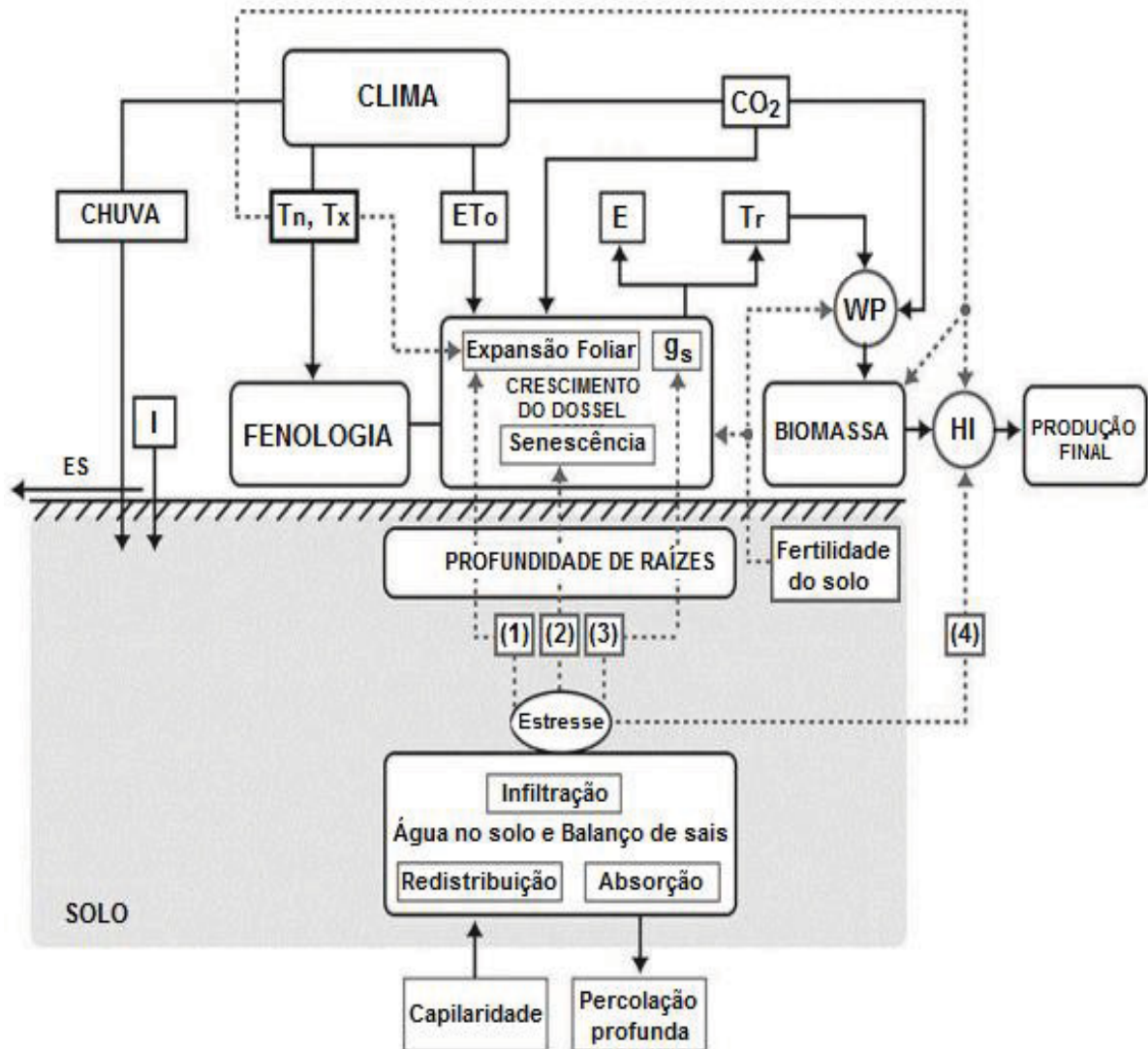
$$B = WP \cdot \sum Tr \quad (1.4)$$

Sendo: *B* – biomassa acumulada (kg m^{-2}); *WP* – parâmetro de produção pela água ($\text{kg m}^{-2} \text{mm}^{-1}$); *Tr* – transpiração da cultura (mm) (Steduto et al., 2012; Raes et al., 2018).

Assim como outros modelos, o AquaCrop também dispõe de componentes que facilitam o entendimento da relação solo-planta-atmosfera, auxiliando na sua funcionalidade e precisão, sendo: *i*) Solo, com seu balanço hídrico; *ii*) Cultura, com seus processos de desenvolvimento, crescimento e rendimento; *iii*) Atmosfera, com seu regime térmico, precipitação, demanda evaporativa e concentração de CO_2 ; e, *iv*) Manejo do solo, incluindo práticas como irrigação, fertilização, cobertura vegetal residual, plantas infestantes, entre outras, as quais afetam o balanço hídrico agrícola, desenvolvimento e rendimento final das culturas. O AquaCrop é capaz de simular o crescimento de culturas em cenários envolvendo condições climáticas distintas. Porém, os fatores relacionados a insetos-pragas e doenças não são considerados. As relações funcionais entre os diferentes componentes do modelo estão apresentados na FIGURA 1.1.

O AquaCrop também fornece o balanço geral das condições que envolvem e afetam o desenvolvimento da cultura, refletindo nos valores de rendimento final da cultura (FIGURA 1.2).

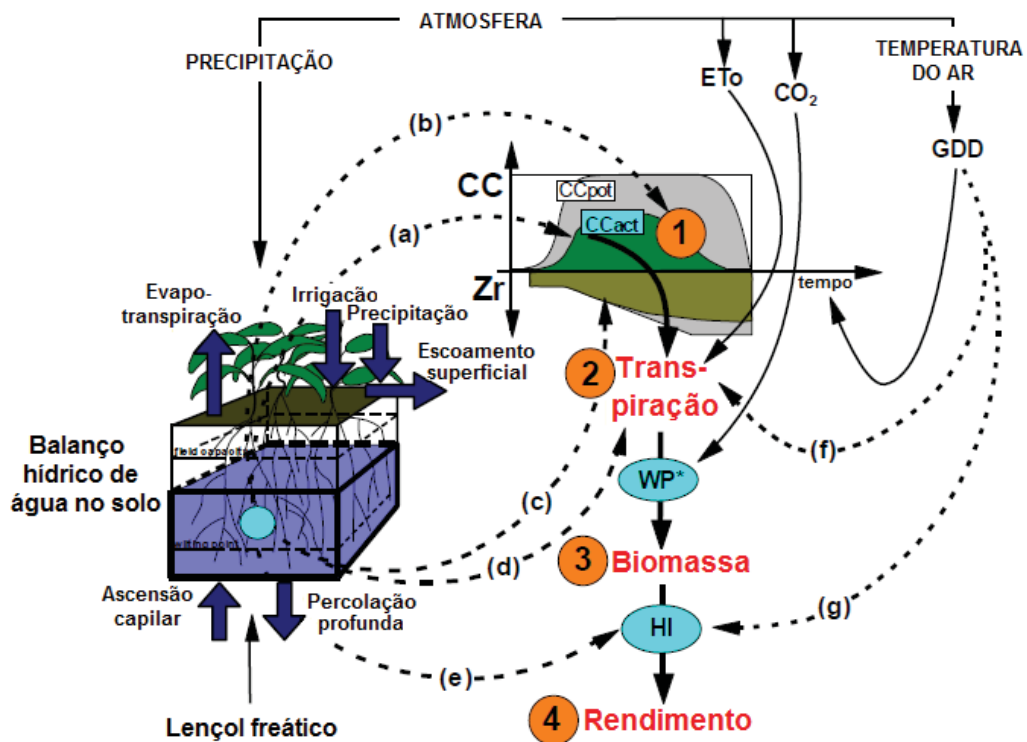
FIGURA 1.1 – FLUXOGRAMA DO MODELO AQUACROP INDICANDO OS PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA, OS PARÂMETROS RELACIONADOS À FENOLOGIA, COBERTURA DO DOSEL, TRANSPIRAÇÃO, PRODUÇÃO DE BIOMASSA E PRODUTIVIDADE FINAL.



LEGENDA: I – irrigação (mm); T_n – temperatura mínima do ar ($^{\circ}C$); T_x – temperatura máxima do ar ($^{\circ}C$); ET_o – evapotranspiração de referência ($mm\ dia^{-1}$); E – evaporação do solo (mm); Tr – transpiração da cultura (mm); g_s – condutância estomática ($m\ s^{-1}$); WP – parâmetro de produção pela água ($g\ m^{-2}$); HI – índice de colheita (adimensional); CO_2 – concentração de dióxido de carbono na atmosfera (ppm); (1), (2), (3), (4) – Resposta ao estresse hídrico para expansão foliar, senescência, condutância estomática e índice de colheita, respectivamente. Linhas contínuas indicam ligações diretas e linhas tracejadas indicam efeito retroativo.

FONTE: Adaptado de Raes et al. (2018).

FIGURA 1.2 – DINÂMICA DA RESPOSTA DA CULTURA AO ESTRESSE HÍDRICO SIMULADA NO AQUACROP



LEGENDA (setas pontilhadas indicam os processos afetados pelo estresse hídrico), sendo: CC – cobertura simulada do dossel ($m^2 m^{-2}$); CC_{pot} – cobertura potencial do dossel ($m^2 m^{-2}$); Z_r – profundidade do sistema radicular (m); ET_0 – evapotranspiração de referência ($mm dia^{-1}$); GDD – graus dia de desenvolvimento ($^{\circ}C dia^{-1}$); WP^* – Produtividade da cultura pela água ($kg m^{-2} mm^{-1}$); e, HI – índice de referência (%) (Raes et al., 2018).

FONTE: Adaptado de Raes et al. (2018).

O AquaCrop é constituído basicamente por dois grupos de parâmetros:

i) Grupo conservativo, em que os parâmetros permanecem constantes em diferentes condições de cultivo e regime hídrico, não alterando com a escala temporal, práticas de manejo, clima ou localização geográfica. São parâmetros considerados conservadores por basearem-se em análises conceituais e teóricas e em dados empíricos, demonstrando quase constância de resultados. Seus valores foram atribuídos considerando experimentos com cultivares de alto potencial produtivo, sob condições ideais de crescimento e desenvolvimento. Em algumas circunstâncias e, dependendo da série de dados usada para a calibração, os parâmetros conservativos podem necessitar de pequenos ajustes para a obtenção de resultados satisfatórios. Os parâmetros do grupo conservativo estão relacionados à fenologia

da cultura, como: temperatura de base e temperatura superior para graus dias de desenvolvimento; tamanho da copa da plântula com 90% de emergência (CC_o); coeficiente de crescimento (CGC) e declínio do dossel (CDC); determinação da cultura ligada ou não à floração; excesso de frutos potenciais; transpiração (coeficiente de declínio da cultura como resultado de idade, deficiência, entre outros), produção de biomassa e formação do rendimento (produtividade da água normalizada para ET_o e CO_2 ; coeficiente de redução que descreve o efeito dos produtos sintetizados durante a formação do rendimento; e, índice de colheita de referência HI_o), e parâmetros relacionados ao estresse hídrico e térmico (Hsiao et al., 2009; Steduto et al., 2012; Raes et al., 2017; Raes et al., 2018); e,

ii) Os parâmetros não conservativos, que são específicos da cultivar, os quais podem requerer ajustes para a cultivar em estudo e condições ambientais de cultivo. São afetados pelo plantio as práticas de manejo, condições de solo e clima. Envolvem a fenologia (tempo até a floração ou início da formação do rendimento; comprimento do estágio de floração; tempo de início da senescência do dossel; e, duração do ciclo fenológico), práticas de manejo (densidade de plantas; tempo até 90% da emergência de plântulas; e, cobertura máxima do dossel), parâmetros dependentes do solo (profundidade máxima de raízes e tempo até atingir a profundidade máxima de enraizamento) e parâmetros dependentes do manejo do solo (fertilidade e estresse por salinidade). O índice de colheita de referência (HI_o) é geralmente considerado parâmetro conservador para cultivares de alto rendimento. Porém, em alguns casos, é um parâmetro que pode ser ajustado (Steduto et al., 2012; Raes et al., 2017; Raes et al., 2018).

Por se tratar de modelo de estimativa de produtividade que inclui precisão, simplicidade e robustez, o AquaCrop é atualmente muito utilizado para diversas culturas nas mais variadas localidades do mundo. Sua utilização busca determinar a melhor época de plantio, fornecendo o máximo rendimento em função das condições do ambiente que envolve a cultura, bem como a necessidade e eficiência do uso da água. Até o presente momento, o modelo já foi estudado para diversas culturas: Farahani et al. (2009) e Garcia-Vila et al. (2009) estudaram o modelo para a cultura do algodão sob regimes de irrigação completa e deficitária na Síria e Espanha; Geerts et al. (2009), Heng et al. (2009) e Todorovic et al. (2009) aplicaram o AquaCrop para avaliar o efeito de mudanças na quantidade de água de irrigação

para quinoa, milho e girassol, respectivamente; Bitri e Grazhdani (2015) calibraram e validaram o modelo para obter o rendimento de tubérculos e biomassa sob irrigação total e deficitária de beterraba açucareira, no sudeste da Albânia; Mirsafi et al. (2016) simularam o crescimento e rendimento de açafrão no Irã.

Há também muitos dados na literatura com a utilização do modelo AquaCrop para a cultura do trigo em diversos cenários climáticos. Jin et al. (2014) validaram o modelo para simular os efeitos de data de plantio e cenários de irrigação na cobertura do dossel, rendimento de biomassa e grãos, e uso eficiente da água para a cultura na Planície Norte da China; Salemi et al. (2011) e Mohammadi et al. (2016) simularam o rendimento de grãos de trigo de inverno no Irã com o AquaCrop; Bouazzama et al. (2017) calibraram e validaram o AquaCrop sob diferentes regimes hídricos no Marrocos; e, Pareek et al. (2017) também calibraram e validaram o AquaCrop para o trigo na Índia. Porém, pesquisas comprovando a eficiência do AquaCrop para simular o rendimento da cultura do trigo no cenário brasileiro ainda são escassas, destacando-se até o presente momento apenas o estudo de Rosa et al. (2018).

Os modelos que simulam o crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas agrícolas têm tido bastante aplicação, pois visam evitar perdas de produtividade a campo. São programas muito recomendados para estimar o rendimento em locais de alta produção agrícola, como o caso dos Campos Gerais, nos Estados do Paraná e São Paulo, que se destacam por apresentar produtividade de grãos acima da média agrícola nacional (Shimandei et al., 2008). O IBGE (2015) indica que a região dos Campos Gerais se destaca na produção de culturas como a aveia, cevada, milho, soja e trigo.

Nos Campos Gerais do Paraná situa-se a Fundação ABC, uma instituição privada que realiza pesquisa aplicada, projetos de pesquisa com empresas privadas e possui vínculo com instituições públicas (Fundação ABC, 2018). A Fundação ABC dispõe de séries de dados históricos de safras agrícolas, os quais são utilizados em diversos projetos de pesquisa.

Analisando a capacidade produtiva da região Norte Pioneira do Paraná, aliado a dados históricos de safras agrícolas provenientes da Fundação ABC, inúmeros trabalhos envolvendo a água, com a finalidade de verificar a produtividade de culturas já foram conduzidos e publicados. Dentre eles, destaca-se: Araujo (2011)

testou modelos água-cultura para estimar a produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa; Scheraiber (2012) calculou as componentes do balanço hídrico, analisou suas tendências e probabilidades, elaborou uma matriz e identificou os valores de índice de satisfação das necessidades de água para as culturas da soja e algodão, em Ponta Grossa; Gonçalves e Rocha (2016) analisaram a relação dos indicadores de qualidade de água com o regime de chuvas e os padrões de uso de terra em quatro bacias hidrográficas, e suas respectivas áreas de preservação permanente na bacia hidrográfica da represa de Alagados, na região dos Campos Gerais; Piekarski et al. (2016) testou o modelo AquaCrop para simular a produtividade da soja em três tipos de solo; e, Oliveira (2017) simulou a produtividade de milho também com o modelo AquaCrop nos Campos Gerais.

O modelo AquaCrop já se mostrou viável na simulação do rendimento de diversas culturas sob diferentes condições edafoclimáticas. Porém, sua utilização no Brasil ainda é escassa, principalmente para a cultura do trigo. Para o modelo simular com precisão o rendimento final é necessário que os parâmetros referentes aos atributos físico-hídricos do solo em questão sejam inseridos baseando-se em resultados reais, analisados em laboratório. Neste sentido, teve-se por objetivo geral no presente trabalho determinar atributos físico-hídricos de três tipos de solos, para realizar a análise de sensibilidade, calibrar e validar o modelo AquaCrop para a cultura do trigo, nas condições edafoclimáticas da região dos Campos Gerais, Estados do Paraná e São Paulo.

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

Capítulo I – Atributos físico-hídricos de solos dos Campos Gerais sob sistema de plantio direto;

Capítulo II – Sensibilidade do modelo AquaCrop para a cultura do trigo na Região dos Campos Gerais, Paraná;

Capítulo III – Calibração e validação do modelo AquaCrop na simulação da produtividade do trigo na Região dos Campos Gerais, Brasil.

1.1 REFERÊNCIAS

- ALENCAR, L. P. **Parametrização e validação do modelo aquacrop para a cultura da cana-de-açúcar**. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2014.
- ANDRADE, A. S.; SANTOS, P. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; ARAUJO, L. C.; PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S; MARIN, F. R.; LARA, M. A. S. Simulating tropical forage growth and biomass accumulation: an overview of model development and application. **Grass and Forage Science**, v. 1, p. 1-12, abr. 2015.
- ANGULO, C.; RÖTTER, R.; LOCK, R.; ENDERS, A.; FRONZEK, S.; EWERT, F. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 170, p. 32-46, 2013.
- ARAUJO, M. A.; SOUZA, J. L. M. de; TSUKAHARA, R. Y. Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 23-31, 2011.
- BITRI, M.; GRAZHDANI, S. Validation of AquaCrop model in the simulation of sugar beet production under different water regimes in southeastern Albania. **International Journal of Engineering Science and Innovative Technology**, v. 4, n. 6, p. 171-181, nov. 2015.
- BOUAZZAMA, B.; KARROU, M.; BOUTFIRASS, M.; BAHRI, A. Assessment of Aquacrop model in the simulation of durum wheat (*Triticum aestivum* L.) growth and yield under different water regimes. **Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires**, v. 5, n. 3, p. 222-230, mar. 2017.
- CARDOSO, C.; FARIA, F. T.; FOLEGATTI, M. V. Aplicação do modelo CERES-maize na análise de estratégias de irrigação para milho “safrinha” em Londrina-PR. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 37-45, jan./abr. 2004.
- CHRISTENSEN, A. J.; SRINIVASAN, V.; HART, J. C.; MARSHALL-COLON, A. Use of computational modeling combined with advanced visualization to develop strategies for the design of crop ideotypes to address food security. **Nutrition reviews**, v. 76, n. 5, p. 332-347, may. 2018.
- DOORENBOS, J., KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper N° 33**. Roma, FAO. 1979.193p.
- FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS T. Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 469-476, 2009.
- FUNDAÇÃO ABC. Soluções tecnológicas para o agronegócio. Disponível em: <<http://www.fundacaoabc.org>>. Acesso em 15 jun. 2018.

GARCIA-VILA, M.; FERERES, E.; MATEOS, L.; ORGAZ, F.; STEDUTO, P. Deficit irrigation optimization of cotton with Aquacrop. **Agronomy Journal**, v. 10, p. 477-487, 2009.

GEERTS, S.; RAES, D.; GARCIA, M.; MIRANDA, R.; CUSICANQUI, J. A.; TABOADA, C.; MENDOZA, J.; HUANCA, R.; MAMANI, A.; CONDORI, O.; MAMANI, J.; MORALES, B.; OSCO, V.; STEDUTO, P. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 498-508, 2009.

GONÇALVES, D. R. P.; ROCHA, C. H. Indicadores de qualidade de água e padrões de uso da terra em bacias hidrográficas no Estado do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p.1172-1183, set. 2016.

GURSKI, B. C. **Componentes hídricas prováveis e zoneamento de risco agroclimático para o Estado do Paraná**. 121 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

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, 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**, v. 101, p. 487-498, 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. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 448– 459, 2009.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2015). IBGE@idades, Produção Agrícola Municipal. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/TABELA/99>>. Acesso em 04 jul. de 2018.

JIN, X.; FENG, H.; ZHU, X.; LI, Z.; SONG, S.; SONG, X.; YANG, G.; XU, X.; GUO, W. Assessment of the AquaCrop Model for Use in Simulation of Irrigated Winter Wheat Canopy Cover, Biomass, and Grain Yield in the North China Plain. **Plos One**, v. 9, n. 1, jan. 2014, 11p.

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.

MOHAMMADI, M.; GHAHRAMAN, B.; DAVARY, K.; ANSARI, H.; SHAHIDI, A.; BANNAYAN, M. Nested Validation of Aquacrop Model for Simulation of Winter Wheat Grain Yield, Soil Moisture and Salinity Profiles under Simultaneous Salinity and Water Stress. **Irrigation and Drainage**, v. 65, p. 112–128, jan. 2016.

NUTTALL, J. G.; KIRSTEN, M. B.; DELAHUNTY, A. J.; CHRISTY, B. P.; O'LEARY, G. J. Acute High Temperature Response in Wheat. *Crop Ecology and Physiology*. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 4, may. 2018. 13p.

OLIVEIRA, C. T. **Calibração, validação, análise de sensibilidade e identificação dos melhores períodos de plantio das culturas da soja e milho com o modelo AquaCrop, na Região dos Campos Gerais.** 87f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

PAREEK, N.; ROY, S.; SAHA, S.; NAIN, A. Calibration & validation of Aquacrop model for wheat crop in Tarai region of Uttarakhand. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 6, n. 5, p. 1442-1445, 2017.

PIEKARSKI, K. R.; SOUZA, J. L. M. de; JERSZURKI, D.; TSUKAHARA, R. Y.; OLIVEIRA, C. T. de. Simulação da produtividade da soja em três tipos de solo como modelo AquaCrop. **IV Convibra Congresses Conferences**, 2016.

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

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual of Aquacrop**: Annexes. Rome, Italy. FAO, 2017.

RAES, D. STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**: Chapter 1: FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water. Version 6.0 - 6.1. Rome, Italy. FAO, 2018, 19p.

ROSA, S. L. K.; SOUZA, J. L. M.; TSUKAHARA, R. Y.; SANTOS, A. A.; RITA, Y. L. Análise de sensibilidade do modelo AquaCrop para a cultura do trigo na Região dos Campos Gerais. **VI Convibra Congresses Conferences**, 2018.

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

SCHERAIBER, C. F. **Adaptação metodológica para a estimativa e caracterização das relações hídricas como suporte ao planejamento agrícola.** 153f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

SHIMANDEIRO, A.; KANTELHARDT, J.; WEIRICH NETO, P. H. Characterization of major crop management in the buffer zone of Vila Velha State Park, state of Paraná, Brazil. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 2, p. 225-230, abr./jun. 2008.

SOARES, J. D. R. **Modelagem matemática na previsão da colheita de bananeira: regressão linear múltipla x redes neurais artificiais.** 115 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2011.

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

TODOROVIC, M.; ALBRIZIO, R.; ZIVOTIC, L.; ABI SAAB M. T.; STÖCKLE, C.; STEDUTO, P. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 508–521, 2009.

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

VAN VLIET, J.; BREGT, A. K.; BROWN, D. G.; VAN DELDEN, HECKBERT, S.; VERBURG, P. H. A review of current calibration and validation practices in land-change modeling. **Environmental Modelling & Software**, v. 82, p. 174-182, 2016.

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; WILLEMNS, P. Considering sink strength to model crop production under elevated atmospheric CO₂. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 12, p.1753-1762, dez. 2011.

WAHA, K.; HUTH, N.; CARBERRY, P.; WANG, E. How model and input uncertainty impact maize yield simulations in West Africa. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 2, fev. 2015. 11p.

2 CAPÍTULO I – ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE SOLOS DOS CAMPOS GERAIS SOB SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

2.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho determinar e associar os atributos físico-hídricos de três tipos de solos sob sistema plantio direto, localizados na região dos Campos Gerais, Estados do Paraná e São Paulo. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo nas profundidades de 0,0-0,10 m; 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m. As amostras foram provenientes de parcelas das Estações Experimentais da Fundação ABC, localizadas em Arapoti e Ponta Grossa, Estado do Paraná e Itaberá, Estado de São Paulo. Foram obtidos valores de textura (argila, silte, areia fina e areia grossa); massa específica (solo e partículas do solo); porosidade (total, macro e micro); umidade volumétrica (saturação, capacidade de campo e ponto de murcha permanente); capacidade de água disponível, condutividade hidráulica saturada e curva de retenção de água no solo. Os resultados obtidos indicaram que a textura predominante dos solos avaliados é Argilosa em Itaberá e Franco Argilo-arenosa em Arapoti. No município de Ponta Grossa a textura variou de Argilosa a Franco Argilo-arenosa. A massa específica do solo (ρ_s) está compreendida entre 1077,57 kg m⁻³ a 1648,74 kg m⁻³, limites entre os recomendados pela literatura para estas classes texturais. A massa específica de partículas de solo (ρ_{ps}) foi o atributo que apresentou menor variabilidade média entre camadas. A porosidade total (α) dos solos está compreendida entre 0,44 m³ m⁻³ e 0,70 m³ m⁻³. A umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) foi maior nos solos argilosos. Os valores obtidos para umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) também seguiram a mesma tendência da θ_{cc} , porém, apresentaram maior dispersão dos dados. A maior variação da capacidade de água disponível (CAD) dos solos estudados ocorreu em Ponta Grossa-PR ($CV = 63,54\%$). A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) foi o parâmetro que apresentou maior variabilidade nos solos estudados ($CV = 70,23\%$).

Palavras-chave: Fundação ABC; textura, massa específica, curva de retenção de água no solo, condutividade hidráulica.

2.2 ABSTRACT

The objective of this study was to determine and associate the physical-hydric attributes of three soils types under no-tillage system, located in the Campos Gerais region. Disturbed and undisturbed soil samples were collected at 0.0-0.10 m; 0.10-0.25 m and 0.25-0.40 m depths. The samples were taken from the Experimental Stations of the ABC Foundation, located in Arapoti and Ponta Grossa, in Paraná State, and Itaberá, in São Paulo State. Values were obtained of texture (clay, silt, fine sand and coarse sand); density (soil and soil particles); porosity (total, macro and micro); volumetric water content (saturation, field capacity and permanent wilting point); available water capacity, saturated hydraulic conductivity and soil water retention curve. The results indicated that the predominant texture of the evaluated soils is clay in Itaberá and sandy clay loam in Arapoti. In Ponta Grossa city the texture varied from clay to sandy clay loam. The specific soil mass (ρ_s) varied between 1077.57 kg m⁻³ and 1648.74 kg m⁻³, limitation between those recommended in the literature for these textural classes. The soil particles density (ρ_{ps}) was the attribute that showed the lowest mean variability between layers. The total soil porosity (α) was between 0.44 m³ m⁻³ and 0.70 m³ m⁻³. The field capacity (θ_{cc}) was higher in clay soils. The values obtained for the permanent wilting point (θ_{PMP}) also followed the same trend as the θ_{cc} , but showed a higher data dispersion. The greatest variation of the available water capacity (CAD) of the studied soils occurred in Ponta Grossa-PR ($CV = 63.54\%$). The saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) was the parameter that showed the highest variability in the studied soils ($CV = 70.23\%$).

Keywords: ABC Foundation, texture, specific mass, soil water retention curve, hydraulic conductivity.

2.3 INTRODUÇÃO

A qualidade do solo é fundamental para o estabelecimento da agricultura sustentável. Para a cultura agrícola expressar seu máximo potencial produtivo o solo deve apresentar condições favoráveis para seu desenvolvimento e, para que isso ocorra, boas práticas de manejo devem estar associadas (Tavares Filho et al., 2010; Huang et al., 2015; Broch e Klein, 2017).

O sistema de manejo adotado influencia na capacidade do solo em disponibilizar água para as plantas. A degradação da estrutura altera os atributos físicos, bem como a dinâmica da água no perfil, podendo ocasionar perdas de produtividade das culturas (Rossetti e Centurion, 2013; Silva et al., 2014; Souza et al., 2015; Barbosa et al., 2017; Souza et al., 2017). O sistema de plantio direto é prática conservacionista propícia para a redução dos danos ocasionados pelo mau uso do solo, contribuindo com a sustentabilidade ambiental e econômica do sistema (Silva et al., 2000; Loss et al., 2017), refletindo em efeitos positivos nas propriedades físicas do solo (Huang et al., 2015).

A estrutura do solo afeta o desenvolvimento radicular, refletindo no crescimento das plantas (Pardo et al., 2000; Rossetti e Centurion, 2013). Assim, o uso indevido do solo pode ocasionar perturbações na sua estrutura, muitas vezes resultando em compactação e, conseqüentemente, problemas na infiltração e disponibilidade de ar e água para as plantas. Um solo com adequada estrutura dos agregados tem influência direta na porosidade, melhorando a infiltração de água e solutos ao longo do perfil (Schoenholtz et al., 2000).

A disponibilidade hídrica é um importante indicador da qualidade física do solo (Silva et al., 2014). Para entender a dinâmica da água no perfil é necessário o entendimento dos atributos físico-hídricos, ou seja, dos indicadores da qualidade física do solo. Dentre eles, pode-se destacar a granulometria, estabilidade de agregados, resistência do solo a penetração, massa específica do solo (ρ_s), volume total de poros (α), condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), capacidade de água disponível (CAD) na rizosfera, entre outros (Carneiro et al., 2009; Tavares Filho et al., 2010; Stefanoski et al., 2013; Castellini et al., 2015). Esses atributos influenciam diretamente na taxa de infiltração de água no solo, as quais podem, de maneira

associada ou isolada, influenciar o escoamento superficial e conseqüentemente a perda de água do solo (Castro et al., 2012).

O movimento da água no perfil do solo ocorre devido à diferença dos potenciais totais (ψ) em seu interior, sendo que o fluxo de água vai do potencial mais negativo para o menos negativo. O potencial total (ψ) consiste no somatório dos potenciais gravitacional (ψ_g), matricial (ψ_m), osmótico (ψ_o) e pressão (ψ_p) (Ramos et al., 2013; Schoonover e Crim, 2015). Sua importância deve-se ao transporte de solutos no perfil do solo e a disponibilidade de água às plantas. Os atributos físico-hídricos do solo que auxiliam na compreensão da disponibilidade hídrica para as plantas são a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), os quais podem ser obtidos com amostras indeformadas de solo (em anéis volumétricos) em laboratório, nos potenciais de 0,006 MPa e 1,5 MPa, respectivamente (Reichardt e Timm, 2004; Ramos et al., 2013; Schoonover e Crim, 2015).

A massa específica do solo (ρ_s) é a relação entre a massa de solo compreendida em determinado volume, indicando o grau de arranjo das partículas, sendo extremamente sensível ao preparo do solo (Castro et al., 2012; Souza et al., 2017). Quanto maior a massa de solo por unidade de volume, maior será a compactação, reduzindo a porosidade total (α) do solo. Desta forma, haverá problemas de aeração e conseqüentemente maiores restrições ao crescimento e desenvolvimento das culturas. O método de determinação mais comum é o anel volumétrico, que consiste na introdução de um cilindro de volume conhecido no perfil do solo (Reichardt e Timm, 2004).

A massa específica das partículas (ρ_{ps}) refere-se a massa dividida pelo volume de sólidos da amostra de solo, sem considerar a porosidade. Apresenta-se como indicativo da composição mineralógica do solo, cálculo da velocidade de sedimentação de partículas e determinação indireta da porosidade (Forsythe, 1975). O método do Balão Volumétrico é um dos métodos mais recomendados na literatura (Gubiani et al., 2006).

A porosidade total (α) é influenciada pela massa específica do solo (ρ_s) e pode ser definida como o espaço de aeração encontrado no volume de solo, estando diretamente relacionado com o volume de solo ocupado pela água, ar e

solos. Os poros encontrados no solo apresentam-se em diferentes tamanhos, e podem promover restrição do fluxo de água no perfil. Desta forma, torna-se importante a determinação da distribuição dos poros na matriz do solo (Ribeiro et al., 2007).

A condutividade hidráulica é um dos atributos do solo que melhor indicam as diferenças estruturais entre as camadas que constituem o perfil, sendo altamente variável no solo (Warrick, 1998; Rossetti e Centurion, 2013). A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), por ser um atributo físico-hídrico sensível, pode variar muito dependendo do manejo adotado. Seu valor está relacionado com o movimento de água ao longo do perfil, e descreve a funcionalidade do sistema poroso (Gonçalves e Libardi, 2013), podendo apresentar valores muito altos em áreas com práticas intensivas de revolvimento do solo (Reichardt e Timm, 2004).

Conforme Veihmeyer e Hendrickson (1949), a capacidade de campo (CC) é definida como “a quantidade de água retirada pelo solo depois que o excesso tenha drenado e a taxa de movimento descendente tenha decrescido acentuadamente, o que ocorre geralmente dois a três dias após uma chuva ou irrigação em solos permeáveis de estrutura e textura uniforme”. É uma medida agronômica importante, com aplicação direta no manejo da irrigação, permitindo sua determinação sem aplicação excessiva (Van Lier, 2017). A capacidade de campo depende do fluxo de drenagem de água no solo.

A umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) é um importante indicador do processo de inibição da transpiração da planta (Garg et al., 2017). É definida como “o conteúdo de água de um solo no qual as folhas das plantas que nele crescem atingem pela primeira vez o murchamento irrecuperável, mesmo quando colocada em atmosfera saturada com vapor de água por doze horas” (Veihmeyer e Hendrickson, 1949).

O conceito de disponibilidade de água para as plantas trouxe ao longo dos anos controvérsias entre autores. Para Veihmeyer e Hendrickson (1949) a capacidade de água disponível para as plantas (CAD) compreende o intervalo de umidade entre a capacidade de campo (θ_{CC}) e o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}). Richards e Waldleight (1952) afirmam que a disponibilidade de água às plantas decresce com a diminuição da umidade do solo, e a planta pode sofrer deficiência

de água e redução do crescimento antes de alcançar o ponto de murcha permanente. Entretanto, nenhum dos autores baseou suas hipóteses em teoria fundamentada, por terem suas conclusões baseadas em pequeno número de experimentos (Reichardt e Timm, 2004).

Na avaliação da qualidade do solo e planejamento de cultivos agrícolas muitos dos atributos físico-hídricos apresentam grande utilidade. Souza et al. (2017) consideram que ainda estão em fase de investigação as relações entre atributos físico-hídricos do solo e produtividade de culturas agrícolas, devido à dificuldade em quantificar e equacionar a dependência entre os mesmos. Rossetti e Centurion (2013) consideram que os cultivos agrícolas inadequados alteram os atributos físicos do solo, e ressaltam a importância de quantificar e qualificar as condições estruturais do solo, visando compreender o tipo de manejo e sua influência na produtividade agrícola das culturas.

Empenhada na conservação e avaliação da qualidade do solo, voltada ao bom planejamento de cultivos agrícolas, a Fundação ABC, uma importante instituição privada que se encontra situada na região dos Campos Gerais, nos Estados do Paraná e São Paulo (Fundação ABC, 2017), realiza parcerias em projetos de pesquisas aplicadas com inúmeras empresas privadas e instituições públicas. Embora a Fundação ABC disponha de séries de dados históricos de cultivos agrícolas, os quais são muito utilizados em diversos projetos de pesquisa, a obtenção de dados relacionados aos diferentes tipos de solo, ainda é bastante restrita na região (Piekarski, 2016). Desta forma, é necessário que sejam identificados os tipos de solo das áreas, sua classificação textural e atributos físico-hídricos, os quais são fundamentais para o bom plano de manejo do solo.

Considerando a importância dos atributos físico-hídricos dos solos na determinação da produtividade de lavouras, associado à capacidade produtiva da região dos Campos Gerais do Paraná, teve-se por objetivo no presente trabalho determinar e associar os atributos físico-hídricos de três tipos de solos sob sistema de plantio direto, localizados nas Estações Experimentais da Fundação ABC, região dos Campos Gerais.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 Descrição das áreas

Foram avaliadas parcelas experimentais pertencentes ao Setor de Agrometeorologia da Fundação ABC, localizadas nos municípios de Arapoti e Ponta Grossa, no Estado do Paraná, e Itaberá, Estado de São Paulo (FIGURA 2.1). Todas as parcelas apresentam relevo plano a suave ondulado sob sistema de plantio direto, com cobertura vegetal residual proveniente da safra anterior. As áreas possuem rotação de culturas adotando o cultivo de soja ou milho no verão, e trigo ou aveia preta no inverno.

FIGURA 2.1 – LOCALIZAÇÃO DOS MUNICÍPIOS DE ARAPOTI-PR (A), PONTA GROSSA-PR (B) E ITABERÁ-SP (C).



FONTE: Guia Geográfico

A classificação de solos foi previamente realizada pela Fundação ABC, e obtida a partir dos mapas de solos com escala 1:10000 (TABELA 2.1). Os tipos climáticos dos municípios foram identificados em Alvarez et al. (2013), que utilizou a classificação climática de Köppen para essa finalidade. O município de Itaberá apresenta clima *Cfa*: subtropical úmido, clima oceânico sem estação seca e com verão quente. O município de Ponta Grossa apresenta clima *Cfb*: subtropical úmido, clima oceânico sem estação seca e com verão temperado. O município de Arapoti encontra-se na transição climática *Cfa/Cfb* (TABELA 2.1).

TABELA 2.1 – CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, LOCALIZADAS NOS MUNICÍPIOS DE ARAPOTI, PONTA GROSSA E ITABERÁ.

Localidade	Estado	Solo	Clima	Latitude ----- (graus)	Longitude -----	Altitude (m)
Arapoti	Paraná	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	<i>Cfa/Cfb</i> ⁽¹⁾	24,19° S	49,88° W	887
Itaberá	São Paulo	PLANOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico	<i>Cfa</i>	24,06° S	49,15° W	740
Ponta Grossa	Paraná	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	<i>Cfb</i>	25,30° S	49,95° W	908

⁽¹⁾ Local de transição climática. FONTE: Adaptado de Álvares et al. (2013) e Piekarski (2016).

2.4.2 Coleta e análise das amostras

Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo em cinco repetições para cada localidade, nas camadas de 0,0-0,10 m, 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m, para análise dos atributos físico-hídricos dos solos nas três diferentes localidades.

A coleta das amostras deformadas foi realizada com trado calador e armazenadas em sacos plásticos identificados. As amostras indeformadas foram coletadas com anéis volumétricos de aço, com bordas cortantes de 4,7 cm de diâmetro x 3,3 cm de altura. Após a coleta, os anéis foram envoltos com plástico filme para manter a estrutura da amostra. Todas as amostras foram devidamente identificadas e levadas para análise no Laboratório de Física do Solo, pertencente à Universidade Federal do Paraná. Os atributos físico-hídricos avaliados foram: teores de argila (g kg^{-1}), silte (g kg^{-1}), areia fina (g kg^{-1}) e areia grossa (g kg^{-1}); massa específica do solo (ρ_s ; kg m^{-3}); massa específica de partículas do solo (ρ_{ps} ; kg m^{-3}); porosidade total (α ; $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), macro e microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC} ; $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); capacidade de água disponível (CAD ; mm) e condutividade hidráulica saturada (K_{sat} ; mm dia^{-1}).

2.4.2.1 Amostras deformadas

Com as amostras deformadas foi determinada a granulometria e massa específica de partículas do solo (ρ_{ps} ; kg m^{-3}). Os teores de argila (g kg^{-1}), silte (g kg^{-1}), areia fina (g kg^{-1}) e areia grossa (g kg^{-1}) foram determinados com o método do hidrômetro de Bouyoucos (1951), no Laboratório de Física do Solo da UFPR (APÊNDICE 1). A massa específica das partículas do solo (ρ_{ps} ; kg m^{-3}) foi determinada com o método do balão volumétrico modificado, conforme Gubiani et al. (2006), no Laboratório de Física do Solo da UFPR (APÊNDICE 2).

2.4.2.2 Amostras indeformadas

Com as amostras indeformadas foi determinada a massa específica do solo (ρ_s ; kg m^{-3}). Utilizou-se o método do anel volumétrico, conforme Embrapa (1997), no Laboratório de Física do Solo da UFPR (APÊNDICE 3).

Os valores de umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc} ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), porosidade total (α ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), macro e microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) também foram determinados conforme Embrapa (1997), no Laboratório de Física do Solo da UFPR. Considerou-se a porosidade total das amostras igual à umidade volumétrica do solo na saturação (θ_{sat} ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Para determinar a umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc}) foram utilizados os anéis volumétricos dispostos na mesa de tensão a 0,006 MPa (APÊNDICE 4). Por apresentarem resultados muito semelhantes, os valores de microporosidade do solo foram considerados os mesmos da umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) (Fabian e Ottoni Filho, 2000; Andrade e Stone, 2011). Os valores referentes aos macroporos foram obtidos pela diferença entre as umidades volumétricas do solo saturado (θ_{sat}) e na capacidade de campo (θ_{cc}) (Embrapa, 1997; Fabian e Ottoni Filho, 2000).

A umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi estimada com a equação de Van Genuchten (1980) (Equação 2.1), no Laboratório de Modelagem de Sistemas na Agricultura da UFPR, considerando a tensão de 1,5 MPa. Para tal, foi necessária a obtenção dos parâmetros θ_r , θ_s , α , m e n da equação, os quais foram obtidos com o *software* de pedotransferência SPLINTEX, versão 1.0 (Prevedello, 1999). Para cada camada de solo amostrada foi necessária a entrada dos seguintes dados no programa: valores acumulados de argila (%), silte (%) e areia (%); massa específica do solo (kg m^{-3}); massa específica das partículas (kg m^{-3}); umidade volumétrica do solo na saturação (%); umidade volumétrica do solo quando submetido à tensão de 0,01 Mpa. A tensão de 0,01 MPa foi escolhida por permitir maior confiabilidade no ajuste da Retenção de Água no solo (CRA) com o SPLINTEX (Silva, 2015). Com os parâmetros (θ_r , θ_s , α , m e n) obtidos, foi possível realizar a CRA.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + |\alpha \cdot \psi_m|^n]^m} \quad (2.1)$$

Sendo: θ – umidade volumétrica no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_r – umidade volumétrica residual do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_s – umidade volumétrica do solo na saturação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); ψ_m – potencial matricial da água no solo (hPa); α – parâmetro de escala inversamente proporcional ao diâmetro médio dos poros (cm^{-1}); m e n – parâmetros empíricos do ajuste (adimensionais).

Para determinação dos valores da capacidade de água disponível no solo (CAD ; mm) foi utilizada a Equação 2.2:

$$CAD = \sum_{i=1}^n (\theta_{CCi} - \theta_{PMPi}) \cdot z_i \quad (2.2)$$

Sendo: CAD – capacidade de água disponível no solo (mm); θ_{CCi} – umidade volumétrica do solo na capacidade de campo na i -ésima camada ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_{PMPi} – umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente na i -ésima camada ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); z_i – profundidade da i -ésima camada enraizada do solo (mm); n – número de camadas consideradas.

A condutividade hidráulica saturada (K_{sat} ; mm dia^{-1}) foi determinada com o método do permeâmetro de carga decrescente, conforme Reynolds e Elrick (2002), no laboratório de Física do Solo da UFPR (APÊNDICE 5).

Os dados obtidos foram analisados em planilha eletrônica para comparação dos resultados. Para tal, foram realizadas medidas de tendência, dispersão e comparação com dados de literatura.

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os atributos físico-hídricos de solos obtidos para as três localidades analisadas estão dispostos no APÊNDICE 6. Na TABELA 2.2 encontram-se os valores médios obtidos para os atributos físico-hídricos de três camadas de solos localizados no município de Arapoti-PR, Itaberá-SP e Ponta Grossa-PR, das Estações Experimentais da Fundação ABC, região dos Campos Gerais.

TABELA 2.2 – VALORES MÉDIOS DOS TEORES DE ARGILA, SILTE, AREIA FINA, AREIA GROSSA E AREIA TOTAL, MASSA ESPECÍFICA DO SOLO (ρ_s), MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DE SOLO (ρ_{ps}), POROSIDADE TOTAL (α), MICROPOROSIDADE, MACROPOROSIDADE, UMIDADE VOLUMÉTRICA NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE (θ_{pmp}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (θ_{cc}), CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL (CAD) E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (K_{sat}), EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

Local	Camada (m)	Textura (g kg ⁻¹)										θ_{pmp} (m ³ m ⁻³)	θ_{cc} (m ³ m ⁻³)	CAD (mm)	K_{sat} (mm h ⁻¹)
		Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total	ρ_s (kg m ⁻³)	ρ_{ps} (kg m ⁻³)	α (m ³ m ⁻³)	Microporos (m ³ m ⁻³)	Macroporos (m ³ m ⁻³)				
Arapoti	0,0-0,10	280,00	45,00	224,53	450,47	675,00	1438,29	2777,96	0,51	0,29	0,22	0,15	0,29		665,06
	0,10-0,25	305,00	30,00	220,36	444,64	665,00	1496,80	2801,22	0,48	0,28	0,20	0,15	0,28	53,07	226,57
	0,25-0,40	320,00	25,00	217,42	437,58	655,00	1517,32	2801,22	0,46	0,28	0,18	0,16	0,28		181,89
Itaberá	0,0-0,10	520,00	80,00	185,77	214,23	400,00	1398,34	2810,86	0,56	0,40	0,16	0,28	0,40		165,01
	0,10-0,25	560,00	60,00	174,56	205,44	380,00	1449,04	2809,72	0,50	0,37	0,13	0,27	0,37	45,64	28,83
	0,25-0,40	570,00	65,00	176,40	188,60	365,00	1337,80	2817,27	0,56	0,39	0,17	0,26	0,39		449,65
Ponta Grossa	0,0-0,10	405,00	130,00	201,93	263,07	465,00	1288,54	2710,10	0,59	0,41	0,19	0,23	0,41		469,41
	0,10-0,25	490,00	55,00	198,14	256,86	455,00	1376,71	2771,00	0,53	0,38	0,15	0,25	0,38	63,54	89,48
	0,25-0,40	545,00	40,00	181,10	233,90	415,00	1202,17	2725,30	0,62	0,41	0,22	0,23	0,41		433,84
Média ⁽¹⁾		443,89	58,89	197,80	299,42	497,22	1389,44	2780,52	0,54	0,36	0,18	0,22	0,36	54,08	301,08
Desvio Padrão ⁽¹⁾		117,55	31,80	19,52	111,12	129,86	101,23	38,87	0,05	0,05	0,03	0,05	0,05	8,99	211,45
CV (%) ⁽¹⁾		26,48	54,00	9,87	37,11	26,12	7,29	1,40	9,77	15,25	16,25	24,28	15,25	16,63	70,23

⁽¹⁾ Medidas de tendência e dispersão calculados com valores de todas as amostras retiradas nas três Estações Experimentais (90 amostras).

FONTE: A autora (2018)

2.5.1 Textura do solo

Verificou-se nas áreas estudadas predominância de solos muito intemperizados e profundos (TABELA 2.3).

TABELA 2.3 – CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL DAS TRÊS CAMADAS DOS SOLOS LOCALIZADAS NAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

Localidade	Camada (m)	Classe textural
Arapoti	0,0-0,10	Franco Argilo-arenosa
	0,10-0,25	Franco Argilo-arenosa
	0,25-0,40	Franco Argilo-arenosa
Itaberá	0,0-0,10	Argilosa
	0,10-0,25	Argilosa
	0,25-0,40	Argilosa
Ponta Grossa	0,0-0,10	Argilosa a Franco Argilo-arenosa
	0,10-0,25	Argilosa a Franco Argilo-arenosa
	0,25-0,40	Argilosa a Franco Argilo-arenosa

FONTE: A autora (2018)

A textura dos solos encontrados apresentou variação entre as regiões, porém a classificação textural não apresentou variação considerável, principalmente entre os municípios de Arapoti e Ponta Grossa. A textura do município de Ponta Grossa apresentou variação de Argilosa a Franco Argilo-arenosa. A variação deveu-se às glebas amostradas serem distintas. Quatro das cinco amostras coletadas em Ponta Grossa apresentaram textura Argilosa, e apenas uma apresentou textura Franco Argilo-arenosa. A classe textural das demais localidades foi a mesma encontrada por Souza et al. (2017), que ao classificarem os solos da Região dos Campos Gerais, encontraram textura Franco Argilo-arenosa em Arapoti e Argilosa em Itaberá. A coleta das amostras deformadas e indeformadas do presente estudo em Itaberá ocorreu nas mesmas glebas representativas do estudo de Souza et al. (2017), confirmando a classe textural encontrada. A comparação não poderia ser diferente, uma vez que a textura do solo é um atributo que requer longo período de tempo e diversos processos pedológicos para sofrer alteração. As amostras obtidas em Arapoti no presente trabalho foram provenientes de glebas diferentes do estudo de Souza et al. (2017), porém a classificação textural encontrada também foi a mesma. A textura Argilo-arenosa encontrada para o município de Ponta Grossa por Souza et al. (2017) diferiu da encontrada no presente estudo, devido às áreas amostradas serem de diferentes glebas representativas.

Dentre os municípios avaliados os maiores teores de areia (APÊNDICE 6) foram encontrados em Arapoti (665,0 g kg⁻¹), seguido de Ponta Grossa (445,0 g kg⁻¹) e Itaberá (381,7 g kg⁻¹). A maior quantidade de argila foi observada na camada 0,10-0,40 m em Itaberá (625,0 g kg⁻¹), que também apresentou a maior média no perfil analisado (550,0 g kg⁻¹). Os teores de silte foram mais baixos, variando entre 25 e 200 g kg⁻¹, sendo o maior valor (200 g kg⁻¹) encontrado no município de Ponta Grossa, na camada 0,0-0,10 m, na gleba representativa que apresentou textura Franco Argilo-arenosa.

Os valores de textura encontrados enquadram-se na classificação da *United States Department of Agriculture* (USDA). Solos de textura Franco Argilo-arenosa geralmente apresentam concentração de “areia > 45%” e “20 ≤ argila < 35%”, e solos de textura argilosa apresentam “argila ≥ 40%” e “areia ≤ 45%” (Soil Survey Division Staff, 1993).

2.5.2 Massa específica do solo ou densidade aparente (ρ_s)

A massa específica do solo (ρ_s ; APÊNDICE 6 e TABELA 2.2) variou de 1077,57 kg m⁻³ (Ponta Grossa) a 1648,74 kg m⁻³ (Arapoti). Arapoti, Itaberá e Ponta Grossa apresentaram ρ_s média de 1484,14 kg m⁻³, 1395,06 kg m⁻³ e 1289,14 kg m⁻³, respectivamente. Segundo Reichert et al. (2003) os valores críticos de ρ_s variam entre 1300 e 1400 kg m⁻³ para solos de textura Argilosa e 1400 a 1500 kg m⁻³ para solos de textura Franco Argilo-arenosa. Em geral, os valores médios obtidos no estudo estão dentro do limite proposto pelos autores, sendo que apenas Ponta Grossa ficou ligeiramente abaixo do recomendado (TABELA 2.2). Reinert e Reichert (2006) e Rosa et al. (2012) consideram intervalos maiores de ρ_s , compreendidos entre 1200 a 1900 kg m⁻³ para solos arenosos, 900 a 1700 kg m⁻³ para solos argilosos e valores intermediários para solos de textura franca. Sendo assim, todas as localidades estão dentro da normalidade quanto aos valores de ρ_s . Os valores obtidos no presente estudo foram superiores aos encontrados por Souza et al. (2017), que observou média da ρ_s de 1350 kg m⁻³ em Arapoti, 1205 kg m⁻³ em Itaberá e 1215 kg m⁻³ em Ponta Grossa, para os solos da Região dos Campos Gerais.

Reinert e Reichert (2006) sugerem que o valor de ρ_s associado à compactação é de 1450 kg m^{-3} para solos argilosos. Os valores de ρ_s encontrados no presente estudo foram superiores apenas em três camadas no município de Itaberá, ambas na profundidade 0,10-0,25 m (APÊNDICE 6). Os valores obtidos nestes pontos indicam que pode ter ocorrido compactação. Porém, para Schaezel e Anderson (2005) a compactação do solo é observada entre densidades de 1300 a 1650 kg m^{-3} . Schoonover e Crim (2015) comentam que valores de ρ_s acima de 1400 kg m^{-3} em solos de textura argilosa podem proporcionar restrições do crescimento radicular das culturas. No entanto, Oliveira et al. (2016) consideram que os valores críticos de compactação sugeridos na literatura não podem ser admitidos como únicos, pois dependem da textura de cada tipo de solo.

Reichardt e Timm (2004) descrevem que solos de textura argilosa geralmente apresentam ρ_s inferior a solos de textura arenosa. Este fato foi observado no presente estudo, em que a ρ_s em Itaberá e Ponta Grossa foram inferiores a Arapoti. Os valores de ρ_s obtidos são aceitáveis para a Região dos Campos Gerais, uma vez que a ρ_s é influenciada por fatores como conteúdo de matéria orgânica, compactação e profundidade (Martín et al., 2017).

2.5.3 Massa específica das partículas do solo ou densidade real (ρ_{ps})

A massa específica das partículas do solo (ρ_{ps}) apresentou a menor variabilidade entre os solos analisados ($CV = 1,40\%$; TABELA 2.2). Como o atributo é dependente da constituição química e mineralógica do solo, seu valor não é influenciado pelo manejo adotado (Gimenes, 2012; Souza et al., 2017). A ρ_{ps} consiste na relação entre o total de massa de solo por volume de sólido, dependendo da composição mineralógica e orgânica. Logo, apresenta pouca diferença entre as mesmas classes de solo (Reichardt e Timm, 2004; Rühlmann et al., 2006; Santos et al., 2015).

A ρ_{ps} ficou compreendida entre $2666,64 \text{ kg m}^{-3}$ (Ponta Grossa) a $2941,12 \text{ kg m}^{-3}$ (Itaberá) (APÊNDICE 6). A média da ρ_{ps} foi de $2793,47 \text{ kg m}^{-3}$ em Arapoti, $2812,62 \text{ kg m}^{-3}$ em Itaberá e $2735,47 \text{ kg m}^{-3}$ em Ponta Grossa (TABELA 2.2 e APÊNDICE 6). Os valores de ρ_{ps} obtidos estão enquadrados em sua maioria na classificação leve (massa específica inferior a 2850 kg m^{-3}), apresentando apenas

cinco pontos na classificação pesada (massa específica superior a 2850 kg m^{-3}) (Santana, 2009 apud RABELO, 2000), os quais estão presentes predominantemente no município de Itaberá (APÊNDICE 6).

Assim como a ρ_s , a ρ_{ps} no presente estudo também foi superior aos valores encontrados por Souza et al. (2017), na Região dos Campos Gerais. Os autores encontraram valores médios de 2590 kg m^{-3} em Arapoti, 2630 kg m^{-3} em Itaberá e 2565 kg m^{-3} em Ponta Grossa. A variação observada nos dois estudos pode ser devida a: diferença dos locais amostrados; metodologia de análise; e, diferentes operadores no procedimento laboratorial.

Reinert e Reichert, (2006) comentam que os componentes que predominam em solos minerais possuem ρ_{ps} em torno de 2650 kg m^{-3} , podendo variar devido a presença de matéria orgânica e teores de óxidos, principalmente Fe e Al. Elevadas concentrações de óxidos tendem a aumentar o valor da ρ_{ps} . Para Reichardt e Timm (2004) a média para a grande variedade de solos é 2700 kg m^{-3} . Os valores obtidos no presente trabalho, ainda que elevados quando comparados a outros estudos, estão dentro da normalidade, visto que podem variar entre 2300 e 2900 kg m^{-3} (Rühlmann et al. 2006; Santana, 2009).

A ρ_{ps} média dos solos argilosos de Ponta Grossa e Itaberá foi de $2822,88 \text{ kg m}^{-3}$ no presente trabalho (APÊNDICE 6). Schjønning et al. (2017) estimando a ρ_{ps} com funções de pedotransferência, baseadas no conteúdo de matéria orgânica em solos predominantemente argilosos de depósitos glaciais da Dinamarca, encontraram valores próximos à 2860 kg m^{-3} . O resultado indicou que a ρ_{ps} é um atributo que depende principalmente da composição mineralógica do solo.

2.5.4 Porosidade total, macroporosidade e microporosidade

A porosidade total (α) encontrada nas áreas (APÊNDICE 6) variou entre $0,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Arapoti) e $0,70 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Ponta Grossa). A α média foi $0,49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o município de Arapoti, $0,54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Itaberá e $0,58 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Ponta Grossa (TABELA 2.2). Souza et al. (2017) ao avaliar a α dos solos da Região dos Campos Gerais obteve valores médios muito próximos aos encontrados no presente estudo, sendo $0,48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para Arapoti, $0,54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Itaberá e $0,52 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Ponta Grossa. Apenas o município de Ponta Grossa apresentou valores maiores de α .

Os valores de α média obtidos em todas as localidades (APÊNDICE 6) estão dentro dos limites propostos por Reichardt e Timm (2004), sendo: entre 0,32 e 0,47 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ em solos de textura arenosa; entre 0,52 e 0,61 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ em solos argilosos; e, um valor intermediário em solos francos. O valor médio de α encontrado em Ponta Grossa está próximo ao obtido por Secco et al. (2005), que obtiveram valores entre 0,49 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e 0,59 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, avaliando a α durante três anos de um Latossolo Vermelho distrófico, classe textural argilosa, considerando diferentes tipos de preparo de solo. Marcolan e Anghinoni (2006) encontraram os limites de porosidade total entre 0,38 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e 0,56 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para a classe textural Franco Argilo-arenosa. Os valores observados em Arapoti estão dentro deste intervalo, com exceção da camada 0,0-0,10 m (0,58 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

A literatura indica, para condições ideais de crescimento e desenvolvimento das plantas, que a α do solo deve ficar distribuída em aproximadamente dois terços de microporos e um terço de macroporos, estabelecendo relação macroporos/microporos igual a 0,50 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (Hillel, 1970; Kiehl, 1979; Reichardt e Timm, 2004). Nos resultados obtidos, verificou-se que apenas Ponta Grossa apresentou nas camadas superficial e profunda valores próximos ao recomendado pela literatura (TABELA 2.4).

TABELA 2.4 – VALORES MÉDIOS DE POROSIDADE TOTAL (α), VOLUME TOTAL E RELATIVO DE MACRO E MICROPOROS, E RELAÇÃO MACROPOROS/MICROPOROS NAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, NOS MUNICÍPIOS DE ARAPOTI, ITABERÁ E PONTA GROSSA.

Local	Camada	α ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	Volume de Microporos ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		Volume de Macroporos ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		Relação Macroporos / Microporos (adimensional)
			Total	Relativo	Total	Relativo	
Arapoti	0,0-0,10	0,51	0,29	0,57	0,22	0,43	0,75
	0,10-0,25	0,48	0,28	0,59	0,20	0,41	0,70
	0,25-0,40	0,46	0,28	0,61	0,18	0,39	0,64
Itaberá	0,0-0,10	0,56	0,40	0,71	0,16	0,29	0,41
	0,10-0,25	0,50	0,37	0,73	0,13	0,27	0,36
	0,25-0,40	0,56	0,39	0,70	0,17	0,30	0,43
Ponta Grossa	0,0-0,10	0,59	0,41	0,68	0,19	0,32	0,47
	0,10-0,25	0,53	0,38	0,72	0,15	0,28	0,39
	0,25-0,40	0,62	0,41	0,65	0,22	0,35	0,53

FONTE: A autora (2018)

A macroporosidade encontrada variou de 0,11 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ a 0,27 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para as três localidades (APÊNDICE 6). Em geral, os menores intervalos foram encontrados no município de Itaberá (0,11 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ a 0,21 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), seguido de Arapoti (0,13 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ a 0,27 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e Ponta Grossa (0,11 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ a 0,27 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Souza et al. (2017)

obtiveram os menores valores de macroporos em Ponta Grossa ($0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), seguido de Itaberá ($0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e Arapoti ($0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Os autores comentaram que obtiveram proporção de macroporos inferior à considerada ideal, e vincularam os resultados aos altos teores de argila (exceto Arapoti) associados à compactação nas camadas superiores dos solos estudados.

Os valores de macroporosidade de Arapoti e Ponta Grossa estão próximos aos obtidos por Secco et al. (2005), que ao estudarem um Latossolo Vermelho distrófico encontraram intervalo maior, variando de $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. O valor médio de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ observado em Itaberá é semelhante ao obtido por Queiroz (2013) na avaliação do Planossolo Háplico Distrófico espessarênico fragipânico ($0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). O solo Franco-Argilo arenoso de Arapoti apresentou maior volume de macroporos quando comparado aos solos argilosos do presente estudo. Resultado semelhante foi obtido por Rizzardi et al. (2014), que também encontraram maiores valores de macroporos na classe textural Franco-argilo arenosa em relação à classe Argilosa, em Argissolos da Bacia Hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, no Rio Grande do Sul.

Kiehl (1979) considera que o volume de macroporos ideal no solo para o desenvolvimento das culturas deve estar entre $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Vomocil e Flocker (1966) e Gupta e Larson (1982) comentam que valores de macroporos abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ podem proporcionar restrições nas atividades biológicas do solo e crescimento de raízes. No presente estudo, pode-se afirmar que os valores de macroporosidade da região estudada ficaram dentro dos limites considerados ideais para o crescimento do sistema radicular das culturas (TABELA 2.2).

A microporosidade variou de $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Arapoti) a $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Ponta Grossa) para as três localidades (APÊNDICE 6). Os valores médios obtidos foram $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Arapoti, $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Itaberá e $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Ponta Grossa (TABELA 2.2 e APÊNDICE 6). A microporosidade observada em Itaberá e Ponta Grossa foram próximos aos encontrados por Rizzardi et al. (2014), nas amostras de textura argilosa ($0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Ponta Grossa foi o município que apresentou os valores de microporosidade mais próximos aos recomendados na literatura (Hillel, 1970; Kiehl, 1979; Reichardt e

Timm, 2004). O município de Itaberá apresentou os valores mais próximos aos obtidos por Souza et al. (2017), para as mesmas localidades, sendo em média: $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Arapoti; $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Itaberá; e $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Ponta Grossa. Secco et al. (2005) encontraram valores de microporosidade inferiores ($0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Os elevados valores de microporosidade encontrados no município de Ponta Grossa podem auxiliar na disponibilidade de água para as culturas, uma vez que a água disponível para as plantas fica retida nestes poros do solo.

Freitas et al. (2014) comentam que os microporos predominam nos solos argilosos, enquanto os macroporos predominam nos solos arenosos, fato observado nas classes texturais analisadas no presente estudo. A predominância de microporos nos solos argilosos deve-se aos microagregados de partícula de argila. Nos solos arenosos ocorre o oposto, visto que possuem partículas maiores, espaço poroso constituído de maior diâmetro e menor quantidade de poros totais (Klein, 2005; Libardi, 2005). A maior incidência de microporos no solo é benéfica, pois além de serem responsáveis pela retenção de água no perfil, favorecem a difusão de nutrientes e fluxo de massa para as plantas (Brady, 1979; Bognola et al. 2010).

2.5.5 Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível

A umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) ficou compreendida entre $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (APÊNDICE 6). A média da θ_{cc} das camadas analisadas variou de $0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Arapoti, $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Itaberá e $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Ponta Grossa (TABELA 2.2). Souza et al. (2017) obteve o mesmo intervalo em Itaberá, maior intervalo em Arapoti ($0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e menor intervalo em Ponta Grossa ($0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Conforme esperado, a θ_{cc} foi maior nos solos argilosos (TABELA 2.2 e APÊNDICE 6). A θ_{cc} é maior em solos argilosos devido a maior área de superfície de contato e atuação de forças matriciais mais fortes (Farias et al., 2005; Schaetzel e Anderson, 2005). Os solos arenosos, devido ao maior volume de macroporos, como em Arapoti, perdem rapidamente a água pela ação da gravidade.

A umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) foi estimada com a equação de Van Genuchten (1980). Os parâmetros θ_r , θ_{sat} , α , m e n da equação foram obtidos com o *software* de pedotransferência SPLINTEX, versão 1.0. Na TABELA 2.5 encontram-se apresentados os valores dos parâmetros de ajuste da curva de retenção da água no solo (CRAS; α , m , n , θ_s , θ_r) estimados para as cinco glebas representativas, das três localidades avaliadas. A CRAS descreve a associação entre o conteúdo volumétrico e a energia com que a água está retida nas partículas orgânicas e minerais do solo (Silva, 2015), sendo importante para entender a disponibilidade de água às plantas (Koekkoek e Booltink, 1999).

Os valores de θ_{PMP} seguiram a mesma tendência da θ_{CC} , com maiores valores nos solos argilosos. Porém, a θ_{PMP} apresentou maior dispersão dos dados ($CV = 24,28\%$; TABELA 2.2), ficando compreendidos entre $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a Região dos Campos Gerais (APÊNDICE 6). A média dos valores de θ_{PMP} variou de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Arapoti, $0,26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Itaberá, e $0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Ponta Grossa (TABELA 2.2). Souza et al. (2017) observaram os mesmos intervalos no município de Arapoti. Em Itaberá e Ponta Grossa os valores também foram muito próximos, sendo o intervalo um pouco maior: $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Itaberá e $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em Ponta Grossa.

Assim como ocorre para a θ_{CC} , os valores de θ_{PMP} também são maiores em solos argilosos, devido a maior retenção de água nos microporos (Farias et al., 2005). Observou-se em Itaberá e Ponta Grossa que a θ_{PMP} foram maiores que Arapoti (APÊNDICE 6). Em Itaberá os valores de θ_{PMP} foram quase duas vezes maiores que em Arapoti (TABELA 2.2).

Os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} são importantes atributos para avaliar ou quantificar a capacidade dos solos em disponibilizar água às plantas. Para cada amostra de solo, o potencial matricial ψ_m (efeito combinado das forças de capilaridade e adsorção) tem um respectivo valor de θ . Um aumento gradual de tensão resulta em parte da água drenada e um esvaziamento de poros progressivamente menores. Em tensões muito altas, apenas poros muito pequenos conseguem reter água (Reichardt e Timm, 2004), diminuindo os valores de umidade volumétrica (FIGURA 2.2).

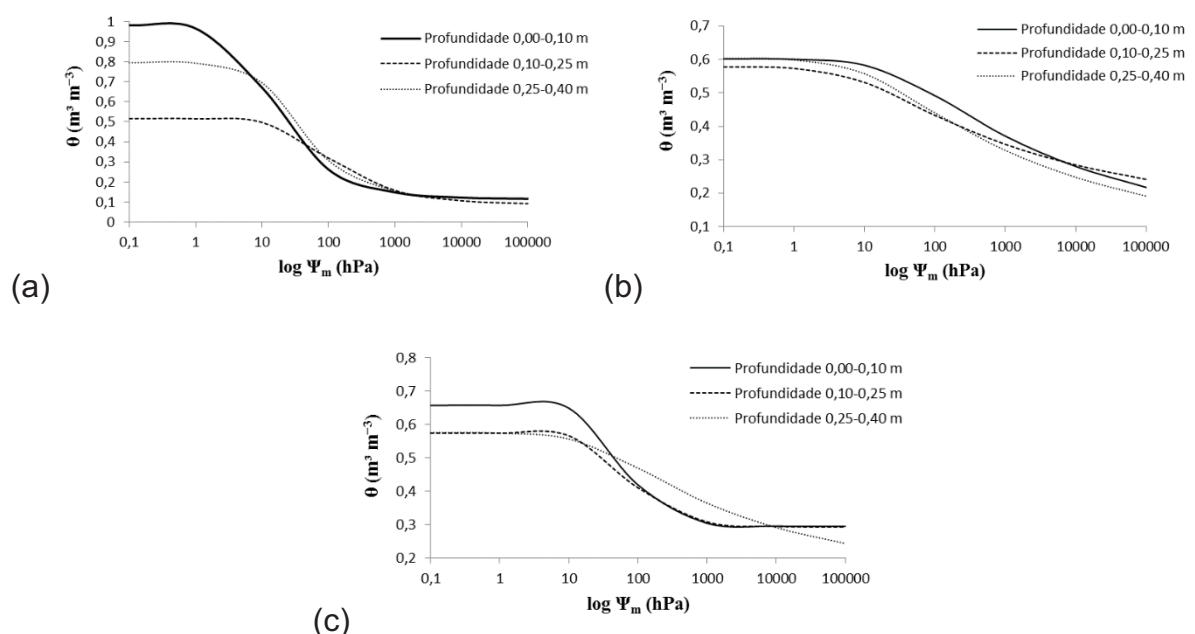
TABELA 2.5 – PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE VAN GENUNCHTEN (1980) AJUSTADOS PARA O LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO TÍPICO DO MUNICÍPIO DE ARAPOTI-PR, ITABERÁ-SP E PONTA GROSSA-PR.

Local/ Gleba	Camada (m)	----- Parâmetros da equação de Van Genunchten (1980) -----					
		α (cm ⁻¹)	n	M	θ_s (m ³ m ⁻³)	θ_r (m ³ m ⁻³)	r^2 *
----- Arapoti-PR -----							
Gleba 1	0,0-0,10	0,0196	1,8674	0,4645	0,5407	0,1161	0,9975
	0,10-0,25	0,1455	2,2515	0,5559	3,7339	0,1401	0,9573
	0,25-0,40	0,2138	2,1779	0,5408	2,6024	0,1765	0,9650
Gleba 2	0,0-0,10	0,1376	2,3067	0,5665	2,4505	0,1511	0,9582
	0,10-0,25	0,0289	1,6761	0,4034	0,5606	0,1089	0,8953
	0,25-0,40	0,1075	2,1521	0,5353	2,3554	0,1406	0,9601
Gleba 3	0,0-0,10	0,0170	1,1815	0,1536	0,3745	0,0639	0,7276
	0,10-0,25	0,0351	1,7550	0,4302	0,5271	0,1762	0,9989
	0,25-0,40	0,0893	2,0154	0,5038	1,1328	0,1948	0,9723
Gleba 4	0,0-0,10	0,0652	1,7417	0,4259	0,6926	0,1870	0,9999
	0,10-0,25	0,2358	2,1119	0,5265	2,3725	0,2028	0,9682
	0,25-0,40	0,0071	2,0171	0,5042	0,3945	0,1461	0,8960
Gleba 5	0,0-0,10	0,1586	1,6389	0,3898	0,9813	0,1144	0,9996
	0,10-0,25	0,0272	1,5421	0,3515	0,5158	0,0860	0,8505
	0,25-0,40	0,0656	1,6596	0,3974	0,7951	0,1127	0,9130
----- Itaberá-SP -----							
Gleba 1	0,0-0,10	0,0157	2,1052	0,5250	0,5615	0,2660	0,9984
	0,10-0,25	0,0182	2,0961	0,5229	0,5190	0,2703	0,9961
	0,25-0,40	0,0243	1,9491	0,4869	0,5393	0,2894	0,9974
Gleba 2	0,0-0,10	0,0361	1,1624	0,1397	0,6022	0,0794	0,8453
	0,10-0,25	0,1279	1,1566	0,1354	0,5788	0,1423	0,8671
	0,25-0,40	0,0940	1,1552	0,1344	0,6037	0,0599	0,8504
Gleba 3	0,0-0,10	0,0404	2,0600	0,5146	0,5951	0,3187	0,9973
	0,10-0,25	0,0226	1,9848	0,4962	0,5238	0,2956	0,9978
	0,25-0,40	0,0416	1,1981	0,1653	0,5478	0,1553	0,8512
Gleba 4	0,0-0,10	0,0194	2,0991	0,5236	0,5444	0,2835	0,9961
	0,10-0,25	0,0316	2,0340	0,5084	0,4870	0,2747	0,9977
	0,25-0,40	0,0245	2,0787	0,5189	0,5434	0,2967	0,9970
Gleba 5	0,0-0,10	0,0162	2,1232	0,5290	0,5275	0,2502	0,9984
	0,10-0,25	0,0141	2,0612	0,5148	0,4728	0,2342	0,9953
	0,25-0,40	0,0776	1,1874	0,1579	0,5744	0,1046	0,8952
----- Ponta Grossa-PR -----							
Gleba 1	0,0-0,10	0,0141	2,3320	0,5712	0,4829	0,2202	0,9977
	0,10-0,25	0,0292	2,2412	0,5538	0,4965	0,2462	0,9951
	0,25-0,40	0,1603	1,1879	0,1582	0,5240	0,0500	0,7866
Gleba 2	0,0-0,10	0,0108	2,4031	0,5839	0,6455	0,1399	0,9952
	0,10-0,25	0,0449	1,9008	0,4739	1,5621	0,1954	0,9645
	0,25-0,40	0,0142	1,1716	0,1465	0,5199	0,0880	0,7272
Gleba 3	0,0-0,10	0,0236	2,1556	0,5361	0,6578	0,2950	0,9980
	0,10-0,25	0,0234	1,9208	0,4794	0,5745	0,2926	0,9966
	0,25-0,40	0,0414	1,1867	0,1573	0,5763	0,1543	0,8490
Gleba 4	0,0-0,10	0,0320	1,2317	0,1881	0,6171	0,0846	0,9142
	0,10-0,25	0,0207	1,8998	0,4736	0,5706	0,2908	0,9966
	0,25-0,40	0,1646	1,1345	0,1185	0,6208	0,1257	0,7233
Gleba 5	0,0-0,10	0,0202	2,4426	0,5906	0,6118	0,2941	0,9966
	0,10-0,25	0,0805	1,1948	0,1630	0,5598	0,1065	0,8950
	0,25-0,40	0,3298	1,2061	0,1709	0,6434	0,0428	0,7509

* Coeficiente de determinação. FONTE: A autora (2018)

A tendência da CRAS reflete as classes de macro e microporos dos solos estudados. A primeira assíntota ocorreu sob baixos potenciais matriciais (FIGURA 2.2), sendo aproximadamente 1 hPa (1,0 cm H₂O) em Arapoti (FIGURA 2.2a), e 10,0 hPa em Itaberá (FIGURA 2.2b) e Ponta Grossa (FIGURA 2.2c). O resultado evidenciou que baixas tensões foram suficientes para ocasionar perda de água nos macroporos do solo, principalmente em Arapoti, em que há maior presença de macroporos em relação aos demais solos. É possível observar que os solos de textura Argilosa possuem capacidade de reter a água sob tensões mais elevadas que o solo Franco Argilo-arenoso, devido ao maior volume de microporos. No município de Itaberá, em que todas as amostras representativas apresentaram textura argilosa é possível observar que a tendência da CRAS é a mesma em todas as profundidades. Em Ponta Grossa, houve maior variação da CRAS quanto à tendência entre as profundidades, o que pode ter ocorrido pela presença de textura Franco Argilo-arenosa na localidade. A segunda assíntota ocorreu em potenciais entre 100 e 1000 hPa em Arapoti, e acima de 1000 hPa em Itaberá e Ponta Grossa, indicando que são necessárias tensões muito mais elevadas para diminuir o conteúdo volumétrico de água nos microporos, os quais retêm a água fortemente, principalmente nos solos predominantemente argilosos avaliados.

FIGURA 2.2 – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO OBTIDA PARA O MUNICÍPIO DA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS: a) ARAPOTI-PR; b) ITABERÁ-SP; E, c) PONTA GROSSA-PR.



FONTE: A autora (2018).

Até a profundidade de 0,40 m, a maior capacidade de água disponível média (*CAD*) ocorreu em Ponta Grossa-PR (*CAD* = 63,54 mm). Os menores valores médios de *CAD* ocorreram em Itaberá (*CAD* = 45,64 mm), devido ao menor intervalo entre a umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente, seguido de Arapoti (53,07 mm). Souza et al. (2017) encontram valores de *CAD* superiores para Arapoti (62,49 mm) e Itaberá (54,79 mm), e inferiores para Ponta Grossa (57,94 mm).

A *CAD* está relacionada com as características físicas do solo. A quantidade de água necessária para envolver as partículas de determinado solo depende de sua superfície específica, a qual é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas (Carlesso e Santos, 1999). Solos de textura argilosa apresentam maior valor de *CAD* do que solos de textura arenosa para a mesma profundidade (Farias et al., 2005). Desta forma esperava-se que o solo do município de Itaberá apresentasse maior *CAD* que Arapoti, mas foi observado o oposto. Acredita-se que a diferença esteja relacionada com a agregação das partículas, uma vez que alguns solos argilosos podem se comportar como arenosos quanto à retenção de água, por apresentar elevado índice de agregados (Adámoli et al., 1985). Em termos de armazenamento total de água observou-se maior *CAD* para o solo de textura Argilosa de Ponta Grossa, seguido do solo Frango Argilo-arenoso de Arapoti, seguido do solo Argiloso de Itaberá.

A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) foi o parâmetro que apresentou maior variabilidade nos solos estudados, com alta dispersão dos dados ($CV = 70,23\%$; TABELA 2.2). Foram observados (APÊNDICE 6) valores que variaram de $13,63 \text{ mm h}^{-1}$ (Ponta Grossa) a $1378,03 \text{ mm h}^{-1}$ (Arapoti). Os maiores valores para o município de Arapoti ocorreram nas amostras da camada superficial do solo (0,00-0,10 m), indicando maior quantidade de macroporos e conseqüentemente maior fluxo de água. A mesma tendência também foi observada nas camadas superficiais em Itaberá (0,25-0,40 m). Ponta Grossa apresentou menores valores de K_{sat} , porosidade total, macro e microporos na camada intermediária (0,10-0,25 m). Associado ao elevado valor de massa específica do solo (ρ_s), os resultados obtidos podem indicar resistência à penetração na camada 0,10-0,25 m em Ponta Grossa. O menor valor médio de K_{sat} ocorreu na camada 0,10-0,25 m no município de Itaberá (TABELA 2.2).

Os valores médios de K_{sat} obtidos foram de 357,8 mm h⁻¹ em Arapoti, 214,5 mm h⁻¹ em Itaberá e 330,9 mm h⁻¹ em Ponta Grossa (TABELA 2.2 e APÊNDICE 6). Souza et al. (2017) verificaram para as mesmas localidades valores 52,61 mm h⁻¹, 19,43 mm h⁻¹ e 29,34 mm h⁻¹, respectivamente.

As diferenças verificadas entre as K_{sat} obtidos no presente estudo e de Souza et al. (2017) podem ocorrer devido a uma série de motivos: *i)* As amostras de solo dos municípios de Arapoti e Ponta Grossa foram provenientes de glebas diferentes; *ii)* A metodologia de análise laboratorial utilizada na determinação da textura do solo e condutividade hidráulica saturada foram diferentes; e, *iii)* Assim como a infiltração da água no solo, a K_{sat} é um atributo do solo que apresenta muita variabilidade e seria natural a obtenção de resultados tão diferentes dos verificados em Souza et al. (2017).

Ao elevar o grau de agregação de um solo o valor da K_{sat} aumenta. Desta forma, a K_{sat} depende mais da estrutura do que da textura do solo. O aumento dos macroporos possibilita que o solo argiloso se comporte de forma semelhante a um arenoso quanto aos valores de K_{sat} (Gonçalves e Libardi, 2013). Os valores médios de macroporos e massa específica de partículas de solo (ρ_{ps}) foram semelhantes em Arapoti (textura Franco Argilo-arenosa) e Ponta Grossa (textura predominantemente argilosa), o que pode explicar a magnitude da média dos valores de K_{sat} encontrados nas duas localidades.

2.5.6 Correlações entre os atributos físico-hídricos avaliados

Em Arapoti (TABELA 2.6) ocorreu estreita correlação positiva entre a umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}) e o volume de microporos, fato também observado por Souza et al. (2017) e Andrade e Stone (2011). O conteúdo de argila e a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) também apresentou estreita correlação positiva, assim como o volume de macroporos com a porosidade total (α). Houve estreita correlação positiva entre a condutividade hidráulica saturada (K_{SAT}) com o conteúdo de macroporos. Observou-se estreita correlação negativa entre os teores de areia (grossa e total) com a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), e moderada correlação negativa entre os teores de areia (grossa e total) com o volume de microporos e umidade volumétrica na capacidade

de campo (θ_{CC}). Estreita correlação negativa também foi observada entre a porosidade total e a massa específica do solo (ρ_s). Não houve correlação entre os teores de argila e areia grossa com a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), bem como os teores de silte e areia grossa com a massa específica de partículas de solo (ρ_{ps}).

TABELA 2.6 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES ABSOLUTOS DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DOS SOLOS DO MUNICÍPIO DE ARAPOTI-PR, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

Especificação	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total	$\rho_s^{(1)}$	$\rho_{ps}^{(2)}$	$\alpha^{(3)}$	Micro-poros	Macro-poros	$\theta_{PMP}^{(4)}$	$\theta_{CC}^{(5)}$	$K_{sat}^{(6)}$
----- Arapoti-PR -----													
Argila													
Silte	-0,29												
Areia fina	-0,13	0,48											
Areia grossa	-0,90*	-0,11	-0,23										
Areia total	-0,96*	0,00	0,00	0,97*									
ρ_s	-0,34	-0,27	-0,01	0,43	0,44								
ρ_{ps}	0,03	0,00	-0,14	0,00	-0,04	0,05							
α	0,02	0,40	0,08	-0,16	-0,14	-0,83*	-0,08						
Microporos	0,48	0,39	0,19	-0,65	-0,62	-0,20	-0,20	0,04					
Macroporos	-0,21	0,17	-0,02	0,16	0,17	-0,65	0,02	0,88*	-0,43				
θ_{PMP}	0,88*	-0,11	-0,04	-0,86*	-0,89*	-0,67	-0,17	0,43	0,42	0,19			
θ_{CC}	0,48	0,39	0,19	-0,65	-0,62	-0,20	-0,20	0,04	1,00*	-0,43	0,42		
K_{sat}	0,00	0,11	-0,13	0,00	-0,03	-0,56	-0,28	0,79	-0,19	0,80*	0,36	-0,19	
----- Itaberá-SP -----													
Argila													
Silte	-0,67												
Areia fina	-0,23	0,24											
Areia grossa	-0,56	0,10	-0,62										
Areia total	-0,93*	0,36	0,18	0,66									
ρ_s	-0,42	0,11	-0,11	0,46	0,48								
ρ_{ps}	0,59	-0,11	-0,15	-0,43	-0,69	-0,11							
α	0,43	0,09	0,18	-0,60	-0,59	-0,55	0,07						
Microporos	0,21	0,23	0,39	-0,59	-0,37	-0,27	0,05	0,85*					
Macroporos	0,53	-0,06	-0,06	-0,46	-0,63	-0,67	0,07	0,88*	0,51				
θ_{PMP}	0,10	-0,49	0,03	0,07	0,12	0,14	0,26	-0,01	-0,04	0,02			
θ_{CC}	0,21	0,23	0,39	-0,59	-0,37	-0,27	0,05	0,85*	1,00*	0,51	-0,04		
K_{sat}	0,37	0,14	-0,08	-0,36	-0,54	-0,59	-0,13	0,57	0,24	0,73	-0,47	0,24	
----- Ponta Grossa-PR -----													
Argila													
Silte	-0,54												
Areia fina	-0,70	0,27											
Areia grossa	-0,88*	0,09	0,55										
Areia total	-0,91*	0,13	0,68	0,99*									
ρ_s	-0,75	0,17	0,70	0,76	0,80*								
ρ_{ps}	0,26	-0,18	-0,02	-0,24	-0,21	0,07							
α	0,63	-0,17	-0,51	-0,64	-0,66	-0,90*	-0,23						
Microporos	0,64	0,01	-0,46	-0,76	-0,76	-0,74	0,33	0,65					
Macroporos	0,25	-0,23	-0,25	-0,14	-0,17	-0,50	-0,60	0,72	-0,06				
θ_{PMP}	0,17	-0,13	0,27	-0,21	-0,13	0,14	0,21	0,05	0,20	-0,12			
θ_{CC}	0,64	0,01	-0,46	-0,76	-0,76	-0,74	0,33	0,65	1,00*	-0,06	0,20		
K_{sat}	0,17	0,11	-0,19	-0,25	-0,26	-0,35	-0,57	0,51	-0,04	0,71	0,07	-0,04	

LEGENDA: *Correlação significativa ($p > 0,05$); ⁽¹⁾ ρ_s – Massa específica do solo; ⁽²⁾ ρ_{ps} – Massa específica das partículas do solo; ⁽³⁾ α – Porosidade total; ⁽⁴⁾ θ_{PMP} – Umidade volumétrica no ponto de murcha permanente; ⁽⁵⁾ θ_{CC} – Umidade volumétrica na capacidade de campo; ⁽⁶⁾ K_{sat} – Condutividade hidráulica saturada. FONTE: A autora (2018).

Em Itaberá (TABELA 2.6) a maior correlação positiva foi entre o volume de microporos e a umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}). Também foi observada estreita correlação positiva entre a porosidade total (α) com o volume de

macroporos, microporos e umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}). Correlação negativa moderada ocorreu entre o conteúdo de areia grossa com a porosidade total (α). A areia total correlacionou-se de maneira moderada e negativa com a porosidade total (α). Forte correlação positiva ocorreu entre o volume de macroporos e condutividade hidráulica saturada (K_{sat}).

Em Ponta Grossa (TABELA 2.6) ocorreu à mesma tendência observada em Arapoti, apresentando estreita correlação positiva entre a umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) e o volume de microporos. Foi observada correlação positiva entre o conteúdo de areia com a massa específica do solo (ρ_s), sendo correlação forte com a areia total e moderada com areia fina e areia grossa. Estreita correlação negativa foi observada entre a porosidade total (α) e a massa específica do solo (ρ_s).

Em todas as áreas avaliadas, a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) teve forte a moderada associação positiva com o volume de macroporos. O resultado indica que quanto maior o espaço poroso ocupado pelos macroporos, maior fluxo de água e solutos ocorre no perfil do solo.

Os teores de areia total e argila apresentaram estreita correlação negativa para as três classes de solo avaliadas. O resultado é naturalmente esperado, uma vez que compõe a totalidade da textura do solo: quanto um dos valores cresce o outro tende a diminuir.

2.6 CONCLUSÕES

- A massa específica do solo variou de 1077,57 kg m⁻³ a 1648,74 kg m⁻³ na Região dos Campos Gerais. Todas as áreas avaliadas apresentam ρ_s dentro dos limites considerados adequados pela literatura.
- Os atributos físico-hídricos avaliados não evidenciaram restrições ao manejo de culturas na Região dos Campos Gerais.
- A associação positiva observada entre a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e o volume de macroporos indica que há elevado fluxo de água e solutos no perfil nas localidades avaliadas, principalmente no município de Arapoti.

2.7 REFERÊNCIAS

- ADÂMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L. G.; NETTO, J. M. Caracterização da região dos Cerrados. In: GOEDERT, W. J. **Solos dos cerrados. Tecnologias e estratégias de manejo**, 1985. Brasília: Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, 1985. p. 33-74.
- ALVAREZ, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, dez. 2013.
- ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 111-116, 2011.
- BARBOSA, J. dos S.; SILVA, K. do C. R.; CARDUCCI, C. E.; SANTOS, K. L. dos; KOHN, L. S.; FUCKS, J. S. Atributos físico-hídricos de um Cambissolo Húmico sob sistema agroflorestal no planalto catarinense. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017, 9p.
- BOGNOLA, I. A.; DEDECEK, R. A.; LAVORANTI, O. J.; HIGA, A. R. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de Pinus taeda. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, p. 37-49, 2010.
- BOUYOUCOS, G. J. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soil. **American Society of Agronomy Journal**, v. 43, p. 434-438, 1951.
- BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 5. ed. São Paulo: F. Bastos, 1979. 647 p.
- BROCH, D. T.; KLEIN, V. A. Maximum soil density of Entisols as a function of silt content. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 12, 2017, 7p.
- CARLESSO, R.; SANTOS, R. F. Disponibilidade de água às plantas de milho em solos de diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 17-25, 1999.
- CASTRO, M. A. de; CUNHA, F. F. da; LIMA, S. F. de; NETO, V. B. de P.; LEITE, A. P. MAGALHÃES, F. F.; CRUZ, G. H. M. da. Atributos físico-hídricos do solo ocupado com pastagem degradada e floresta nativa no Cerrado Sul-Matogrossense. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Ituiatuba, v. 3, n. 2, p. 498-512, jul./dec. 2012.
- CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. de; REIS, E. F. dos; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. de. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 147-157, 2009.
- CASTELLINI, M.; GIGLIO, L.; NIEDDA, M.; PALUMBO, A. D.; VENTRELLA, D. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 1-13, 2015.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212p.

FABIAN, A. J.; OTTONI FILHO, T. B. Determinação de capacidade de campo *in situ* ou através de equações de regressão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 1029-1036, mai. 2000.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Água em solos arenosos: estabelecimento de déficit hídrico em culturas. In: **XXVII REUNIÃO DE PESQUISAS DE SOJA DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL**, 2005. Cornélio Procópio: Embrapa Soja, 2005. p. 147-155.

FORSYTHE, W. **Física de suelos: Manual de laboratorio**. San José, Costa Rica: IICA, 1975. 212p.

FREITAS, L. de; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, V. M. R. de; OLIVEIRA, I. A de; MORETI, T. C. F. Avaliação de atributos químicos e físicos de solos com diferentes texturas sob vegetação nativa. In: **ENCICLOPÉDIA Biosfera**. Goiânia: Centro Científico Conhecer. 2014, v. 10, n. 18, p. 523.

FUNDAÇÃO ABC. Soluções tecnológicas para o agronegócio. Disponível em: <<http://www.fundacaoabc.org>>. Acesso em 16 set. 2017.

GARG, A.; LI, J.; HOU, J.; BERRETTA, C.; GARG, A. A new computational approach for estimation of wilting point for green infrastructure. **Measurement**, v. 111, p. 351-358, jul. 2017.

GIMENES, F. H. S. **Curva de retenção na avaliação da qualidade física do solo**. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2012.

GONÇALVES, A. D. M. de A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1174-1184, 2013.

GUBIANI, P.I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v. 36, p. 664-668, abr. 2006.

GUPTA, S. C., LARSON, W. E. Modeling Soil Mechanical Behavior During Tillage. IN: UNGER, P.; VAN DOREN JR, D. M.; WHISLER, F.D.; SKIDMORE, E.L. **Symposium on predicting tillage effects on soil physical properties and processes**. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America: ASA Special Publication 44, Madison, WI. p. 151-178, 1982.

HILLEL, D. **Solo e água: fenômeno e princípios físicos**. Porto alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 231p.

HUANG, M.; LIANG, T.; WANG, L.; ZHOU, C. Effects of no-tillage systems on soil physical properties and carbon sequestration under long-term wheat–maize double cropping system. **Catena**, Amsterdam, v. 128, P. 195-202, 2015.

KIEHL, J.E. **Manual de edafologia**. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KLEIN, V. A. **Propriedade do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira**. Passo Fundo: Ed. UPF, 2005. 61p.

KOEKKOEK, E. J. W.; BOOLTINK, H. Neural network models to predict **soil** water retention. **European Journal of Soil Science**, v. 50, p. 489-495, sep. 1999.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

LOSS, A.; SANTOS JUNIOR, E. dos.; SCHMITZ, D.; VEIGA, M. da.; KURTZ, C.; COMIN, J. J. Atributos físicos do solo em cultivo de cebola sob sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Colombiana de Ciências Hortícolas**, Bogotá, Colombia, v. 11, n. 1, p. 105-113, jan./jun. 2017.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 163-170, 2006.

MARTÍN, M. A.; REYES, M.; TAGUAS, J. Estimating soil bulk density with information metrics of soil texture. **Geoderma**, v. 287, p. 66-70, 2017.

OLIVEIRA, P. D. de; SATO, M. K.; LIMA, H. V. de; RODRIGUES, S.; SILVA, A. P.da. Critical limits of the degree of compactness and soil penetration resistance for the soybean crop in N Brazil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 179, p. 78-87, 2016.

PARDO, A.; AMATO, M.; CHIARANDÀ, F. Q. Relationships between soil structure, root distribution and water uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.). Plant growth and water distribution. **European Journal of Agronomy**, v. 13, p. 39-45, 2000.

PIEKARSKI, K. R. **Produtividade de soja e milho em plantio direto com o modelo Aquacrop na região dos Campos Gerais**. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

PREVEDELLO, C. L. Programa Splintex para estimar a curva de retenção de água a partir da granulometria (composição) do solo. Versão 1.0. Curitiba: UFPR, 1999.

QUEIROZ, A. F. de. **Caracterização e classificação de solos do município de Casa Nova-BA para fins de uso, manejo e conservação**. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2013.

RAMOS, B. Z.; PAIS, P. S. M.; FREITAS, W. A.; JUNIOR, M. S. D. Avaliação dos atributos físico-hídricos em um Latossolo Vermelho distroférrico sob diferentes sistemas de manejo – Lavras/Minas Gerais/Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 36, n. 3, p. 340-346, jul. 2013.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478p.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 14, n. 27, p. 29-48, jul./dez. 2003.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, mai. 2006, 30p.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. Falling head soil core (Tank) method. In: DANE, J.H.; TOPP, C. **Methods of soil analysis**. **Soil Science Society of America**, 2002, p. 809-812.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. da G. B. de F.; SAMPAIO, F. de M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, jul./ago. 2007.

RICHARDS, L. A.; WALDLEIGHT, C. H. Soil water and plant growth. In: **Soil physical conditions growth**. Ed. BT Shaw. Academic Press, New York. p. 73-251, 1952.

RIZZARDI, A. S.; RIGHES, A. A.; KEMERICH, D. da C.; SILVA, R. F. da; SANTOS, S. A. dos; BORBA, W. F. de. Atributos físicos e fluxo de água em solos da bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim – RS. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 13, n. 5, p. 3690-3701, 2014.

ROSA, H. A.; VELOSO, G.; SECCO, D.; RUFFATO, G. G.; MARCONDES, L. C.; SANTOS, R. F. Efeitos do tempo de adoção do sistema plantio direto em atributos físicos de um Latossolo argiloso. **Cascavel**, v. 5, n. 2, p. 165-174, 2012.

ROSSETTI, K. de V.; CENTURION, J.F. Sistemas de manejo e atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 5, p. 472-479, 2013.

RÜHLMANN, J.; KÖRSCHENS, M.; GRAEFE, J. A new approach to calculate the particle density of soils considering properties of the soil organic matter and the mineral matrix. **Geoderma**, v. 130, n. 3-4, p. 272-283, 2006.

SANTANA, S. C. **Indicadores físicos da qualidade de solos no monitoramento de pastagens degradadas da Região Sul do Tocantins**. 76 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2009.

SANTOS, F. C. dos; BARCELOS, A. C.; RODRIGUES, S. C. Distribuição de atributos físicos do solo sob vertente em ambiente de Cerrado nativo do Triângulo Mineiro. **Caderno de Geografia**, v. 25, n. 43, 2015.

SCHAETZEL, R. J.; ANDERSON, S. **Soils: Genesis and Geomorphology**. New York: Cambridge University Press, 2005, 817p.

SCHJØNNING, P.; MCBRIDE, R. A.; KELLER, T.; OBOU, P. B. Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. **Geoderma**, v. 286, p. 83-87, 2017.

SCHOENHOLTZ, S. H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J. A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, v. 138, p. 335-356, 2000.

SCHOONOVER, J. E.; CRIM, J. F. An Introduction to Soil Concepts and the Role of Soils in Watershed Management. **Journal of Contemporary Water Research e Education**, v. 154, n. 1, p. 21-47, 2015.

SECCO, D.; ROS, C. O. da; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 407-414, 2005.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 191-199, 2000.

SILVA, J. F. G.; SEVERIANO, E. da C.; COSTA, K. A. de P.; BENITES, V. de M.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. da S.; BENTO, J. C. Chemical and physical-hydric characterisation of a Red Latosol after five years of management during the summer between-crop season. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1576-1586, 2014.

SILVA, A. C. da. **Modelos de pedotransferência aplicados na simulação das funções hidráulicas e da variabilidade espacial do solo**. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF. Classification of Soil Texture Class Boundaries. In: **Soil Survey Manual**. U.S. Govt. Printing Office, 1993. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_031477.pdf>. Acesso em 19 dez. 2017.

SOUZA, G.S. de; SOUZA, Z.M. de; COOPER, M.; TORMENA, C.A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, v. 72, p. 270-277, may./jun. 2015.

SOUZA, J. L. M.; PIEKARSKI, K. R.; TSUKAHARA, R. Y.; GURSKI, B. C. Atributos físico-hídricos de solos no sistema de plantio direto, Região dos Campos Gerais. **Convibra Congresses Conferences**, 2017.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; RIBON, A. A. Physical properties of dystrophic red Latosol (Oxisol) under different agricultural uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 925-933, 2010.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

VAN LIER, Q. de J. Field capacity, a valid upper limit of crop available water?. **Agricultural Water Management**, v. 19, p. 214-220, nov. 2017.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentages of soils. **Science**, v. 68, p. 75-94, 1949.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction storage and movement of soil, air and water. **American Society of Agricultural Engineering**, v. 4, p. 242-246, 1966.

WARRICK, A. W. Appendix 1: Spatial variability. In Hillel D. **Environmental Soil Physics**. Academic Press, San Diego, p. 655-675, 1998.

3 CAPÍTULO II – SENSIBILIDADE DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DO TRIGO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, PARANÁ

3.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho realizar a análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo AquaCrop para a cultura do trigo na Região dos Campos Gerais. Foi utilizada a cultivar TBIO Sinuelo nos municípios de Castro, Ponta Grossa e Itaberá. Os parâmetros analisados referem-se à fenologia da cultura, transpiração, produção de biomassa, formação de rendimento, estresse e manejo do solo. A análise de sensibilidade foi realizada variando individualmente cada parâmetro de entrada, permanecendo os demais fixos, sendo calculado o Índice de Sensibilidade Relativo (IS). Os parâmetros mais sensíveis do modelo foram: índice de colheita de referência (HI_0); produtividade da água normalizada para evapotranspiração e concentração de CO_2 (WP^*); coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{CTR,x}$); níveis de fertilidade; e, máxima cobertura do dossel (CC_x). A maior sensibilidade de HI_0 e WP^* decorreu do fato de estarem diretamente relacionados às duas principais equações do AquaCrop, ligadas às estimativas da biomassa acumulada e formação de rendimento, respectivamente. Os níveis de fertilidade e a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) no município de Castro foram os parâmetros menos sensíveis nas análises. O ajuste dos parâmetros mais sensíveis por meio da calibração é recomendado para a cultura do trigo na Região dos Campos Gerais.

Palavras-chave: modelagem matemática; parâmetros; *Triticum aestivum*.

3.2 ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the sensitivity analysis of the AquaCrop model parameters for wheat crop in the Campos Gerais Region. The cultivar tested was TBIO Sinuelo in Castro, Ponta Grossa and Itaberá cities. The analyzed parameters refer to crop phenology, transpiration, biomass production, yield formation, stress and soil management. The sensitivity analysis was realized varying individually each input parameter, remaining the other fixed, being calculated the Relative Sensitivity Index (IS). The most sensitive parameters of the model were: reference harvest index (HI); water productivity normalized for evapotranspiration and CO_2 concentration (WP^*); crop coefficient when canopy expansion is complete ($K_{CTR,x}$); fertility levels; and maximum canopy cover (CC_x). The higher sensitivity of HI_o and WP^* is because they are directly related to two main equations of AquaCrop, linked to the estimates of accumulated biomass and yield formation, respectively. Fertility levels and saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) in the Castro city were the least sensitive parameters in the analyzes. The adjustment of the most sensitive parameters through calibration is recommended for the wheat crop in the Campos Gerais Region.

Keywords: mathematical modeling; parameters; *Triticum aestivum*.

3.3 INTRODUÇÃO

O principal objetivo do manejo de culturas agrícolas é suprir a demanda de alimentos no mundo. O Brasil destaca-se por ser o segundo maior fornecedor mundial de alimentos e produtos agrícolas (FAO, 2015; Paloschi, 2016). Vários são os fatores climáticos e ambientais que podem ocasionar perdas de produtividade. Desta forma, prever o fornecimento de grãos e cereais antes da colheita é fundamental para o planejamento agrícola e produção de alimentos.

O planejamento de cultivos agrícolas é uma questão estratégica importante. Na estimativa da produtividade o uso de modelos de simulação de rendimento podem auxiliar na previsão de safras e no entendimento das interações resultantes do sistema solo-planta-atmosfera. São ferramentas que consideram a combinação dos diversos fatores que influenciam a produtividade das culturas (Gomes et al., 2014). Assim, auxiliam na tomada de decisões e no planejamento de lavouras, prevendo o potencial produtivo das culturas em cenários distintos (FAO, 2000; Basso et al., 2013; Morell et al., 2016).

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

A acurácia de um modelo depende em grande parte dos parâmetros envolvidos, os quais descrevem as características resultantes dos dados de saída. A maioria dos modelos possui grande número de parâmetros de entrada. Assim, é importante que sejam identificados os parâmetros que mais influenciam os resultados de saída, bem como o que cada parâmetro provoca no modelo, visando a redução das incertezas do resultado final (Andriolo et al., 2008; Salemi et al., 2011).

Os valores dos parâmetros dos modelos estão sujeitos a alterações e erros (Pannel, 1997). A análise de sensibilidade é a investigação dessas mudanças. É um estudo e processo de análise que avalia o impacto provocado na saída do modelo, o que ocorre por variações feitas nos dados de entrada do programa (Baird, 1989; Marshall, 1999; Silva, 2002; Almeida, 2013; Lievens, 2014; Bouazzama et al., 2017).

Basicamente, a análise de sensibilidade consiste em alterar os valores dos parâmetros de maneira individual, mantendo os demais fixos, verificando a influência das variáveis nos resultados de produtividade parciais e finais. É uma análise que considera dados reais que são obtidos na literatura ou em experimentos previamente realizados a campo, com posterior observação da influência de cada variável nos resultados finais.

Marsaro (2013) considera que a análise de sensibilidade permite identificar em que ponto um modelo é mais sensível, dada à mudança de valores, resultando em diferentes propostas para as variáveis. É um estudo extremamente importante em modelos quantitativos, uma vez que alterações errôneas nos dados de entrada podem impactar no resultado final. Sendo assim, a análise de sensibilidade deve ser realizada visando identificar se conclusões preliminares oriundas de um modelo são robustas ou sensíveis a alterações (Belton e Stewart, 2002).

Simulações em modelos possibilitam identificar intervalos de confiança para os parâmetros (Moretti e Mendes, 2003; Taconeli e Barreto, 2003). Os parâmetros mais sensíveis de um modelo são na maioria das vezes utilizados no processo de calibração (Baltokoski et al., 2010; Cibin et al., 2010; Xing et al., 2017). Após identificar os parâmetros mais sensíveis e realizar a sua calibração é possível obter o máximo potencial do modelo. Desta forma, pode-se conduzir a melhor consistência dos dados gerados e sua aplicabilidade nos locais de estudo e/ou extrapolação para áreas que apresentem cenários semelhantes (Lelis et al., 2012).

A literatura é rica em exemplos de modelos matemáticos utilizados para manejar culturas agrícolas. Dentre os modelos, o AquaCrop vem sendo muito utilizado por sua simplicidade e resultados obtidos. A principal vantagem do AquaCrop deve-se ao menor número de parâmetros de entrada necessários, sendo dados de fácil obtenção (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2012; Piekarski, 2017). O AquaCrop é um modelo de crescimento de culturas desenvolvido pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), para abordar a segurança alimentar e avaliar o efeito do meio ambiente e práticas de gestão na produção agrícola. O programa simula a resposta ao rendimento de culturas herbáceas, sendo particularmente adequado para condições em que a água é um fator chave limitante da produção agrícola (FAO, 2018).

As principais funções presentes no modelo AquaCrop estão descritas em Raes et al. (2012a) e Raes et al (2018b). Devem ser submetidas à análise as variáveis sensíveis à penalização da produtividade potencial da cultura, as quais envolvem níveis de fertilização, cobertura do dossel, estresse hídrico, entre outras. Após a realização da análise de sensibilidade são obtidos os parâmetros mais sensíveis ao modelo. Posteriormente, parâmetros identificados como mais sensíveis podem ser ajustados no processo de calibração para estimar as produtividades simuladas o mais próximo do real.

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

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Caracterização da área de estudo

O presente trabalho foi realizado considerando a cultura do trigo. Foi submetida à análise de sensibilidade a cultivar TBIO Sinuelo, a qual foi selecionada de maneira aleatória entre todas as cultivares do banco de dados da Fundação ABC, com caracterização de ciclo médio a tardio, em três municípios da região dos Campos Gerais, cultivada no ano agrícola de 2014: Castro e Ponta Grossa, no Estado do Paraná; e, Itaberá, Estado de São Paulo.

Todas as parcelas experimentais utilizadas apresentam relevo plano à suave ondulado. O manejo adotado nas áreas foi plantio direto com cobertura vegetal residual proveniente da safra anterior. A classificação de solos foi previamente realizada pela Fundação ABC e os tipos climáticos listados conforme a classificação climática de Köppen (Alvarez et al., 2013), sendo *Cfa* e *Cfb*. A caracterização edafoclimática das áreas avaliadas estão dispostas na TABELA 3.1.

TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, LOCALIZADAS NOS MUNICÍPIOS DE CASTRO, ITABERÁ E PONTA GROSSA.

Localidade	Estado	Solo	Clima ⁽¹⁾	Latitude ----- (graus)	Longitude -----	Altitude (m)
Castro	Paraná	CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Cfa	24,85° S	49,93° W	1001
Itaberá	São Paulo	PLANOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Cfa	24,06° S	49,15° W	740
Ponta Grossa	Paraná	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	Cfb	25,30° S	49,95° W	908

⁽¹⁾ Adaptado de Álvares et al. (2013). FONTE: A autora (2018)

3.4.2 Descrição do modelo AquaCrop

As simulações com a cultura do trigo foram realizadas com o AquaCrop, Versão 6.0, desenvolvido por pesquisadores vinculados à *Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO* (FAO, 2018). O AquaCrop é constituído por dois grupos de parâmetros: conservativos e não conservativos. Os parâmetros conservativos são aqueles que não mudam em função de tempo, como: práticas de manejo, clima e localização geográfica. Os parâmetros não conservativos são aqueles que dependem do operador e variam conforme cultivar e manejo, destacando-se o ciclo da cultura, número de plantas por hectare, tempo entre a semeadura e emergência, entre outros. Foi realizada a análise de sensibilidade para os parâmetros conservativos e não conservativos presentes no modelo para verificar a resposta do modelo a alterações nos parâmetros de entrada.

O procedimento inicial para utilização do AquaCrop consistiu na inclusão dos dados de entrada no programa, os quais se referem à clima, cultura, manejo e solo. Os dados referentes ao clima, cultura e manejo foram provenientes do banco de dados da Fundação ABC, e os dados de solo foram obtidos em estudo anterior (Piekarski et al., 2017). O programa requer a inserção dos valores de latitude, longitude e altitude (TABELA 3.1).

Os dados de clima foram provenientes de cada uma das estações agrometeorológicas instaladas nas localidades avaliadas. Foram inseridos dados diários referentes à: precipitação (P ; mm dia⁻¹); temperatura máxima (T_x ; °C), mínima (T_n ; °C) e média (°C) diárias do ar; radiação solar incidente (R_s ; MJ m⁻² dia⁻¹); umidade relativa do ar (UR ; %); e, velocidade do vento (u_2 ; m s⁻¹) (APÊNDICE 7). O AquaCrop (versão 6.0) dispõe internamente dos valores de concentração de

CO₂ da atmosfera (ppm), obtidos do observatório de Mauna Loa, Havaí (Raes et al., 2009), bem como calcula automaticamente a demanda diária evaporativa da atmosfera expressa pela evapotranspiração de referência (ET_0 ; mm dia⁻¹), com o método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Os dados da cultura do trigo são provenientes dos protocolos do banco de dados da Fundação ABC (TABELA 3.2). Foram selecionadas safras com ausência de períodos de estiagem, para que o programa pudesse contabilizar apenas a influência direta dos parâmetros nos resultados finais. O AquaCrop (Versão 6.0) permite a inserção limiar da temperatura em graus dia de desenvolvimento (*Growing degree-days - GDD*) ou dias após plantio (*Calendar days*). Os valores dos parâmetros de temperatura de base superior e inferior da cultura do trigo não foram submetidos à análise de sensibilidade, pois o AquaCrop requer na aba valores em graus dia de desenvolvimento (*GDD*). Para a cultura do trigo foi utilizado nas simulações a opção dias após plantio (*Calendar Days*), em que o AquaCrop não contabiliza as temperaturas.

O AquaCrop não realiza balanço de nutrientes, sendo algo contabilizado por opções relacionadas à limitação de nutrientes. São disponíveis no programa as opções relacionadas à fertilidade: *i*) Não limitante, com 100% de biomassa relativa e nenhum estresse; *ii*) Próxima ao ideal, com 80% de biomassa relativa e 23% de estresse; *iii*) Moderada, com 59% de biomassa relativa e 41% de estresse; *iv*) Cerca de metade, com 50% de biomassa relativa e 50% de estresse; *v*) Pobre, com 40% de biomassa relativa e 58% de estresse; e, *vi*) Muito pobre, com 25% de biomassa relativa e 72% de estresse por fertilidade. Nas simulações a limitação é escolhida pelo usuário, sendo que cada opção resulta em alteração direta nos valores de CC_x , CGC , CDC e WP^* , e conseqüentemente, na produção de biomassa e grãos.

Na aba relacionada ao manejo (*Management*) o programa considera gerenciamento de campo (*Field*) e irrigação (*Irrigation*). A irrigação não foi considerada, por não haver a adoção da prática nos locais estudados. Para gerenciamento de campo, o nível de fertilidade (*Soil fertility*) foi considerado não limitante ao desenvolvimento da cultura e a cobertura vegetal (*Mulches*) foi considerada fixa em 75% de resíduo de material orgânico (palhada resultante da safra anterior). Na aba práticas conservacionistas de superfície (*Field surface practices*) foi considerado que o manejo adotado nas áreas não afetaram o

escoamento superficial e que não houve presença de plantas infestantes (*Weed management*).

TABELA 3.2 – DADOS DA CULTURA DO TRIGO, CULTIVAR TBIO SINUELO, OBTIDOS EM EXPERIMENTOS PRÉVIOS NA FUNDAÇÃO ABC, PARA AS LOCALIDADE DE CASTRO, ITABERÁ E PONTA GROSSA, PARA SEREM INSERIDOS NO PROGRAMA AQUACROP.

Dados do cultivo	-- Locais de cultivo da cultura do trigo, cultivar TBIO Sinuelo --		
	Castro	Ponta Grossa	Itaberá
Data de plantio	11/07/2014	16/06/2014	03/06/2014
Data de colheita	26/11/2014	27/10/2014	15/10/2014
Duração do ciclo fenológico (dias)	138	133	134
Emergência (<i>DAP*</i>)	7	7	7
Máxima cobertura (<i>DAP*</i>)	86	88	79
Florescimento (<i>DAP*</i>)	87	89	83
Duração do florescimento (<i>DAP*</i>)	9	13	17
Senescência (<i>DAP*</i>)	96	102	100
Maturidade (<i>DAP*</i>)	134	130	124
Estande (número de plantas)	3411800	2338200	2337100

LEGENDA: **DAP* – Dias Após Plantio. FONTE: Fundação ABC (2018).

Foram consideradas três camadas de solo (aba *Soil profile*) nas profundidades 0,00-0,10 m, 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m. Os dados de solo inseridos no programa foram obtidos em estudo anterior, realizado por Piekarski et al. (2017) (TABELA 3.3). Com os parâmetros inseridos, o AquaCrop deriva internamente e contabiliza a evaporação da camada superficial do solo, drenagem interna, percolação profunda, escoamento superficial e ascensão capilar.

TABELA 3.3 – ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DAS ÁREAS EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, INSERIDOS NA ABA SOLO DO AQUACROP, PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO PROGRAMA.

Localidade	Camada (m)	Textura	-- Conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) --			K_{sat} (mm dia $^{-1}$)
			$\theta_{PMP}^{(1)}$	$\theta_{CC}^{(2)}$	$\theta_{Sat}^{(3)}$	
Castro	0,00 – 0,10	Argilosa	0,36	0,50	0,63	418,32
Castro	0,10 – 0,25	Argilosa	0,33	0,47	0,60	368,23
Castro	0,25 – 0,40	Muito argilosa	0,32	0,45	0,62	325,74
Itaberá	0,00 – 0,10	Argilosa	0,28	0,40	0,55	516,46
Itaberá	0,10 – 0,25	Argilosa	0,24	0,37	0,54	462,25
Itaberá	0,25 – 0,40	Argilosa	0,22	0,37	0,54	420,37
Ponta Grossa	0,00 – 0,10	Argilo-arenosa	0,20	0,39	0,51	743,27
Ponta Grossa	0,10 – 0,25	Argilo-arenosa	0,20	0,35	0,50	732,57
Ponta Grossa	0,25 – 0,40	Argilo-arenosa	0,25	0,36	0,54	636,30

LEGENDA: ⁽¹⁾Umidade volumétrica ponto de murcha permanente; ⁽²⁾Umidade volumétrica capacidade de campo; ⁽³⁾Umidade volumétrica saturação. FONTE: Piekarski et al. (2017).

Para realizar as análises do balanço hídrico no AquaCrop é necessário selecionar o conteúdo inicial de água no solo (aba *Initial conditions*). O programa fornece quatro opções: *i*) Umidade na saturação (macro e microporos saturados); *ii*) Umidade na capacidade de campo (100% dos microporos saturados); *iii*) Umidade no ponto de murcha permanente (sem água nos microporos); e, *iv*) Água disponível em 50%, considerado o intervalo entre capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Para as simulações foi considerada a água disponível (*TAW – Total Available Water*), que é a capacidade de retenção de água na zona radicular.

Os valores atribuídos aos parâmetros relacionados à cultura do trigo basearam-se em sugestões dispostas na literatura, conforme Raes et al. (2017). Valores para dias até a emergência; coeficiente de crescimento (*CGC*) e declínio (*CDC*) do dossel; tempo da sementeira até a senescência; ciclo da cultura; e, tempo e duração do florescimento, são encontrados na literatura em escala de graus dia de desenvolvimento. Na realização do presente estudo, a opção selecionada para as simulações foi em dias após plantio. Desta forma, foi estabelecido o valor de 8,0% dia⁻¹ para o coeficiente de declínio do dossel (*CDC*) e considerado intervalos (em dias) observados a campo para os demais parâmetros das cultivares (tempo da sementeira até a emergência, até a o início da senescência, até o início e duração do florescimento e ciclo da cultura). O coeficiente de crescimento do dossel (*CGC*) foi ajustado automaticamente no AquaCrop, baseando-se na data de ocorrência da máxima expansão do dossel da cultura. Segundo Raes et al. (2017), a cobertura inicial do solo com 90% de emergência de plântulas (*CC_o*) é de 1,5% para a cultura do trigo. Nas simulações, também foram considerados outros valores, pois a *CC_o* é automaticamente determinada considerando o número de plantas/hectare selecionado no programa, os quais seguiram o protocolo de dados da Fundação ABC. Raes et al. (2017) também consideram a profundidade mínima e máxima efetiva do sistema radicular para a cultura do trigo em 0,3 m e 2,4 m, respectivamente. Nas análises considerou-se a profundidade mínima efetiva de 0,1 m e máxima de 0,3 m, para contabilizar a área radicular nas profundidades avaliadas (0,00-0,40 m). Os dados utilizados nas simulações na aba *Crop* do programa estão dispostos na TABELA 3.4.

TABELA 3.4 – DADOS DE ENTRADA DA CULTURA E MANEJO UTILIZADOS PARA OS PARÂMETROS DO MODELO AQUACROP, PARA A CULTURA DO TRIGO NAS TRÊS ÁREAS AVALIADAS.

Símbolo	Descrição	Castro	Itaberá	Ponta Grossa
----- Fenologia da Cultura -----				
CC_o	Cobertura inicial do solo com 90% de emergência de plântulas (%) ⁽²⁾	17,06	11,69	11,69
	Número de plantas por hectare ⁽³⁾	3,41.10 ⁶	2,33.10 ⁶	2,33.10 ⁶
	Tempo da semeadura a emergência (dias) ⁽³⁾	7	7	7
CGC	Coefficiente de crescimento do dossel (% dia ⁻¹) ⁽¹⁾	5,7	6,3	5,6
CC_x	Máxima cobertura do dossel (%) ⁽³⁾	85	86	89
	Tempo da semeadura a senescência (dias) ⁽⁴⁾	96	100	102
CDC	Coefficiente de declínio do dossel (% dia ⁻¹) ⁽¹⁾	8,0	8,0	8
	Ciclo da cultura ⁽⁴⁾	138	134	133
	Tempo da semeadura ao florescimento (dias) ⁽⁴⁾	87	83	89
	Duração do florescimento (dias) ⁽⁴⁾	9	17	13
$Z_{mín}$	Profundidade mínima efetiva do sistema radicular (m) ⁽³⁾	0,1	0,1	0,1
$Z_{máx}$	Profundidade máxima efetiva do sistema radicular (m) ⁽³⁾	0,3	0,3	0,3
	Fator descrevendo a expansão da zona radicular ⁽¹⁾	1,5	1,5	1,5
----- Transpiração da Cultura -----				
$K_{CTR,x}$	Coefficiente da cultura com completa expansão do dossel ⁽¹⁾	1,10	1,10	1,10
	Coefficiente de declínio da cultura como resultado da idade, deficiência de nitrogênio, entre outros (% dia ⁻¹) ⁽¹⁾	0,15	0,15	0,15
Ke	Efeito da cobertura do dossel na redução da evaporação do solo no último estágio da cultura (%) ⁽¹⁾	50,0	50,0	50,0
----- Produção de Biomassa -----				
<i>Produtividade de água da cultura</i>				
WP^*	Produtividade de água normalizada para ET_o e CO_2 (g m ⁻²) ⁽¹⁾	15	15	15
	Produtividade de água normalizada para ET_o e CO_2 durante a formação de rendimento (%) ⁽¹⁾	100	100	100
----- Formação de Rendimento -----				
HI_o	Índice de colheita de referência (%) ⁽⁴⁾	50	50	50
	Possível incremento no HI devido ao estresse hídrico antes do florescimento ⁽¹⁾	Pequeno	Pequeno	Pequeno
	Excesso de frutos potenciais (%) ⁽²⁾	Médio	Médio	Médio
	Coefficiente descrevendo o impacto positivo da restrição do crescimento vegetativo durante a formação de rendimento no HI ⁽¹⁾	Pequeno	Pequeno	Pequeno
	Coefficiente descrevendo o impacto negativo do fechamento estomático durante a formação de rendimento no HI ⁽¹⁾	Moderado	Moderado	Moderado
	Máximo aumento permitido do HI especificado (%) ⁽¹⁾	15,0	15,0	15,0
----- Estresse -----				
<i>Estresse hídrico do solo</i>				
$p_{exp,lower}$	Limite superior de depleção da água no solo para expansão do dossel ⁽¹⁾	0,20	0,20	0,20
$p_{exp,upper}$	Limite inferior de depleção da água no solo para expansão do dossel ⁽¹⁾	0,65	0,65	0,65
	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel ⁽¹⁾	5,00	5,00	5,00
p_{sto}	Limite superior de depleção da água no solo para controle estomático ⁽¹⁾	0,65	0,65	0,65
	Fator do coeficiente de estresse hídrico para controle estomático ⁽¹⁾	2,50	2,50	2,50
p_{sen}	Limite superior de depleção da água no solo para senescência do dossel ⁽¹⁾	0,70	0,70	0,70
	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel ⁽¹⁾	2,50	2,50	2,50
p_{pol}	Limite superior de depleção de água no solo para falhar a polinização ⁽¹⁾	0,85	0,85	0,85
	Volume (%) no ponto anaerobiótico (com referência para saturação ^(4,3))	5,00	5,00	5,00
<i>Estresse pela temperatura do ar</i>				
	Mínima temperatura do ar abaixo da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo frio; °C) ⁽¹⁾	5,0	5,0	5,0
	Máxima temperatura do ar acima da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo calor; °C) ⁽¹⁾	35,0	35,0	35,0
	Mínimo em graus requerido para completa produção de biomassa (°C dia ⁻¹) ⁽¹⁾	14,0	14,0	14,0
----- Manejo do Solo -----				
	Fertilidade ⁽³⁾	100%	100%	100%
	Cobertura do solo com restos vegetais orgânicos ⁽³⁾	75%	75%	75%

LEGENDA: ⁽¹⁾Conservativo geralmente aplicável; ⁽²⁾Conservativo para determinada espécie, mas pode ser para uma cultivar específica; ⁽³⁾Dependente do ambiente e/ou manejo; ⁽⁴⁾Cultivar específica.
 FONTE: Raes et al. (2017) e Fundação ABC (2018).

A máxima cobertura do dossel (CC_x) foi considerada 85% e o índice de colheita de referência (HI_o) de 50% para realização das simulações. O mínimo requerido para completa produção de biomassa foi contabilizado como 14 °C dia^{-1} . O estresse por salinidade não foi considerado. A calibração para o estresse por fertilidade do solo (aba *Crop*) foi ajustada para as opções do programa, sendo elas: *i*) Condições de produção de biomassa próxima ao ideal; *ii*) Máxima cobertura do dossel próxima a cultura de referência (ausência de estresse); e, *iii*) O declínio do dossel na estação foi considerado pequeno.

3.4.3 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada para os parâmetros conservativos e não conservativos do AquaCrop (TABELA 3.4), considerando as localidades de Castro, Itaberá e Ponta Grossa. O procedimento foi realizado variando individualmente cada parâmetro de entrada, permanecendo os demais fixos. Como critério de análise foi adotando o Índice de Sensibilidade Relativo (IS), proposto por Silva et al. (2009) (Equação 3.1):

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

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

O resultado da Equação 3.1 indica que quanto maior (em módulo) o índice obtido, mais sensível o modelo é ao parâmetro. Valores próximos a zero indicam que o modelo não apresenta sensibilidade (Silva, et al., 2009).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O índice de sensibilidade dos parâmetros do programa e seus respectivos *rankings* estão dispostos na TABELA 3.5. Nas três localidades avaliadas a maior sensibilidade foi encontrada para o índice de colheita de referência (HI_o). Além deste, mostraram-se fortemente sensíveis os parâmetros: produtividade de água normalizada para ET_o e CO_2 , (WP^*); coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{CTR,x}$); máxima cobertura do dossel (CC_x); e, níveis de fertilidade.

O coeficiente de declínio do dossel (CDC) apresentou a maior sensibilidade no município de Castro (FIGURA 3.1). As simulações foram realizadas em períodos de ausência de déficit hídrico nas três localidades, para contabilizar a sensibilidade dos parâmetros em condições ideais de desenvolvimento da cultura.

3.5.1 Fenologia da cultura

A cobertura do dossel (CC) está diretamente ligada à produção de biomassa, uma vez que sua expansão, maturação e senescência em conjunto com a condutância estomática determinam a quantidade de água transpirada (Steduto et al., 2012). A curva que representa a fase inicial a CC é equivalente à cobertura do solo com 90% de emergência das plantas (CC_o). Em seguida a curva tem tendência exponencial, a qual é regida pela Equação 3.2:

$$CC = CC_o \cdot e^{t \cdot CGC} \quad (3.2)$$

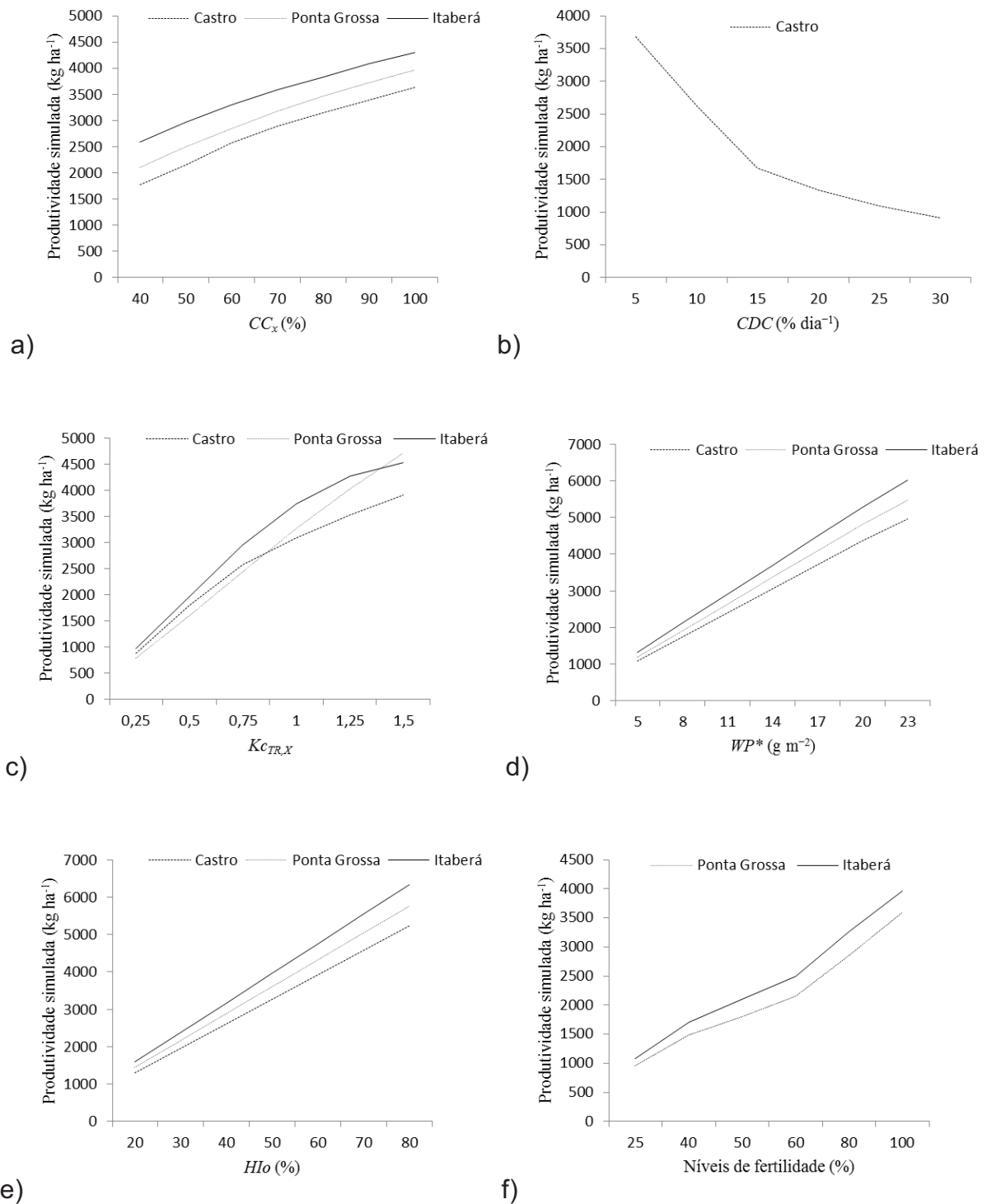
Sendo: CC – cobertura fracionada do solo pelo dossel em ótimas condições (%) no tempo t ; CC_o – cobertura inicial do dossel com 90% de emergência das plantas (%); CGC – coeficiente de crescimento do dossel (% dia⁻¹); t – tempo (dias) (Steduto et al., 2012; Raes et al., 2018c).

TABELA 3.5 – PARÂMETROS AVALIADOS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE COM O MODELO AQUACROP, RESPECTIVOS ÍNDICES DE SENSIBILIDADE RELATIVO (*IS*), POSIÇÃO NA QUAL CADA PARÂMETRO SE TORNA MAIS OU MENOS SENSÍVEL (*RANKING*) E DIFERENÇA EM KILOGRAMA, CONSIDERANDO O MAIOR E MENOR VALOR ATRIBUÍDO AO PARÂMETRO PARA A CULTIVAR TBIO SINUELO, NAS LOCALIDADES DE CASTRO-PR, PONTA GROSSA-PR E ITABERÁ-SP.

Parâmetro	----- Castro -----			----- Itaberá -----			----- Ponta Grossa -----		
	<i>IS</i>	<i>Ranking</i>	Diferença (kg ha ⁻¹)	<i>IS</i>	<i>Ranking</i>	Diferença (kg ha ⁻¹)	<i>IS</i>	<i>Ranking</i>	Diferença (kg ha ⁻¹)
----- Fenologia da cultura (Dossel e zona Radicular) -----									
<i>CC₀</i> : Cobertura inicial do solo com 90% de emergência de plântulas (%) ⁽²⁾	0,07	11	-226	0,10	11	-474	0,07	10	-306
<i>CC_x</i> : Máxima cobertura do dossel (%) ⁽³⁾	0,76	4	-1758	0,58	5	-1703	0,72	5	-1840
<i>CDC</i> : Coeficiente de declínio do dossel (% dia ⁻¹) ⁽¹⁾	0,74	5	2873	0,35	7	1818	0,52	7	2309
<i>Z_{mín}</i> : Profundidade mínima do sistema radicular (m) ⁽³⁾	0,00	20	-1	0,01	17	-28	0,00	23	0
<i>Z_{máx}</i> : Profundidade máxima do sistema radicular (m) ⁽³⁾	0,19	9	-746	0,10	12	-436	0,00	16	17
Fator de expansão da zona radicular ⁽¹⁾	0,00	23	0	0,00	19	-21	0,00	23	0
----- Transpiração da cultura e do solo -----									
<i>K_{CTR,x}</i> : Coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ⁽¹⁾	0,88	3	-3003	0,91	4	-3561	1,00	2	-3912
Coeficiente de declínio da cultura como resultado de idade, deficiência, entre outros (% dia ⁻¹) ⁽¹⁾	0,08	10	506	0,19	9	1270	0,18	8	1122
<i>Ke</i> : Efeito da cobertura do dossel na redução da evaporação do solo no último estágio da cultura (%) ⁽¹⁾	0,00	19	-9	0,00	23	0	0,00	22	-3
----- Produção de biomassa e formação de rendimento -----									
<i>WP*</i> : Produtividade da água normalizada para <i>ET₀</i> e CO ₂ (g m ⁻²) ⁽¹⁾	0,98	2	-7021	0,98	2	-8515	0,98	3	-7737
Produtividade da água normalizada para <i>ET₀</i> e CO ₂ durante a formação de rendimento (%) ⁽¹⁾	0,00	18	-16	0,00	21	-19	0,00	20	-18
<i>HI₀</i> : Índice de colheita de referência (%) ⁽⁴⁾	1,00	1	-32561	1,00	1	-39490	1,00	1	-35883
Máximo aumento permitido do <i>HI</i> especificado (%) ⁽¹⁾	0,00	23	0	0,00	23	0	0,01	14	-44
----- Estresse -----									
<i>p_{exp,lower}</i> : Limite superior de depleção da água no solo para expansão do dossel ⁽¹⁾	0,01	16	44	0,01	18	-24	0,01	15	18
<i>p_{exp,upper}</i> : Limite inferior de depleção da água no solo para expansão do dossel ⁽¹⁾	0,00	22	-1	0,00	22	10	0,00	18	25
Fator do coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel ⁽¹⁾	0,00	21	2	0,00	20	31	0,00	21	6
<i>p_{sto}</i> : Limite superior de depleção da água no solo para controle estomático ⁽¹⁾	0,03	12	165	0,01	14	85	0,04	11	-199
Fator do coeficiente de estresse hídrico para controle estomático ⁽¹⁾	0,03	14	-194	0,02	13	-122	0,00	19	-20
<i>p_{sen}</i> : Limite superior de depleção da água no solo para senescência do dossel ⁽¹⁾	0,01	17	-46	0,11	10	-533	0,02	13	-75
Fator do coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel ⁽¹⁾	0,00	23	0	0,00	23	0	0,00	23	0
<i>p_{pol}</i> : Limite superior de depleção de água no solo para falhar a polinização ⁽¹⁾	0,00	23	0	0,00	23	0	0,00	23	0
Volume (%) no ponto anaeróbico (com referência para saturação) ^{(4), (3)}	0,03	13	196	0,01	15	111	0,02	12	122
Mínima temperatura do ar abaixo da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo frio) (°C) ⁽¹⁾	0,00	23	0	0,19	8	1272	0,16	9	990
Máxima temperatura do ar acima da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo calor) (°C) ⁽¹⁾	0,21	8	-260	0,00	23	0	0,00	23	0
Mínimo em graus requerido para completa produção de biomassa (°C dia ⁻¹) ⁽¹⁾	0,43	7	3329	0,39	6	3099	0,55	6	5104
----- Manejo do solo -----									
Níveis de fertilidade ⁽³⁾	0,56	6	-1653	0,96	3	-2889	0,97	4	-2644
Cobertura do solo com restos vegetais orgânicos ⁽³⁾	0,02	15	-158	0,01	16	-56	0,00	17	-31

LEGENDA: ⁽¹⁾Conservativo geralmente aplicável; ⁽²⁾Conservativo para determinada espécie, mas pode ser para uma cultivar específica; ⁽³⁾Dependente do ambiente e/ou manejo; ⁽⁴⁾Cultivar específica.
 FONTE: A autora (2018).

FIGURA 3.1 – VARIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE SIMULADA DA CULTURA DO TRIGO NO AQUACROP, PARA AS LOCALIDADES DE CASTRO, PONTA GROSSA E ITABERÁ, POR MEIO DO AJUSTE DOS PARÂMETROS MAIS SENSÍVEIS AO MODELO, SENDO: a) MÁXIMA COBERTURA DO DOSSEL (CC_x ; %); b) COEFICIENTE DE DECLÍNIO DO DOSSEL (CDC ; % dia⁻¹); c) COEFICIENTE DA CULTURA COM COMPLETA EXPANSÃO DO DOSSEL ($Kc_{TR,x}$; adimensional); d) ÍNDICE DE PRODUTIVIDADE DE ÁGUA NORMALIZADA (WP^* ; g m⁻²); e) ÍNDICE DE COLHEITA DE REFERÊNCIA (Hl_0 ; %); E, f) NÍVEIS DE FERTILIDADE DO SOLO (%).



FONTE: A autora (2018).

A Equação 3.2 baseia-se no crescimento do dossel com cobertura do solo ainda esparsa. À medida que a cultura cresce, a cobertura do dossel fica cada vez maior. Ao atingir o máximo desenvolvimento a CC passa a ser igual à máxima cobertura do dossel (CC_x). Nesta fase, a captura de radiação e produção de fotoassimilados na fotossíntese tende a diminuir devido ao sombreamento mútuo da cultura. Sendo assim, a Equação 3.2 já não se aplica e a CC segue a equação de decaimento exponencial (Equação 3.3):

$$CC = CC_x - 0,25 \frac{(CC_x)^2}{CC_o} \cdot e^{-t \cdot CGC} \quad (3.3)$$

Sendo: CC – cobertura fracionada do solo pelo dossel em ótimas condições (%), no tempo t ; CC_o – cobertura fracionada do solo pelo dossel em ótimas condições no tempo $t = 0$ (%); CC_x – máxima cobertura do dossel (%); CGC – coeficiente de crescimento do dossel (% dia⁻¹); t – tempo (dias) (Raes et al., 2018c).

À medida que a cultura se aproxima da maturidade o CC entra em declínio em decorrência da senescência da folha. O declínio é caracterizado por um coeficiente empírico denominado coeficiente de declínio do dossel (CDC). É a etapa em que a CC é regida pela Equação 3.4:

$$CC = CC_x \cdot \left[1 - 0,05 \cdot \left(e^{\frac{3,33 \cdot CDC}{CC_x + 2,29} \cdot t} - 1 \right) \right] \quad (3.4)$$

Sendo: CC – cobertura fracionada do solo pelo dossel em ótimas condições (%), no tempo t ; CC_x – máxima cobertura fracionada do dossel no início da senescência em $t = 0$ (%); CDC – coeficiente de declínio do dossel (% dia⁻¹); t – tempo (dias) (Raes et al., 2018c).

O CC_x é determinado no programa baseando-se na densidade de plantio, sendo dependente do ambiente e manejo adotado (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2011; Steduto et al., 2012; Dalla Marta et al., 2016; Raes et al., 2018c). A sensibilidade do parâmetro deve-se a sua participação em duas principais equações que determinam a cobertura do dossel da cultura. O CC_x se mostrou mais sensível no município de Castro ($IS = 0,76$; *Ranking* 4), seguido de Ponta Grossa ($IS = 0,72$; *Ranking* 5) e Itaberá ($IS = 0,58$; *Ranking* 5) (FIGURA 3.1a). Oliveira, (2017) avaliando a sensibilidade dos parâmetros do AquaCrop para a cultura do milho no

município de Castro, com o mesmo método de análise proposto no presente estudo, também encontrou sensibilidade do parâmetro CC_x na 4ª posição do *Ranking*. Lievens (2014), com o método de Geerts et al. (2009), realizando análise de sensibilidade para soja e milho doce no nordeste da Tailândia, verificaram que o CC_x é altamente sensível a alterações no programa. Razzaghi et al. (2017) também observaram alta sensibilidade do CC_x com o AquaCrop para a cultura da batata na Dinamarca.

O coeficiente de declínio do dossel (*CDC*) apresentou sensibilidade considerável para a cultura do trigo apenas no município de Castro ($IS = 0,74$; *Ranking* 5; TABELA 3.5 e FIGURA 3.1b). A sensibilidade do parâmetro está relacionada com a sua participação na Equação 3.4, responsável pelo declínio do dossel por meio da senescência. Xing et al. (2017) ao avaliar a sensibilidade dos parâmetros do AquaCrop para o trigo no inverno, com o método *Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test* (EFAST), em Pequim, na China, sob diferentes regimes hídricos, verificaram que o *CDC* foi um dos parâmetros mais sensíveis no modelo, em condições de irrigação normal e excessiva, e somente chuva. Vanuytrecht et al. (2014), com o método EFAST, também verificou sensibilidade no *CDC* para milho e trigo de inverno em condições climáticas do noroeste da Bélgica, e para arroz no sudeste do Vietnã. Silvestro et al. (2017), utilizando os métodos EFAST e MORRIS para realizarem a análise de sensibilidade em três diferentes condições climáticas, sendo duas na China e uma na Itália, verificaram o que *CDC* apresentou pouca influência na produtividade final, quando comparados à outros parâmetros. Lievens (2014) também verificou que o *CDC* teve pouca influência nos resultados com simulações para milho doce, pois a colheita da cultura foi realizada somente três dias após o início da senescência. No entanto, o autor observou alta sensibilidade do parâmetro para a cultura da soja, em que o tempo entre início da senescência e colheita foi maior. No presente estudo, a sensibilidade do *CDC* observada no município de Castro foi atribuída a maior duração do ciclo fenológico da cultivar (TABELA 3.2). O intervalo entre senescência e maturidade foi mais longo (38 dias) quando comparado às demais localidades. Assim, o programa contabilizou por mais tempo a influência do parâmetro no rendimento final da cultura.

Os demais parâmetros referentes à fenologia não apresentaram sensibilidade considerável (TABELA 3.5). Alterações significativas em seus valores de entrada

não resultaram em diferenças relevantes nos dados de saída do programa, principalmente no “Fator de expansão da zona radicular” e na “Profundidade mínima do sistema radicular” (Z_{min}).

3.5.2 Transpiração da cultura

A transpiração da cultura (Tr) em condições adequadas de água no solo é proporcional ao crescimento efetivo do dossel (CC). O fator de proporcionalidade da transpiração no programa é conhecido como $K_{CTR,x}$, que é o coeficiente quando a cultura apresenta expansão completa do dossel ($CC = 1$) e não está em condição de estresse. O $K_{CTR,x}$ é um parâmetro considerado conservativo e aproximadamente equivalente ao coeficiente basal da cultura na meia estação, nos casos de completa expansão do dossel (Raes et al., 2012c; Dalla Marta et al., 2016; Raes et al., 2018b; Raes et al., 2018c). O parâmetro $K_{CTR,x}$ apresentou sensibilidade ao programa (TABELA 3.5; FIGURA 3.1c), sendo mais sensível em Ponta Grossa ($IS = 1,00$; *Ranking* 2), Itaberá ($IS = 0,91$; *Ranking* = 4) e Castro ($IS = 0,88$; *Ranking* 3).

A transpiração da cultura (Tr) depende da área coberta pelo dossel (CC) quando não há estresse para limitar a abertura estomática (Equação 3.5). Quando o solo está completamente coberto pelo dossel da cultura, ou seja, quando o CC está próximo ou igual a 1,0, o programa multiplica o valor do $K_{CTR,x}$ pela cobertura efetiva do dossel ajustada para efeitos de microadvecção e evapotranspiração de referência (ET_o), resultando nos valores de transpiração da cultura (Tr) (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2012).

$$Tr = CC^* \cdot K_{CTR,x} \cdot ET_o \quad (3.5)$$

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

Segundo Martins (2017) e Raes et al. (2018c) o $K_{CTR,x}$ é proporcional ao CC , e por esse motivo é continuamente ajustado no decorrer do ciclo da cultura. Quando ocorre estresse hídrico no solo, além do desenvolvimento do dossel ser afetado, o

programa também pode induzir o fechamento dos estômatos (Equação 3.6). Todo o mecanismo ocorre por meio do coeficiente de estresse para fechamento estomático (K_{Ssto}), interferindo na transpiração da cultura, uma vez que os valores p_{upper} e p_{lower} do parâmetro K_{Ssto} (que é o limite superior de depleção da água no solo para controle estomático) não apresenta sensibilidade significativa (p_{sto} ; TABELA 3.5).

$$Tr = K_s . K_{STr} . (CC^* . K_{CTR,x}) . ETo \quad (3.6)$$

Sendo: Tr – transpiração da cultura (mm); K_s – coeficiente de estresse hídrico responsável pela redução da transpiração da cultura quando a disponibilidade hídrica é insuficiente para atender a demanda evaporativa da atmosfera (adimensional); K_{STr} – coeficiente de estresse pela temperatura (adimensional); CC^* – fração da superfície de solo coberta pelo dossel, ajustada para efeitos de microadvecção (% dia⁻¹); $K_{CTR,x}$ – coeficiente da cultura com completa expansão do dossel (adimensional); ETo – evapotranspiração de referência (mm) (Raes et al., 2018a).

Oliveira (2017) observou maior sensibilidade dos parâmetros do AquaCrop para o $K_{CTR,x}$, na cultura do milho, em Castro. Xing et al. (2017) também observou sensibilidade para o trigo no inverno na China, estando o $K_{CTR,x}$ entre os parâmetros mais sensíveis ao modelo, tanto na estimativa de biomassa acumulada quanto no rendimento final. Lievens (2014) verificou alta sensibilidade do $K_{CTR,x}$ para a cultura da soja e moderada sensibilidade para o milho doce na Tailândia. Razzaghi et al. (2017) também obtiveram alta sensibilidade para o parâmetro com a cultura da batata. Salemi et al. (2011) observaram sensibilidade moderada no trigo de inverno no Irã, e Vanuytrecht et al. (2014) verificaram baixo impacto no rendimento final de grãos com alteração nos valores de $K_{CTR,x}$. Silvestro et al. (2017) verificaram maior influência do $K_{CTR,x}$ em Yangling, na China, em que os valores de temperatura e evapotranspiração foram mais altas em todas as estações do ano avaliadas. Como a transpiração da cultura (Tr) é influenciada pelo clima da região no momento do ciclo (precipitação, temperatura, radiação solar incidente, evapotranspiração, umidade relativa e velocidade do vento), pode-se considerar que a intensidade da sensibilidade do parâmetro $K_{CTR,x}$ depende do ambiente em análise, explicando a variação da sensibilidade em diversos locais.

A sensibilidade do parâmetro $K_{CTR,x}$ deve-se a sua ligação direta com a transpiração da cultura (Tr), fazendo parte de uma das duas principais equações que regem o programa AquaCrop (Equação 3.7), a qual determina a biomassa acumulada da cultura.

$$B = WP^* \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Tr_i}{ETo_i} \quad (3.7)$$

Sendo: B – biomassa acumulada (kg ha^{-1}); WP^* – parâmetro de produção pela água normalizada para ETo e CO_2 (g m^{-2}); Tr_i – transpiração da cultura no i -ésimo intervalo de período (mm); ETo_i – evapotranspiração de referência no i -ésimo intervalo de período (mm); n – período considerado (unidade) (Raes et al., 2018a; Raes et al., 2018c).

O coeficiente de evaporação do solo para superfície de solo totalmente úmido (Ke) é um parâmetro que praticamente não apresenta sensibilidade no programa. Desta forma, sua calibração não é viável, uma vez que grandes alterações no valor não interferem significativamente no rendimento final simulado.

3.5.3 Produção de biomassa e formação de rendimento

A produtividade de água normalizada (WP^*) apresentou alta sensibilidade, com $IS = 0,98$ para todas as localidades, resultando em *Ranking* 2 em Castro e Itaberá (TABELA 3.5; FIGURA 3.1d), e *Ranking* 3 em Ponta Grossa (TABELA 3.5).

O WP^* baseia-se na demanda evaporativa atmosférica (ETo) e concentração de CO_2 na atmosfera. O programa contabiliza o WP^* pela Equação 3.8, refletindo diretamente na produção de biomassa acumulada (Equação 3.7), e conseqüentemente no rendimento final de grãos (Equação 3.9):

$$WP^* = \left[\frac{B}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Tr_i}{ETo_i} \right)} \right]_{[\text{CO}_2]} \quad (3.8)$$

Sendo: WP^* – parâmetro de produção pela 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); ET_{o_i} – evapotranspiração de referência no i -ésimo dia (mm) (Steduto et al., 2009; Steduto et al., 2012).

Assim como o $K_{CTR,x}$, a sensibilidade do WP^* é em função da sua participação na equação para a determinação da biomassa acumulada (Equação 3.7), sendo uma das principais equações do AquaCrop. Oliveira (2017) avaliando a cultura do milho em Castro obteve $IS = 0,88$ para o WP^* . Xing et al. (2017), Lievens (2014) e Razzaghi et al. (2017) também observaram sensibilidade para o WP^* . Vanuytrecht et al. (2014) encontrou sensibilidade do WP^* apenas para a cultura do arroz e Silvestro et al. (2017) para o trigo, principalmente em Yangling (China) e Viterbo (Itália). A sensibilidade do WP^* obtida por Salemi et al. (2011) foi moderada. Bouazzama et al. (2017), no Instituto Nacional de Pesquisa em Marrocos, verificaram que o WP^* foi altamente sensível na simulação do rendimento final do trigo e, juntamente com a profundidade máxima efetiva do sistema radicular, foram os parâmetros mais sensíveis ao AquaCrop à produção de biomassa.

O índice de colheita de referência (HI_o) foi o parâmetro que se mostrou mais sensível no AquaCrop, com $IS = 1,00$ para todas as localidades (TABELA 3.5; FIGURA 3.1e). Considerando os menores e maiores valores adotados aos parâmetros durante as simulações foram observadas diferenças superiores a 30000 kg. O HI_o apresentou alta sensibilidade por ser integrante da segunda principal equação do programa. Junto com a equação de determinação da biomassa acumulada (Equação 3.7), o índice de colheita de referência determina a formação do rendimento da cultura em grãos (Equação 3.9):

$$Y = f_{HI} \cdot HI_o \cdot B \quad (3.9)$$

Sendo: Y – produtividade da cultura (kg ha^{-1}); HI_o – índice de colheita de referência da cultura (adimensional); f_{HI} – fator de multiplicação que ajusta o índice de colheita a partir do valor de referência, podendo ser positivo ($f_{HI} > 1$) ou negativo ($f_{HI} < 1$) (adimensional), ajustado apenas em condições de estresse hídrico ou de temperatura; B – biomassa acumulada (kg ha^{-1}) (Raes et al., 2018a; Raes et al., 2018c).

Oliveira, (2017) obteve $IS = 1,00$ para o HI_o da cultura do milho em Castro. Na análise de sensibilidade de Xing et al. (2017) o HI_o ficou na terceira posição de sensibilidade para o rendimento final de grãos, considerando simulação com entrada

de água apenas por precipitação pluviométrica. Para Lievens (2014) a sensibilidade foi alta, tanto para soja quanto para milho doce. Silvestro et al. (2017) observou maior sensibilidade do HI_o em Viterbo na Itália. O HI_o também se mostrou sensível nas simulações realizadas por Bouazzama et al. (2017) e Razzaghi et al. (2017).

Steduto et al. (2012) descreve que o HI_o é considerado um parâmetro conservativo para a maioria das cultivares de alto rendimento. Porém, algumas cultivares podem necessitar de ajustes para obter melhores resultados no programa (Silvestro et al., 2017). O AquaCrop é um modelo água-cultura muito sensível ao estresse hídrico. Os efeitos da ausência de água afetam diretamente o índice de colheita de referência (HI_o). Um dos principais impactos negativos da estiagem na produtividade simulada ocorre na polinização e formação do embrião. Em caso de estresse hídrico severo e longo há redução do HI_o e conseqüente queda de rendimento (Steduto et al., 2012).

3.5.4 Estresse

3.5.4.1 Resposta ao estresse hídrico

As respostas do programa para a perda de água são indicadas pelo estresse por depleção na zona radicular, expressas como fator p da água disponível no solo. O coeficiente de estresse (K_s) varia de zero (p_{lower} – estresse máximo) a 1 (p_{upper} – ausência de estresse). O AquaCrop considera os coeficientes p_{upper} e p_{lower} para as seguintes situações: *i*) Expansão do dossel; *ii*) Fechamento estomático; *iii*) Senescência do dossel; *iv*) Polinização; e, *v*) Falta de aeração. Os baixos valores do *Ranking* obtidos para o fator p nas análises de sensibilidade indicaram que não são necessários ajustes. Mesmo em condições de estresse hídrico, a análise de sensibilidade não indicou alterações significativas nos resultados de produtividade simulada para estes parâmetros. Farahani et al. (2009) analisando a sensibilidade de alguns parâmetros do AquaCrop para a cultura do algodão obtiveram baixa sensibilidade para o $K_{S_{sto}}$. O $K_{S_{sto}}$ apresenta pouca importância na calibração, pois o AquaCrop ajusta automaticamente seus valores, baseando-se na evapotranspiração diária da cultura nos locais avaliados.

3.5.4.2 Resposta ao estresse pelo ar

Os efeitos do estresse pela temperatura do ar no AquaCrop são contabilizados em graus dia. Raes et al. (2017) considera que 5 °C é a temperatura mínima do ar abaixo da qual o início da polinização começa a falhar (estresse pelo frio), e 35 °C é a temperatura máxima (estresse pelo calor). Durante o período de florescimento, não foram observadas temperaturas abaixo de 5 °C ou acima de 35 °C no período analisado, nas três localidades avaliadas nos Campos Gerais. A baixa sensibilidade observada nestes parâmetros não indicou necessidade de calibração.

3.5.5 Manejo do solo

A fertilidade do solo se mostrou sensível para todas as localidades (TABELA 3.5; FIGURA 3.1f), principalmente Ponta Grossa ($IS = 0,97$; *Ranking* 4) e Itaberá ($IS = 0,96$; *Ranking* 3), resultando em diferenças de 2644 kg ha⁻¹ e 2889 kg ha⁻¹, respectivamente. Oliveira, (2017) também observou sensibilidade para a fertilidade do solo com a cultura do milho em Castro. O AquaCrop é um programa direcionado pelo balanço hídrico do solo e, desta forma, a menor sensibilidade obtida para o município de Castro ($IS = 0,56$; *Ranking* 6) está atribuída ao menor valor médio de condutividade hidráulica saturada (K_{sat} ; TABELA 3.3). A menor K_{sat} está diretamente relacionada ao menor fluxo de água ao longo do perfil, disponibilizando por maior intervalo de tempo o conteúdo de água na zona radicular. Como o estresse por fertilidade também está relacionado ao conteúdo de água no perfil (Steduto et al., 2012), pela disponibilidade de solutos, ocorreu menor sensibilidade do parâmetro quando comparado às demais localidades. Ponta Grossa apresentou a maior média de condutividade hidráulica saturada (TABELA 3.3) e, conseqüentemente, maior sensibilidade no programa ($IS = 0,97$; TABELA 3.5).

A fertilidade do solo, assim como os atributos físicos, também depende do ambiente ou manejo adotado na área de estudo. Desta forma, os valores não podem ser pré-estabelecidos em um único intervalo (Steduto et al., 2012).

A cobertura do solo por restos vegetais possui baixa sensibilidade no programa, pois não interfere diretamente na produtividade final da cultura. Sua função está relacionada apenas no controle da evaporação da água do solo (E).

Os parâmetros referentes aos atributos físicos do solo, os quais se destacam a umidade volumétrica na capacidade de campo, ponto de murcha permanente, saturação e condutividade hidráulica saturada, dependem do ambiente em que a cultura se encontra ou do manejo adotado. Estes parâmetros não foram submetidos à análise de sensibilidade uma vez que foram inseridos no programa baseando-se nos valores observados em análise laboratorial.

3.6 CONCLUSÕES

- O índice de colheita de referência (HI_o) foi o parâmetro que apresentou maior sensibilidade no AquaCrop para a cultura do trigo, nos municípios de Castro e Ponta Grossa, Estado do Paraná e Itaberá, Estado de São Paulo;
- A produtividade da água normalizada para ET_o e CO_2 (WP^*), coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{CTR,x}$), níveis de fertilidade e máxima cobertura do dossel (CC_x) também são sensíveis para as três localidades avaliadas.
- A menor sensibilidade relacionada aos níveis de fertilidade observada no município de Castro deveu-se à menor média de condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), observada no município.
- A análise de sensibilidade realizada considerou condições hídricas adequadas ao desenvolvimento da cultura, o que pode ter refletido nos baixos índices observados aos parâmetros relacionados ao estresse hídrico.

3.7 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper, 56**, Rome: FAO, 1998. 300 p.

ANDRIOLO, M. V.; SANTOS, I.; GIBERTONI, R. C.; CAMARGO, A. S. G. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 2008, Belo Horizonte. **Anais do VI SPMCH**. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2008. v. 1, 18p.

ALMEIDA, A. T. **Processos de decisões nas organizações**: Construindo modelo de decisão multicritério. 1ª Edição. São Paulo: Atlas, 2013. 256 p.

ALVAREZ, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BASSO, B.; CAMMARANO, D.; CARFAGNA, E. Review of crop yield forecasting methods and early warning systems. In: Proceedings of the First Meeting of the Scientific Advisory Committee of the Global Strategy to Improve Agricultural and Rural Statistics. **FAO Headquarters**, Rome, Italy, p. 18–19, 2013.

BELTON, V.; STEWART, T. **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach**. Kluwer Academic Publishers, 2002, 372 p.

BAIRD, B. F. Managerial Decisions Under Uncertainty: An Introduction to the Analysis of Decision Making. **Wiley Series In Engineering & Technology Management**. New York. 1989, 544p.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M.H.F.; MACHADO, R.E. & OLIVEIRA, M.P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro - Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 253-261, 2010.

BOUAZZAMA, B.; KARROU, M.; BOUTFIRASS, M.; BAHRI, A. Assessment of Aquacrop model in the simulation of durum wheat (*Triticum aestivum* L.) growth and yield under different water regimes. **Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires**, v. 5, n. 3, p. 222-230, 2017.

CIBIN R.; SUDHEER, K.P.; CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 1133-1148, 2010.

DALLA MARTA, A.; NATALI, F.; ORLANDINI, S. **Serbia for excel: Aquacrop the FAO crop-model to simulate yield response to water**. Department of Agrifood Production and Environmental Sciences University of Firenze, Italy. Novi Sad, Serbia. 2016, 125p. Disponível em: <http://serbiaforexcell.com/upload/dokumenta/1501521354-AquaCrop_short.pdf> Acesso em 09 out. 2017.

FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS, T. Y. Parameterization and Evaluation of the Aquacrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 469-476, 2009.

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

Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015-2024**. In: BRAZILIAN AGRICULTURE: PROSPECTS AND CHALLENGES. 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i4738e.pdf>>. Acesso em 02 mar. 2018.

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

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

GOMES, A. C. dos S.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; SOARES, F. C.; PARIZI, A. R. C. Modelo para estimativa da produtividade para a cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 1, p. 43-49, jan. 2014.

LELIS, T.A.; CALIJURI, M.L.; SANTIAGO, A.F.; LIMA, D.C.; ROCHA, E.O. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, 12p., 2012.

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

MARSARO, M. F. **Estudo de robustez e análise de sensibilidade no modelo multicritério para gerenciamento de risco em gasodutos baseado em MAUT**. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2013.

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

MARTINS, M. A. **Estimativa da produtividade da cultura do milho no semiárido brasileiro, com base no modelo Aquacrop e previsão climática sazonal**. Tese 115 f. (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2017.

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

MORETTI, A. R.; MENDES, B. V. de M. Sobre a precisão das estimativas de máxima verossimilhança nas distribuições bivariadas de valores extremos. **Pesquisa Operacional**, v. 23, n. 2, mai./ago. 2003.

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

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

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

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

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

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

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

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**: Chapter 2: Users guide. Version 4.0. Rome, Italy. FAO, 2012a, 164p.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**: Chapter 3: Calculation procedures. Version 4.0. Rome, Italy. FAO, 2012b, 125p.

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

RAES, D. STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**: Chapter 1: FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water. Version 6.0 - 6.1. Rome, Italy. FAO, 2018a, 19p.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**: Chapter 2: Users guide. Version 6.0 – 6.1. Rome, Italy. FAO, 2018b, 302p.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**: Chapter 3: Calculation procedures. Version 6.0 - 6.1. Rome, Italy. FAO, 2018c, 141p.

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

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

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

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

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

SILVA, J. M. A. **Modelo hidrológico para o cálculo do balanço hídrico e obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas: desenvolvimento e aplicação**. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Viçosa, 2002.

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

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

TACONELI, C. A.; BARRETO, M. C. M. Intervalos de confiança para a média populacional usando amostragem em conjuntos ordenados. **Revista de Matemática e Estatística**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 41-66, 2003.

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

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

4 CAPÍTULO III – CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP NA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO TRIGO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, BRASIL

4.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho calibrar e validar o modelo AquaCrop - FAO para seis cultivares de trigo, na Região dos Campos Gerais, Estados do Paraná e São Paulo. Foram calibradas e validadas as cultivares de trigo Quartzo, Supera, TBIO Sinuelo, TBIO Sossego, TBIO Tibagi e TBIO Toruk, nos municípios de Castro-PR, Ponta Grossa-PR e Itaberá-SP, para um período de 11 anos de dados de produtividade, referente as safras 2007 a 2017. Os dados de entrada no AquaCrop, referente à clima, cultura, solo e manejo do solo, tiveram procedência diversa: coletados a campo; obtidos do banco de dados da Fundação ABC; e, provenientes da literatura. Aleatoriamente, entre 35% a 50% do total das safras foram selecionadas para realizar a calibração, e as demais foram utilizadas na validação. A calibração foi realizada para os parâmetros mais sensíveis à penalização da produtividade potencial da cultura. As produtividades simuladas foram comparadas com as observadas a campo por meio de análises de regressão linear simples, erros absolutos (Ea), relativos (Er), coeficiente de determinação (r^2), correlação de Pearson (r), índice de concordância (d) e desempenho (c). A calibração apresentou resultados excelentes, com os índices de concordância " d " = 1 para todas as cultivares e localidades. Na validação foram obtidos desempenhos "Ótimo" e "Muito bom" para as cultivares Supera e Quartzo em Castro. Em Ponta Grossa o desempenho variou entre "Mau" a "Ótimo" para todas as cultivares. Os parâmetros calibrados não se mostraram adequados na validação da cultura do trigo no município de Itaberá, resultando em desempenho "Péssimo" para todas as cultivares. O resultado provavelmente deveu-se ao número insuficiente de safras na calibração, associado a período de estiagem nas safras validadas no município.

Palavras-chave: Modelagem matemática, *Triticum aestivum*, produtividade, desempenho.

4.2 ABSTRACT

The objective of this study was to calibrate and validate the AquaCrop-FAO model for six wheat cultivars, in the Campos Gerais Region, in Paraná and São Paulo State. The wheat cultivars Quartzo, Supera, TBIO Sinuelo, TBIO Sossego, TBIO Tibagi and TBIO Toruk were calibrated and validated in Castro-PR, Ponta Grossa-PR and Itaberá-SP cities, for a period of 11 years of productivity data, referring the 2007 to 2017 harvest. The input data on AquaCrop, referring to climate, crop, soil and soil management, had diverse provenance: from field observations; ABC Foundation database; and, from the literature. At random, between 35% and 50% of the total harvests were selected to perform the calibration, and the remaining were used in the validation. Calibration was performed for the most sensitive parameters to the potential penalty productivity of the crop. The simulated yields were compared to those observed in the field in simple linear regression analyzes, absolute errors (Ea), relative (Er), determination coefficient (r^2), Pearson correlation (r), concordance (d) and performance (c) indexes. Calibration showed excellent results, with concordance indices " d " = 1 for all cultivars and locations. The performances obtained in the validation were "Great" and "Very good" for the cultivars Supera and Quartzo in Castro. In Ponta Grossa the performance ranged from "Bad" to "Great" for all cultivars. The calibrated parameters were not adequate for wheat validation in Itaberá city, resulting in "Poor" performance for all cultivars. The result was probably related to the insufficient number of harvests in the calibration, associated to drought periods on harvests validations at this location.

Keywords: Mathematical modeling, *Triticum aestivum*, crop yield, performance.

4.3 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é amplamente cultivado em todo o mundo (Tao et al., 2018), sendo o terceiro cereal de maior importância econômica mundial (Gooding, 2009; Bouazzama et al., 2017). É fonte básica de alimento para mais de um terço da população mundial (Kumar et al., 2014) e extremamente adaptável a diversas condições climáticas, sob diferentes latitudes e altitudes (Curtis et al., 2002; Bouazzama et al., 2017).

A utilização de cultivares de trigo de alto potencial produtivo, associado às condições edafoclimáticas brasileiras, favorecem altos rendimentos e expansão da cultura no país (Buzetti e Teixeira, 2014). No Estado do Paraná, é a cultura de inverno mais importante, atingindo cerca de 1,081 milhão de hectares de área plantada na safra 2015/2016, com produção de 3,3 milhões de toneladas (CONAB, 2017).

No Estado do Paraná a região dos Campos Gerais destaca-se pelo potencial produtivo agrícola acima da média nacional (Shimandei et al., 2008; Pierri et al., 2016). A região é pioneira na adoção de novas tecnologias que permitem aumentar ainda mais o rendimento dos produtos agrícolas. Porém, mesmo sendo um grande potencial produtivo, os Campos Gerais necessita de estudos que permitam identificar melhores alternativas de plantio e manejo de culturas agrícolas.

Prever o rendimento das culturas antes da implantação na lavoura no campo é um fator chave na disponibilidade de alimentos. Para tal, a utilização de modelos de estimativa de rendimento é uma excelente alternativa, porque permite a realização de uma série de testes, aproveitando dados já coletados na região, envolvendo poucas pessoas e baixo custo. O entendimento do sistema solo-planta-atmosfera por meio da modelagem, vem sendo cada vez mais importante para os pesquisadores (Jin et al., 2014). Porém, a utilização de modelos na maioria das vezes é muito complexa. A grande dificuldade na realização das simulações consiste no levantamento ou disponibilidade dos dados de entrada, que geralmente são de difícil obtenção e custo elevado. Na busca de soluções para estas limitações a *Food and Agriculture Organization* (FAO) desenvolveu o modelo de cultivo denominado AquaCrop (Raes et al., 2009a; Raes et al., 2011; Steduto et al., 2012; Raes et al., 2018a).

O AquaCrop é um modelo de simulação que descreve a interação entre o solo e as plantas (Raes, 2017a), buscando alcançar equilíbrio entre precisão, simplicidade e robustez, para simular o rendimento de culturas herbáceas em cenários distintos. Além disso, o AquaCrop tem apresentado bons resultados quanto à precisão, requerendo relativamente poucos parâmetros de entrada, os quais são explícitos e intuitivos (Foster et al., 2017), de fácil obtenção e baixo custo. O modelo é capaz de simular com exatidão a formação de biomassa e o rendimento da cultura em diferentes condições hídricas e de fertilidade (Jin et al., 2014).

Para aumentar a confiança e reduzir as incertezas de um modelo, obtendo o máximo da sua potencialidade, os parâmetros devem ser submetidos ao processo de calibração (Angulo et al., 2013; He et al., 2017). A calibração consiste em ajustar o valor dos parâmetros de entrada para que os resultados simulados do programa se assemelhem ao máximo aos reais, observados a campo. Os parâmetros são estabelecidos por meio de medições locais e utilizados como ponto de partida para a validação do modelo (Trombetta et al., 2016). Já o processo de validação considera a qualidade dos dados de saída (Van Vliet et al., 2016), indicando se a calibração foi adequada nas condições estudadas. Em modelos de simulação agrícola, as safras utilizadas na calibração e validação devem ser distintas.

O AquaCrop possui valores padrão para os parâmetros de diversas culturas, os quais já foram pré-estabelecidos baseando-se em experimentos realizados com cultivares de alto potencial de rendimento, sob condições ideais de crescimento e na ausência de estresse (Hsiao et al., 2012; Raes et al., 2012; Steduto et al., 2012). No entanto, alguns parâmetros necessitam ajustes para as condições locais de estudo, cultivares e/ou práticas de manejo das culturas (Silva et al., 2018).

O modelo AquaCrop já foi calibrado e validado para diversas culturas e locais, e sua precisão foi amplamente confirmada: Geerts et al. (2009) trabalhou com a cultura da quinoa, na Bolívia; Salemi et al. (2011) e Mohammadi et al. (2016) com o trigo de inverno, no Irã; Maniruzzaman et al. (2015) com o arroz, em Bangladesh; Bello e Walker (2016) com o milho; Darko et al. (2016) com o tomate; Ezekiel et al. (2016) com o milho; Mirsafi et al. (2016) com o açafrão; Montoya et al. (2016) com a batata; Pareek et al. (2017) com o trigo na Índia; e, Silva et al. (2018) com soja. Porém, não há estudos que comprovem a eficiência do AquaCrop em simular o rendimento da cultura do trigo no cenário brasileiro.

Considerando o potencial de contribuição do modelo AquaCrop na gestão de lavouras e pesquisas aliado à capacidade produtiva dos Campos Gerais, teve-se como objetivo no presente trabalho calibrar e validar o modelo AquaCrop-FAO para seis cultivares de trigo na Região dos Campos Gerais, Estados do Paraná e São Paulo.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Descrição da área de estudo

O presente trabalho foi realizado considerando os municípios de Castro e Ponta Grossa, no Estado do Paraná, e o município de Itaberá, Estado de São Paulo, todos na Região dos Campos Gerais. As análises foram realizadas para a cultura do trigo. A calibração e validação foram realizadas para as cultivares Quartzo, Supera, TBIO Sinuelo, TBIO Sossego, TBIO Tibagi e TBIO Toruk, para um período de 11 anos de dados de clima e cultura, referente às safras de 2007 a 2017. As características agronômicas das cultivares encontram-se no APÊNDICE 8.

Todas as parcelas experimentais avaliadas apresentam relevo plano a suave ondulado. O manejo adotado nas áreas é o plantio direto com cobertura vegetal residual proveniente da safra anterior. A classificação de solos foi previamente realizada pela Fundação ABC e os tipos climáticos listados conforme a classificação climática de Köppen (Alvarez et al., 2013; TABELA 4.1).

TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, LOCALIZADAS NOS MUNICÍPIOS DE CASTRO, ITABERÁ E PONTA GROSSA.

Localidade	Estado	Solo	Clima ⁽¹⁾	Latitude ----- (graus)	Longitude -----	Altitude (m)
Castro	Paraná	CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Cfa	24,85° S	49,93° W	1001
Itaberá	São Paulo	PLANOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Cfa	24,06° S	49,15° W	740
Ponta Grossa	Paraná	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	Cfb	25,30° S	49,95° W	908

⁽¹⁾ Adaptado de Álvares et al. (2013). FONTE: A autora (2018).

4.4.2 Modelo AquaCrop e dados necessários

O modelo utilizado foi o AquaCrop, Versão 6.0, desenvolvido por pesquisadores vinculados à *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO, 2018). Para realizar as análises o AquaCrop precisou de dados de entrada referentes ao clima, cultura, solo e manejo do solo das localidades de Castro e Ponta Grossa, Estado do Paraná, e Itaberá, Estado de São Paulo. Os valores de latitude, longitude e altitude utilizados nas simulações são os mesmos da TABELA 4.1.

4.4.2.1 Dados de clima, cultura e manejo

Os dados referentes a clima, cultura e manejo foram provenientes do banco de dados da Fundação ABC, os quais seguem as recomendações da *American Society of Agricultural Engineers* (ASAE) e *American Society of Agricultural and Biological Engineers* (ASABE) para os sensores utilizados nas Estações Agrometeorológicas.

Os dados de clima inseridos no AquaCrop foram provenientes das estações agrometeorológicas instaladas nas respectivas localidades. Foram inseridos dados diários referentes à (APÊNDICE 7): precipitação (P ; mm dia⁻¹); temperatura máxima (T_x ; °C), mínima (T_n ; °C) e média (°C) diárias do ar; radiação solar incidente (R_s ; MJ m⁻² dia⁻¹); umidade relativa do ar (UR ; %); e, velocidade do vento (u_2 ; m s⁻¹). O AquaCrop Versão 6.0 dispõe internamente dos valores de concentração de CO₂ da atmosfera (ppm), obtidos do observatório de Mauna Loa, Havaí (Raes et al., 2009a), e calcula automaticamente a demanda diária evaporativa da atmosfera, expressa pela ET_o (mm dia⁻¹) com o método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Os estádios fenológicos das cultivares foram determinados no acompanhamento das safras, pela Fundação ABC, utilizando a escala fenológica de Zadoks et al. (1974) (APÊNDICE 8). Os dados inseridos no AquaCrop referem-se à população de plantas (número de plantas ha⁻¹), data de plantio, data de colheita e duração do ciclo fenológico, considerados em dias. As datas referentes aos estádios fenológicos foram estabelecidas no momento em que as cultivares atingiam os códigos decimais da escala de Zadoks et al. (1974), conforme TABELA 4.2.

TABELA 4.2 – CÓDIGO ZADOKS ADOTADO PARA DETERMINAÇÃO DO CICLO FENOLÓGICO DA CULTURA DO TRIGO.

Dados de entrada do ciclo fenológico	Código decimal para os estádios de crescimento	Descrição do código
Emergência (<i>DAP*</i>)	09	Folha no ápice do coleóptilo
Máxima cobertura (<i>DAP*</i>)	54	Metade das inflorescências emergidas
Florescimento (<i>DAP*</i>)	60	Início da antese
Duração do florescimento (<i>DAP*</i>)	60 até 68	Duração do florescimento
Senescência (<i>DAP*</i>)	71	Cariopse aquosa
Maturidade (<i>DAP*</i>)	91	Cariopse dura (difícil dividir com a unha)

LEGENDA: **DAP* - *Dias Após Plantio*. FONTE: Fundação ABC.

Em relação ao manejo do solo, o AquaCrop considera gerenciamento de campo e irrigação. Para gerenciamento de campo, o nível de fertilidade do solo foi admitido como não limitante ao desenvolvimento da cultura e a cobertura vegetal foi considerada fixa em 75% de resíduo de material orgânico. Na aba referente às práticas conservacionistas de superfície, foi considerado que o manejo adotado nas áreas não afeta o escoamento superficial e que não há presença de plantas infestantes. A irrigação não foi considerada por não haver a adoção da prática nos locais estudados.

4.4.2.2 Dados de solo

Foram consideradas três camadas de perfil do solo nas profundidades 0,00-0,10 m, 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m. Os dados de solo dos municípios de Ponta Grossa e Itaberá foram coletados a campo e analisados nos laboratórios pertencentes à Universidade Federal do Paraná (UFPR). Os dados do município de Castro são de um trabalho científico anterior (Piekarski et al., 2017), realizado na mesma área (TABELA 4.3). Com os parâmetros o AquaCrop deriva internamente e contabiliza a evaporação da camada superficial do solo, drenagem interna, percolação profunda, escoamento superficial e ascensão capilar.

TABELA 4.3 – ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DAS ÁREAS EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, INSERIDOS NA ABA SOLO DO AQUACROP, PARA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROGRAMA.

Localidade	Camada (m)	Textura	Conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			K_{sat} (mm dia^{-1})
			$\theta_{PMP}^{(1)}$	$\theta_{CC}^{(2)}$	$\theta_{Sat}^{(3)}$	
Castro	0,00 – 0,10	Argilosa	0,36	0,50	0,63	418,32
Castro	0,10 – 0,25	Argilosa	0,33	0,47	0,60	368,23
Castro	0,25 – 0,40	Muito argilosa	0,32	0,45	0,62	325,74
Itaberá	0,00 – 0,10	Argilosa	0,28	0,40	0,55	165,01
Itaberá	0,10 – 0,25	Argilosa	0,27	0,40	0,56	28,83
Itaberá	0,25 – 0,40	Argilosa	0,26	0,37	0,50	433,84
Ponta Grossa	0,00 – 0,10	Argilosa a Franco Argilo-arenosa	0,23	0,41	0,59	469,41
Ponta Grossa	0,10 – 0,25	Argilosa a Franco Argilo-arenosa	0,25	0,38	0,53	89,48
Ponta Grossa	0,25 – 0,40	Argilosa a Franco Argilo-arenosa	0,23	0,41	0,62	433,84

LEGENDA: ⁽¹⁾Umidade volumétrica no ponto de murcha permanente; ⁽²⁾Umidade volumétrica na capacidade de campo; ⁽³⁾Umidade volumétrica na saturação. FONTE: A autora (2018).

A textura avaliada no município de Ponta Grossa varia de Argilosa a Franco Argilo-arenosa. Nas análises de simulação com o AquaCrop foi considerado solos com textura Argilosa.

O conteúdo inicial de água no solo, para realizar as análises com o AquaCrop, foi considerado igual a 50% da água compreendida entre a capacidade de campo (θ_{CC} ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e o ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

4.4.3 Parametrização do modelo AquaCrop

O AquaCrop é constituído por dois grupos de parâmetros: não conservativos e conservativos (Raes et al., 2018b). Os parâmetros não conservativos são aqueles que dependem do operador e variam conforme cultivar e manejo. Os parâmetros conservativos são aqueles que não mudam devido ao tempo, práticas de manejo, clima e localização geográfica. Possuem valores padrão pré-estabelecidos baseando-se em experimentos realizados com cultivares de alto potencial de rendimento, sob condições ideais de crescimento e ausência de estresse, não necessitando de calibração (Hsiao et al., 2012). Porém, o ajuste de alguns parâmetros considerados conservativos é favorável para diferentes condições edafoclimáticas.

4.4.4 Calibração do modelo AquaCrop

A calibração do AquaCrop foi realizada para os parâmetros mais sensíveis obtidos no Capítulo II, conforme as localidades estudadas na Região dos Campos Gerais (TABELA 4.4). Para tal, foram selecionadas aleatoriamente 35% a 50% do total das safras distribuídas entre as cultivares Quartzo, Supera, TBIO Sinuelo, TBIO Sossego, TBIO Tibagi e TBIO Toruk, nos municípios de Castro-PR, Ponta Grossa-PR e Itaberá-SP. Os demais parâmetros que não receberam calibração foram definidos conforme recomendação de Raes et al. (2017b) para a cultura do trigo (TABELA 4.5).

Na análise de sensibilidade realizada no Capítulo II o parâmetro referente ao nível de fertilidade do solo mostrou-se sensível, sendo recomendada calibração. Porém, durante o processo de calibração o parâmetro não foi submetido a ajustes, uma vez que as áreas experimentais da Fundação ABC seguem recomendações técnicas para calagem e adubação, e os níveis de fertilidade são adequados ao desenvolvimento das culturas. Assim, a fertilidade do solo foi considerada parâmetro não limitante para a produção de biomassa e formação de rendimento da cultura.

TABELA 4.4 – PARÂMETROS QUE RECEBERAM CALIBRAÇÃO NO MODELO AQUACROP E RESPECTIVAS LOCALIDADES NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

Parâmetro calibrado	Localidades analisadas
CC_x : Máxima cobertura do dossel (%) ⁽²⁾	Castro; Itaberá; Ponta Grossa
CDC : Coeficiente de declínio do dossel (% dia ⁻¹) ⁽¹⁾	Castro
$K_{TR,x}$: Coeficiente da cultura - completa expansão do dossel ⁽¹⁾	Castro; Itaberá; Ponta Grossa
WP^* : Produtividade da água normalizada para ET_o e CO_2 (g m ⁻²) ⁽¹⁾	Castro; Itaberá; Ponta Grossa
HI_o : Índice de colheita de referência (%) ⁽³⁾	Castro; Itaberá; Ponta Grossa
Mínimo em graus requerido para completa produção de biomassa (°C dia ⁻¹) ⁽¹⁾	Itaberá; Ponta Grossa

⁽¹⁾ Conservativo geralmente aplicável; ⁽²⁾ Dependente do ambiente e/ou manejo; ⁽³⁾ Cultivar específica.

TABELA 4.5 – PARÂMETROS UTILIZADOS COMO ENTRADA NO MODELO AQUACROP PARA AS CULTIVARES DE TRIGO, NAS LOCALIDADES DE CASTRO-PR, ITABERÁ-SP E PONTA GROSSA-PR.

Símbolo	Descrição	Valores
----- Fenologia da Cultura -----		
<i>CDC*</i>	Desenvolvimento da cobertura do dossel	
	Coefficiente de declínio do dossel (% dia ⁻¹)	8,0
<i>Z_{mín}</i>	Desenvolvimento da zona radicular	
	Profundidade mínima efetiva do sistema radicular (m)	0,1
<i>Z_{máx}</i>	Profundidade máxima efetiva do sistema radicular (m)	0,3
	Fator descrevendo a expansão da zona radicular	1,5
----- Transpiração da Cultura -----		
<i>Ke</i>	Coefficiente de declínio da cultura como resultado da idade, deficiência de nitrogênio, entre outros (% dia ⁻¹)	0,15
	Efeito da cobertura do dossel na redução da evaporação do solo no último estágio da cultura (%)	50,0
----- Produção de Biomassa -----		
	<i>Produtividade de água da cultura</i>	
	Produtividade de água normalizada para <i>ET_o</i> e CO ₂ durante a formação de rendimento (%)	100
----- Formação de Rendimento -----		
	Índice de colheita	
	Possível incremento no <i>HI</i> devido ao estresse hídrico antes do florescimento	Pequeno
	Excesso de frutos potenciais (%)	Médio
	Coefficiente descrevendo o impacto positivo da restrição do crescimento vegetativo durante a formação de rendimento no <i>HI</i>	Pequeno
	Coefficiente descrevendo o impacto negativo do fechamento estomático durante a formação de rendimento no <i>HI</i>	Moderado
	Máximo aumento permitido do <i>HI</i> especificado	15,0
----- Estresse -----		
	<i>Estresse hídrico do solo</i>	
<i>p_{exp,upper}</i>	Limite superior de depleção da água no solo para expansão do dossel	0,65
<i>p_{exp,lower}</i>	Limite inferior de depleção da água no solo para expansão do dossel	0,20
<i>p_{sto}</i>	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel	5,0
	Limite superior de depleção da água no solo para controle estomático	0,65
<i>p_{sen}</i>	Fator do coeficiente de estresse hídrico para controle estomático	2,5
	Limite superior de depleção da água no solo para senescência do dossel	0,70
<i>p_{pol}</i>	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel	2,5
	Limite superior de depleção de água no solo para falhar a polinização	0,85
	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel	2,5
	Volume (%) no ponto anaerobiótico (com referência para saturação)	5,0
----- Estresse pela temperatura do ar -----		
	Mínima temperatura do ar abaixo da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo frio) (°C)	5,0
	Máxima temperatura do ar acima da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo calor) (°C)	35,0
	Mínimo em graus requerido para completa produção de biomassa (°C dia ⁻¹)*	15,0

*Apenas para o município de Castro-PR. FONTE: Raes et al. (2017b).

A recomendação de Raes et al. (2017b) para cobertura inicial do solo com 90% de emergência de plântulas (CC_o) é de 1,5% para a cultura do trigo. Nas simulações foram considerados outros valores, pois a CC_o é automaticamente determinada pelo AquaCrop, dependendo do número de plantas/hectare inserido no

programa, os quais seguiram o protocolo de dados da Fundação ABC. A profundidade máxima (2,4 m) e mínima (0,3 m) efetiva do sistema radicular também diferiu da recomendação dos autores. Nas análises considerou-se a profundidade mínima efetiva de 0,1 m e máxima de 0,3 m, para contabilizar a área radicular nas profundidades avaliadas (0,00-0,40 m). Os Coeficientes de Crescimento (*CGC*; % dia⁻¹) e Declínio do Dossel (*CDC*; % dia⁻¹) são recomendados pelos autores na escala fenológica Graus Dia de Desenvolvimento (*GDD*). O *CGC* é um parâmetro ajustado automaticamente no AquaCrop, baseado na data de ocorrência da máxima expansão do dossel da cultura, o qual foi indiretamente determinado baseando-se no ciclo fenológico. Como o ciclo considerado no presente estudo foi em dias após plantio (*DAP*), para o *CDC* foi adotado o valor de 8,0% dia⁻¹.

4.4.5 Validação do modelo AquaCrop

Realizada a calibração dos parâmetros mais sensíveis do AquaCrop na região dos Campos Gerais, procedeu-se a validação empregando as safras que não foram utilizadas na calibração. Durante a validação, os dados de solo e manejo do solo foram os mesmos utilizados anteriormente na calibração.

Os dados do cultivo da cultura, como data de plantio (dias), população de plantas (plantas ha⁻¹) e duração dos estádios fenológicos (dias) de cada cultivar em sua respectiva localidade foram obtidos no protocolo da Fundação ABC. Os parâmetros que não requeriam ajustes (TABELA 4.5) foram considerados os mesmos da calibração. Os demais parâmetros (TABELA 4.4) foram ajustados conforme o intervalo obtido no processo de calibração (Capítulo II).

4.4.6 Análises estatísticas dos dados

Para todas as localidades avaliadas, tanto no processo de calibração quanto validação, as produtividades simuladas com o AquaCrop (*Y_s*; kg ha⁻¹) foram comparadas com as produtividades reais observadas a campo (*Y_r*; kg ha⁻¹), em análises de regressão linear simples. Foram calculados os erros absolutos (*E_a*) e relativos (*E_r*), raiz quadrada do erro médio (*RMSE*; Jacovides e Kontoyiannis, 1995), coeficiente de determinação (*r*²) e correlação de Pearson (*r*), e índice de

concordância “*d*” (Willmott, 1982), que considera a distância com que os pontos Y_{real} vs $Y_{simulada}$ estão afastados da reta 1:1. O processo de validação do modelo teve seu desempenho calculado com o índice “*c*” de Camargo e Sentelhas (1997).

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

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_{r_i} - Y_{s_i})^2}{n}}$$

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

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

$$c = d \cdot r$$

Sendo: *Ea* – erro absoluto médio (kg ha^{-1}); *Er* – erro relativo (%); *RMSE* – raiz quadrada do erro médio (kg ha^{-1}); *r* – coeficiente de correlação de Pearson (adimensional); *d* – índice “*d*” (kg ha^{-1}); Y_{r_i} – valores reais médios de produtividade observados no *i*-ésimo experimento (kg ha^{-1}); \bar{Y}_r – média dos valores reais de todas as cultivares (kg ha^{-1}); Y_{s_i} – valor estimado de produtividade no *i*-ésimo experimento (kg ha^{-1}); \bar{Y}_s – média dos valores de produtividade estimada nos experimentos (kg ha^{-1}); *n* – número de safras nas localidades (adimensional); *c* – índice “*c*” (adimensional).

O desempenho do modelo validado foi classificado pelo valor obtido para o índice “*c*”, caracterizado como: “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” ($0,41 \leq “c” \leq 0,50$); ou, “péssimo” (“*c*” ≤ 0,40).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Calibração dos parâmetros do AquaCrop

Não foi possível estabelecer um único valor para cada parâmetro, e algumas cultivares apresentaram intervalos de valores calibrados (TABELA 4.6). A necessidade do intervalo é atribuída a diversos fatores observados ao longo da calibração: *i)* distintas épocas para atingir os estádios fenológicos estabelecidos; *ii)* diferentes populações de plantas; *iii)* diferentes cultivares ao longo das safras; *iv)* possíveis problemas com pragas e/ou doenças; e, *v)* condições climáticas (períodos de estiagem).

TABELA 4.6 – PARÂMETROS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO AQUACROP PARA AS CULTIVARES DE TRIGO, NAS LOCALIDADES DE CASTRO-PR, ITABERÁ-SP E PONTA GROSSA-PR.

Parâmetro	Cultivar					
	Supera	Quartzo	TBIO Sinuelo	TBIO Tibagi	TBIO Sossego	TBIO Toruk
----- Castro - PR -----						
CC_x (%)	80 a 92	86 a 93	—	—	—	—
CDC (% dia ⁻¹)	7,2 a 8,4	7,1 a 8,3	—	—	—	—
$K_{CTR,x}$ (adimensional)	1,05 a 1,4	1,25 a 1,35	—	—	—	—
WP^* (g m ⁻²)	16 a 20	17 a 19	—	—	—	—
HI_o (%)	46 a 70	48 a 65	—	—	—	—
----- Itaberá - SP -----						
CC_x (%)	86 a 94	86 a 97	86 a 89	88 a 93	—	—
$K_{CTR,x}$ (adimensional)	1,0 a 1,4	1,2 a 1,5	1,1 a 1,2	1,15 a 1,2	—	—
WP^* (g m ⁻²)	16 a 20	17 a 21	16 a 17	16 a 20	—	—
HI_o (%)	43 a 62	51 a 75	52 a 56	49 a 69	—	—
Mínimo requerido (produção de biomassa; °C dia ⁻¹)	14,9 a 15,9	14,8 a 16	15 a 15,3	15,8 a 16	—	—
----- Ponta Grossa - PR -----						
CC_x (%)	83 a 89	76 a 92	82 a 90	90 a 92	89 a 90	82 a 89
$K_{CTR,x}$ (adimensional)	1,0 a 1,35	0,95 a 1,3	0,95 a 1,4	1,2 a 1,35	1,25 a 1,3	1,05 a 1,4
WP^* (g m ⁻²)	16 a 19	14 a 19	15 a 19	16 a 19	19 a 20	15 a 19
HI_o (%)	45 a 49	35 a 64	44 a 58	51 a 63	54 a 58	46 a 57
Mínimo requerido (produção de biomassa; °C dia ⁻¹)	13,9 a 15	12,1 a 16	14,6 a 15,2	14,7 a 15,5	15 a 15,3	15,1 a 15,2

FONTE: A autora (2018).

O HI_o variou entre 35% e 75% para as cultivares nas três localidades avaliadas (TABELA 4.6). Bouazzama et al. (2017) e Toumi et al. (2016) encontraram $HI_o = 46\%$. Pareek et al. (2017) obtiveram melhores resultados de calibração com $HI_o = 34\%$. Trombetta et al. (2016) calibraram $HI_o = 43\%$ para o trigo de inverno nas localidades de Rocchetta Sant'Antonio e Sant'Agata di Puglia, na Itália. Andarzian et

al. (2011) utilizando $HI_o = 40\%$ no Irã, obtiveram produtividade simulada muito próximo da observada. Raes et al. (2018a) consideram que a partir do florescimento, o Índice de Colheita (HI_o) aumenta gradualmente até atingir seu valor de referência (HI_o), que acontece na maturidade fisiológica. Um curto estágio de enchimento de grãos, como resultado da senescência precoce do dossel, pode resultar em fotossíntese inadequada e redução do HI_o . Os baixos valores do HI_o obtidos na calibração podem ser favoráveis para o processo de validação das safras que sofreram estiagem, a qual poderá atribuir menor produtividade simulada no programa.

Os valores obtidos para o WP^* variaram entre 14 e 21 g m⁻² para todas as localidades (TABELA 4.6). O menor valor foi observado em Ponta Grossa (14 g m⁻²) e o maior (21 g m⁻²) em Itaberá, ambos para a cultivar Quartzo. O menor valor obtido no presente estudo é próximo ao observado por Trombetta et al. (2016), na Itália, e Zhang et al. (2013), na China, em que encontraram bons resultados com a calibração do $WP^* = 15$ g m⁻². Em sua maioria, os valores do WP^* ficaram dentro do intervalo recomendado pela FAO, variando entre 15 e 20 g m⁻² para culturas de ciclo C3 (Raes et al., 2018c). Toumi et al. (2016) encontraram $WP^* = 16$ g m⁻² para o trigo de inverno no Marrocos. Bouazzama et al. (2017) obtiveram $WP^* = 15,3$ g m⁻².

No presente estudo o $K_{CTR,x}$ variou entre 0,95 a 1,05 (TABELA 4.6). O maior valor do $K_{CTR,x}$ encontrado ($K_{CTR,x} = 1,05$) ficou muito próximo do obtido por Toumi et al. (2016), sendo $K_{CTR,x} = 1,07$ para o trigo de inverno no semi-árido de Tensift-basin, região central do Marrocos. Na literatura, Bouazzama et al. (2017) encontraram $K_{CTR,x} = 1,13$, Pareek et al. (2017) obteve $K_{CTR,x} = 1,1$, e Trombetta et al. (2016) consideraram o $K_{CTR,x} = 1,1$ em duas localidades avaliadas pelos autores.

A máxima cobertura do dossel (CC_x) variou entre 76% a 97% para todas as cultivares e localidades avaliadas (TABELA 4.6). Na literatura, os valores de CC_x obtidos na calibração por diversos autores também foi alta e variável: Bouazzama et al. (2017) encontraram $CC_x = 98,7\%$ para o trigo de inverno em diferentes condições hídricas no Marrocos; Xiangxiang et al. (2013) obtiveram $CC_x = 98\%$ na China; Pareek et al. (2017) encontraram $CC_x = 95\%$ para o trigo de inverno em Pantnagar, Índia; Trombetta et al. (2016) obtiveram $CC_x = 90\%$ em Rocchetta Sant'Antonio e $CC_x = 79\%$ em Sant'Agata di Puglia, localidades na Itália; Zhang et al. (2013) encontram $CC_x = 90\%$ para o trigo, na China.

O coeficiente de declínio do dossel (*CDC*) variou de 7,1 a 8,4% dia⁻¹ para as cultivares Quartzo e Supera no município de Castro (TABELA 4.6). O valor máximo obtido no presente estudo (*CDC* = 8,4% dia⁻¹) é o mesmo encontrado por Xiangxiang et al. (2013). Kumar et al. (2014) ao avaliarem a resposta do AquaCrop ao ajuste dos parâmetros em diferentes níveis de salinidade nos solos de Delhi, na Índia, observaram variações do *CDC* entre 11 a 12,9% dia⁻¹. Andarzian et al. (2011) obteve bons resultados de simulação para o trigo com o *CDC* ajustado a 6,2% dia⁻¹ no Irã, em condições de temperatura máxima e mínima superiores às verificadas nos Campos Gerais.

Os erros absolutos (*Ea*) e relativos (*Er*) obtidos na calibração das cultivares de trigo com o modelo AquaCrop, nas localidades analisadas, foram praticamente desprezíveis (TABELA 4.7). Os maiores valores de erro absoluto e relativo ocorreram em Ponta Grossa, para a cultivar TBIO Toruk (*Ea* = 12,63 kg ha⁻¹ e *Er* = 0,36% na safra 2015; TABELA 4.7) e Itaberá, para a cultivar Supera (*Ea* = 12,18 kg ha⁻¹ e *Er* = 0,28% na safra 2016; TABELA 4.7). O menor erro absoluto médio foi obtido para a cultivar Quartzo, no município de Itaberá (*Ea* = 2,81 kg ha⁻¹ e *Er* = 0,06% na safra 2016; TABELA 4.7). O maior *RMSE* foi observado em Ponta Grossa, com a cultivar TBIO Toruk (9,23 kg ha⁻¹). Mesmo sendo o maior erro observado, ainda é muito pequeno considerando a produtividade real da variável analisada. O perfeito ajuste para obtenção das produtividades simuladas, próxima das observadas, deveu-se ao intervalo de valores atribuídos aos parâmetros no processo de calibração (TABELA 4.6).

As cultivares Supera, TBIO Sinuelo e TBIO Tibagi em Itaberá possuíam poucas safras para calibração (TABELA 4.7). O mesmo aconteceu com as cultivares TBIO Tibagi, TBIO Sossego e TBIO Toruk, em Ponta Grossa (TABELA 4.7). Mesmo apresentando excelentes coeficientes, o pequeno número de safras prejudicou a interpretação dos dados por análise de regressão linear. Não foi possível estabelecer o intervalo confiável, o que pode refletir no desempenho do modelo no processo de validação.

Os coeficientes de determinação (*r*²) e índice “*d*” obtidos nas localidades analisadas apresentaram resultado excelente, com perfeita correlação positiva (*r* = 1) para todas as cultivares e localidades, o que deveu-se às diferenças mínimas encontradas entre as produtividades simulada e observada (FIGURA 4.1). Kumar et

al. (2014) também obteve excelentes ajustes com o AquaCrop para o trigo em diferentes níveis de salinidade nos solos de Delhi, para rendimento final em grãos ($r^2 = 0,99$ e $d = 0,99$). Bons ajustes também foram obtidos por Toumi et al. (2016) ($r^2 = 0,99$ e $RMSE = 30 \text{ kg ha}^{-1}$), considerando o $HI_o = 46\%$ e $WP = 16 \text{ g m}^{-2}$, no Marrocos.

TABELA 4.7 – PRODUTIVIDADES REAIS (Y_r) E SIMULADAS (Y_s), ERROS ABSOLUTO (E_a), RELATIVO (E_r) E RAIZ QUADRADA DO ERRO MÉDIO ($RMSE$), OBTIDOS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO COM O MODELO AQUACROP, PARA CULTIVARES DE TRIGO, EM CASTRO-PR, ITABERÁ-SP E PONTA GROSSA-PR.

Localidade	Cultivar	Safra	Y_r	Y_s	E_a	E_r	$RMSE$	$n^{(1)}$
			(kg ha ⁻¹)			(%)	(kg ha ⁻¹)	
----- Castro - PR -----								
Castro	Supera	2008	4717	4720	2,83	0,06		
Castro	Supera	2009	2684	2685	1,42	0,05		
Castro	Supera	2011	5184	5176	8,04	0,16		
Castro	Supera	2011	4870	4868	2,49	0,05	4,49	6
Castro	Supera	2013	4262	4265	3,30	0,08		
Castro	Supera	2013	5085	5090	5,40	0,11		
Média	—	—	4467	4467	3,91	0,08		
----- Itaberá - SP -----								
Castro	Quartzo	2010	4999	5005	5,71	0,11		
Castro	Quartzo	2010	4295	4299	3,77	0,09		
Castro	Quartzo	2011	3903	3910	7,34	0,19		
Castro	Quartzo	2012	4564	4570	5,87	0,13		
Castro	Quartzo	2013	6021	6023	2,41	0,04	4,50	8
Castro	Quartzo	2013	3905	3903	1,50	0,04		
Castro	Quartzo	2014	4631	4635	3,93	0,08		
Castro	Quartzo	2014	4602	4600	1,75	0,04		
Média	—	—	4615	4618	4,04	0,09		
Itaberá	Supera	2013	1772	1774	1,66	0,09		
Itaberá	Supera	2016	5185	5177	8,33	0,16	8,57	3
Itaberá	Supera	2016	4315	4327	12,18	0,28		
Média	—	—	3757	3759	7,39	0,18		
Itaberá	Quartzo	2010	5765	5759	5,72	0,10		
Itaberá	Quartzo	2013	3063	3062	1,09	0,04		
Itaberá	Quartzo	2013	4122	4119	2,92	0,07	3,34	4
Itaberá	Quartzo	2017	4251	4252	1,49	0,04		
Média	—	—	4300	4298	2,81	0,06		
Itaberá	Sinuelo	2014	4493	4493	0,40	0,01		
Itaberá	Sinuelo	2016	4120	4127	7,05	0,17	4,99	2
Média	—	—	4307	4310	3,73	0,09		
Itaberá	Tigabi	2013	2087	2081	5,67	0,27		
Itaberá	Tigabi	2013	3372	3369	3,32	0,10	4,65	2
Média	—	—	2729	2725	4,50	0,19		

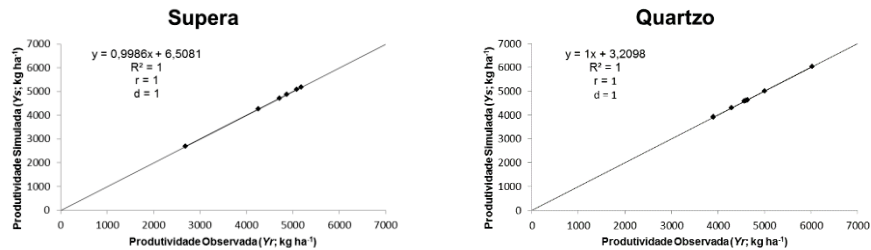
⁽¹⁾Número de safras usadas para calibração. FONTE: A autora (2018).

TABELA 4.7 – PRODUTIVIDADES REAIS (Y_r) E SIMULADAS (Y_s), ERROS ABSOLUTO (E_a), RELATIVO (E_r) E RAIZ QUADRADA DO ERRO MÉDIO ($RMSE$), OBTIDOS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO COM O MODELO AQUACROP, PARA CULTIVARES DE TRIGO, EM CASTRO-PR, ITABERÁ-SP E PONTA GROSSA-PR.

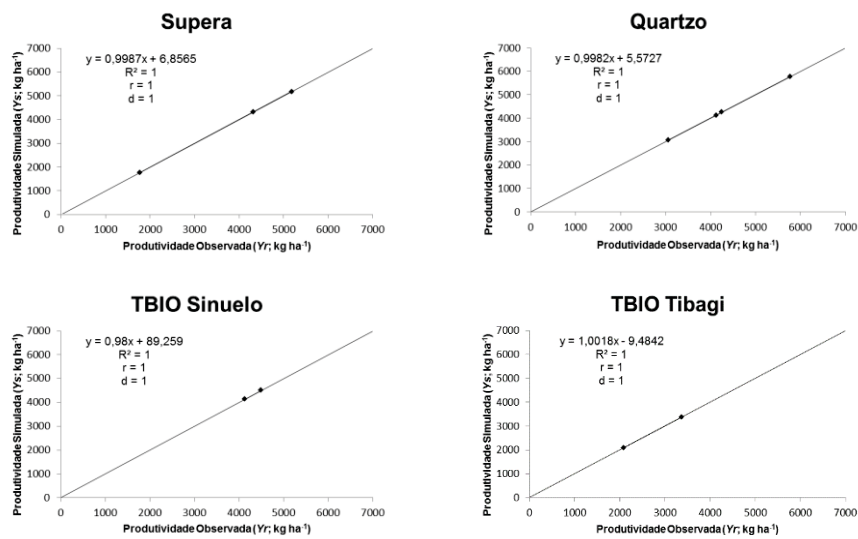
Localidade	Cultivar	Safra	Y_r	Y_s	E_a	E_r	$RMSE$	$n^{(1)}$
			-----	(kg ha ⁻¹)	-----	(%)	(kg ha ⁻¹)	
----- Ponta Grossa - PR -----								
Ponta Grossa	Supera	2010	3886	3878	7,64	0,20		
Ponta Grossa	Supera	2010	2293	2285	7,88	0,34		
Ponta Grossa	Supera	2013	4921	4922	0,75	0,02	4,96	5
Ponta Grossa	Supera	2013	5241	5241	0,44	0,01		
Ponta Grossa	Supera	2014	5055	5056	1,37	0,03		
Média	—	—	4279	4276	3,62	0,12		
Ponta Grossa	Quartzo	2010	4333	4338	4,85	0,11		
Ponta Grossa	Quartzo	2012	5563	5556	7,08	0,13		
Ponta Grossa	Quartzo	2013	5373	5381	7,79	0,14		
Ponta Grossa	Quartzo	2013	4737	4741	3,74	0,08		
Ponta Grossa	Quartzo	2014	5391	5393	2,32	0,04		
Ponta Grossa	Quartzo	2014	4684	4694	9,51	0,20	6,17	10
Ponta Grossa	Quartzo	2015	2036	2034	2,29	0,11		
Ponta Grossa	Quartzo	2015	4617	4611	6,00	0,13		
Ponta Grossa	Quartzo	2015	4022	4028	5,96	0,15		
Ponta Grossa	Quartzo	2017	4186	4194	7,70	0,18		
Média	—	—	4494	4497	5,72	0,13		
Ponta Grossa	Sinuelo	2014	6100	6090	10,24	0,17		
Ponta Grossa	Sinuelo	2014	4695	4702	7,29	0,16		
Ponta Grossa	Sinuelo	2014	4709	4700	9,30	0,20		
Ponta Grossa	Sinuelo	2015	4794	4785	8,86	0,19	7,30	7
Ponta Grossa	Sinuelo	2015	2891	2898	6,81	0,23		
Ponta Grossa	Sinuelo	2017	5017	5018	1,16	0,02		
Ponta Grossa	Sinuelo	2017	4006	4008	1,67	0,04		
Média	—	—	4602	4600	6,47	0,14		
Ponta Grossa	Tibagi	2013	3367	3358	8,62	0,26		
Ponta Grossa	Tibagi	2013	6010	6012	2,28	0,04	6,17	3
Ponta Grossa	Tibagi	2014	4323	4329	5,88	0,14		
Média	—	—	4566	4566	5,59	0,14		
Ponta Grossa	Sossego	2017	4461	4459	2,10	0,05		
Ponta Grossa	Sossego	2017	3989	3993	3,97	0,10	3,18	2
Média	—	—	4225	4226	3,04	0,07		
Ponta Grossa	Toruk	2015	3506	3519	12,63	0,36		
Ponta Grossa	Toruk	2017	4555	4550	4,94	0,11	9,23	3
Ponta Grossa	Toruk	2017	3354	3362	8,46	0,25		
Média	—	—	3805	3810	8,68	0,24		

⁽¹⁾Número de safras usadas para calibração. FONTE: A autora (2018).

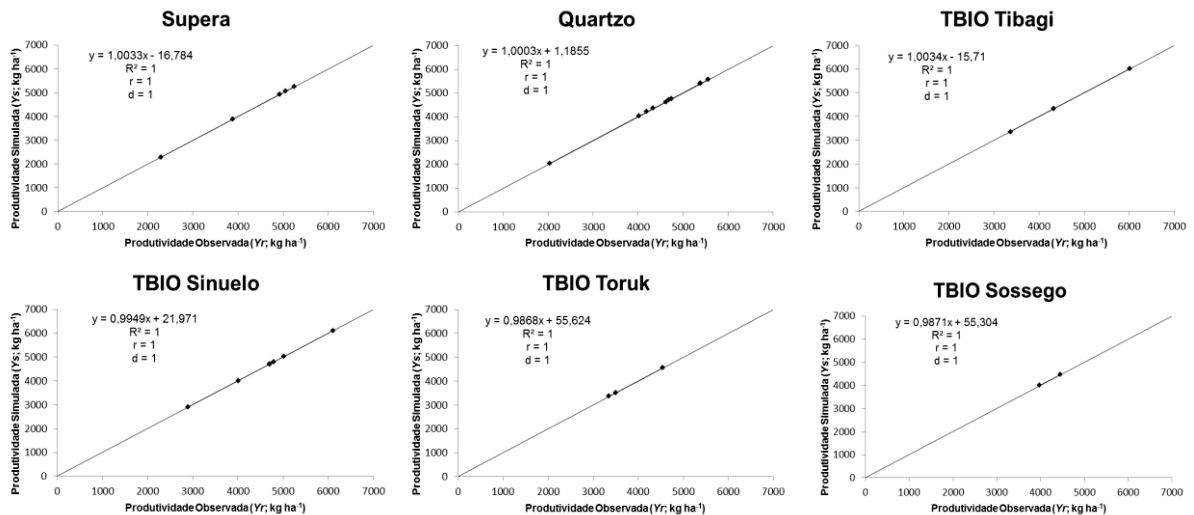
FIGURA 4.1 – ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E SEUS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (r^2), CORRELAÇÃO (r) E ÍNDICES “ d ”, OBTIDOS DA ASSOCIAÇÃO ENTRE A PRODUTIVIDADE SIMULADA (Y_s) vs OBSERVADA (Y_r) NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO AQUACROP, PARA AS CULTIVARES AVALIADAS NAS LOCALIDADES DE: a) CASTRO, b) ITABERÁ, c) PONTA GROSSA.



(a) Calibração para as cultivares em Castro-PR, Região dos Campos Gerais.



(b) Calibração para as cultivares em Itaberá-SP, Região dos Campos Gerais.



(c) Calibração para as cultivares em Ponta Grossa-PR, Região dos Campos Gerais.

FONTE: A autora (2018).

4.5.2 Validação dos parâmetros do AquaCrop

Com os intervalos de valores dos parâmetros obtidos na calibração para cada cultivar e localidade (TABELA 4.6), procedeu-se a análise de validação. Para tal, foram utilizadas as demais safras disponibilizadas no protocolo de dados da Fundação ABC. Mesmo com excelente ajuste na calibração, foi possível observar que algumas cultivares apresentaram erros absolutos e relativos muito maiores que os verificados na calibração (TABELA 4.8).

Não houve estresse hídrico justificável nos dados de saída do programa durante a safra de 2009, em Castro, que pudesse justificar o aumento dos erros ($Ea = 1348,71 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 39,76\%$) encontrados para a cultivar Supera. Considerando os valores do intervalo de calibração que resultaram na menor produtividade simulada no programa (3392 kg ha^{-1}), no período que compreende a safra 2009, a produtividade observada a campo foi 2043 kg ha^{-1} (TABELA 4.8). Acredita-se que na safra 2009 ocorreram problemas relacionados a pragas, doença ou plantas infestantes.

Raes et al. (2017b) considera para a cultura do trigo que: $5 \text{ }^\circ\text{C}$ é a temperatura mínima do ar abaixo da qual a polinização começa a falhar (estresse pelo frio); e, 0,85 é o limite superior de depleção de água no solo para falhar a polinização (TABELA 4.5). No AquaCrop, o valor 0,85 reflete moderada condição para que haja falha por estresse hídrico durante o período de floração. Para a cultivar Quartzo, na safra 2011, em Castro ($Ea = 933,73 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 17,71\%$), ocorreram 25 dias de temperatura abaixo de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ antes do florescimento, justificando o estresse por temperatura que o programa indicou. O mesmo foi observado no experimento que resultou em $Ea = 1107,58 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 29,52\%$ (TABELA 4.8), em que ocorreram 18 dias de temperatura abaixo de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ antes do florescimento. Verificou-se também que o volume de precipitação total foi de 830 mm, o que pode ter interferido no balanço hídrico realizado pelo AquaCrop, devido ao alto conteúdo de água presente no ciclo.

TABELA 4.8 – PRODUTIVIDADES REAIS (Y_r) E SIMULADAS (Y_s), ERROS ABSOLUTO (E_a), ERROS RELATIVO (E_r) E RAIZ QUADRADA DO ERRO MÉDIO ($RMSE$), OBTIDOS NO PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP, PARA AS CULTIVARES DE TRIGO, EM CASTRO-PR, ITABERÁ-SP E PONTA GROSSA-PR.

Localidade	Cultivar	Safra	Y_r	Y_s (kg ha ⁻¹)	E_a	E_r (%)	$RMSE$ (kg ha ⁻¹)	$n^{(1)}$
----- Castro - PR -----								
Castro	Supera	2007	3132	3131	0,94	0,03		
Castro	Supera	2009	3319	3317	1,85	0,06		
Castro	Supera	2009	3371	3369	2,28	0,07		
Castro	Supera	2009	2043	3392	1348,71	39,76		
Castro	Supera	2011	4324	4323	1,47	0,03		
Castro	Supera	2011	4186	4194	8,38	0,20	426,52	10
Castro	Supera	2011	5187	5192	5,08	0,10		
Castro	Supera	2013	3942	3944	2,50	0,06		
Castro	Supera	2013	5186	5193	7,10	0,14		
Castro	Supera	2013	5880	5881	0,51	0,01		
Média	—	—	4057	4194	137,88	4,05		
----- Itaberá - SP -----								
Castro	Quartzo	2010	5029	5035	5,80	0,12		
Castro	Quartzo	2010	5290	5289	1,11	0,02		
Castro	Quartzo	2010	3104	3222	118,27	3,67		
Castro	Quartzo	2011	6206	5272	933,73	17,71		
Castro	Quartzo	2011	5110	4933	176,84	3,58		
Castro	Quartzo	2011	4903	4909	6,15	0,13		
Castro	Quartzo	2011	4860	3752	1107,58	29,52		
Castro	Quartzo	2011	5787	5787	0,43	0,01	378,07	15
Castro	Quartzo	2012	4220	4219	1,10	0,03		
Castro	Quartzo	2012	4404	4403	0,70	0,02		
Castro	Quartzo	2013	4343	4338	5,20	0,12		
Castro	Quartzo	2013	4396	4398	2,11	0,05		
Castro	Quartzo	2013	5329	5322	7,30	0,14		
Castro	Quartzo	2013	4818	4822	3,60	0,07		
Castro	Quartzo	2014	4533	4537	4,00	0,09		
Média	—	—	4822	4683	158,26	3,68		
----- Itaberá - SP -----								
Itaberá	Supera	2013	3592	2662	930,34	34,95		
Itaberá	Supera	2013	4422	1169	3252,59	278,24	1953,19	3
Itaberá	Supera	2013	2256	2254	1,95	0,09		
Média	—	—	3423	2028	1394,96	104,42		
Itaberá	Quartzo	2010	5337	5333	4,29	0,08		
Itaberá	Quartzo	2013	4344	1031	3313,30	321,37		
Itaberá	Quartzo	2013	4286	1770	2516,42	142,17		
Itaberá	Quartzo	2013	3017	3022	5,36	0,18	1797,30	6
Itaberá	Quartzo	2017	3963	3965	1,74	0,04		
Itaberá	Quartzo	2017	3326	1887	1439,23	76,27		
Média	—	—	4046	2835	1213,39	90,02		
Itaberá	Sinuelo	2015	4165	4163	2,05	0,05		
Itaberá	Sinuelo	2016	5247	4563	683,69	14,98		
Itaberá	Sinuelo	2017	4412	4355	56,59	1,30	1246,52	5
Itaberá	Sinuelo	2017	3668	3188	479,55	15,04		
Itaberá	Sinuelo	2017	3821	1162	2658,67	228,80		
Média	—	—	4262	3486	776,11	52,04		
Itaberá	Tigabi	2013	3343	2116	1227,29	58,00		
Itaberá	Tigabi	2013	3656	676	2980,14	440,85	2278,98	2
Média	—	—	3500	1396	2103,72	249,42		

⁽¹⁾ Número de safras usadas para validação. FONTE: A autora (2018).

TABELA 4.8 – PRODUTIVIDADES REAIS (Y_r) E SIMULADAS (Y_s), ERROS ABSOLUTO (E_a), ERROS RELATIVO (E_r) E RAIZ QUADRADA DO ERRO MÉDIO ($RMSE$), OBTIDOS NO PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP, PARA AS CULTIVARES DE TRIGO, EM CASTRO-PR, ITABERÁ-SP E PONTA GROSSA-PR.

Localidade	Cultivar	Safra	Y_r	Y_s (kg ha ⁻¹)	E_a	E_r (%)	$RMSE$ (kg ha ⁻¹)	$n^{(1)}$
----- Ponta Grossa - PR -----								
Ponta Grossa	Supera	2010	3702	3699	2,64	0,07		
Ponta Grossa	Supera	2010	2386	2382	4,19	0,18		
Ponta Grossa	Supera	2010	2523	2532	9,44	0,37		
Ponta Grossa	Supera	2013	3938	3935	3,37	0,09		
Ponta Grossa	Supera	2013	5968	5704	263,98	4,63	93,45	8
Ponta Grossa	Supera	2014	5299	5301	2,00	0,04		
Ponta Grossa	Supera	2014	4901	4902	0,89	0,02		
Ponta Grossa	Supera	2014	4246	4240	6,49	0,15		
Média	—	—	4120	4087	36,62	0,69		
----- Ponta Grossa - PR -----								
Ponta Grossa	Quartzo	2010	4183	4174	8,55	0,20		
Ponta Grossa	Quartzo	2010	4169	4159	10,01	0,24		
Ponta Grossa	Quartzo	2012	4485	4482	3,24	0,07		
Ponta Grossa	Quartzo	2013	4999	4999	0,27	0,01		
Ponta Grossa	Quartzo	2013	6360	6352	8,41	0,13		
Ponta Grossa	Quartzo	2013	6257	6258	0,98	0,02		
Ponta Grossa	Quartzo	2013	4549	4542	6,74	0,15		
Ponta Grossa	Quartzo	2014	6008	6003	4,60	0,08		
Ponta Grossa	Quartzo	2014	5080	5080	0,25	0,00		
Ponta Grossa	Quartzo	2014	5531	5530	1,41	0,03	336,67	19
Ponta Grossa	Quartzo	2014	4629	4628	0,89	0,02		
Ponta Grossa	Quartzo	2014	4451	4444	6,84	0,15		
Ponta Grossa	Quartzo	2014	4909	4915	5,92	0,12		
Ponta Grossa	Quartzo	2015	4862	4856	5,85	0,12		
Ponta Grossa	Quartzo	2015	4653	4659	6,33	0,14		
Ponta Grossa	Quartzo	2015	1631	1925	294,11	15,28		
Ponta Grossa	Quartzo	2017	3604	3601	3,46	0,10		
Ponta Grossa	Quartzo	2017	3955	3954	1,45	0,04		
Ponta Grossa	Quartzo	2017	3542	2104	1437,57	68,33		
Média	—	—	4624	4561	95,10	4,48		
----- Ponta Grossa - PR -----								
Ponta Grossa	Sinuelo	2014	5706	5712	6,00	0,11		
Ponta Grossa	Sinuelo	2014	4367	4360	6,69	0,15		
Ponta Grossa	Sinuelo	2014	4710	4701	9,32	0,20		
Ponta Grossa	Sinuelo	2014	5301	5300	1,21	0,02		
Ponta Grossa	Sinuelo	2014	5144	5146	1,96	0,04		
Ponta Grossa	Sinuelo	2015	5432	5423	9,40	0,17		
Ponta Grossa	Sinuelo	2015	2987	3046	58,54	1,92	588,43	13
Ponta Grossa	Sinuelo	2015	4950	4948	1,53	0,03		
Ponta Grossa	Sinuelo	2015	4252	4253	0,58	0,01		
Ponta Grossa	Sinuelo	2015	4335	4329	5,50	0,13		
Ponta Grossa	Sinuelo	2016	5025	5035	9,52	0,19		
Ponta Grossa	Sinuelo	2017	4330	3615	715,00	19,78		
Ponta Grossa	Sinuelo	2017	3756	1759	1996,56	113,51		
Média	—	—	4638	4433	217,06	10,48		
----- Ponta Grossa - PR -----								
Ponta Grossa	Tibagi	2013	4001	4003	2,38	0,06		
Ponta Grossa	Tibagi	2013	4686	4680	5,78	0,12		
Ponta Grossa	Tibagi	2014	5143	5137	6,24	0,12	5,76	5
Ponta Grossa	Tibagi	2014	5153	5153	0,00	0,00		
Ponta Grossa	Tibagi	2014	4633	4624	9,36	0,20		
Média	—	—	4723	4719	4,75	0,10		
----- Ponta Grossa - PR -----								
Ponta Grossa	Sossego	2017	4345	2994	1350,77	45,12		
Ponta Grossa	Sossego	2017	3298	1018	2279,94	223,96	1873,86	2
Média	—	—	3821	2006	1815,35	134,54		
----- Ponta Grossa - PR -----								
Ponta Grossa	Toruk	2015	5542	5532	9,50	0,17		
Ponta Grossa	Toruk	2015	4492	4483	8,60	0,19		
Ponta Grossa	Toruk	2017	3851	3595	256,38	7,13	1219,86	4
Ponta Grossa	Toruk	2017	3915	1489	2426,18	162,94		
Média	—	—	4450	3775	675,17	42,61		

⁽¹⁾ Número de safras usadas para validação. FONTE: A autora (2018).

Em Itaberá, a maioria das cultivares tiveram resultados simulados (Y_s) muito distintos dos observados (Y_r). A principal limitação para a validação das cultivares foi: *i*) Distribuição irregular de chuvas; *ii*) Ausência de precipitação muitos dias antes do florescimento e enchimento de grãos; e, *iii*) Pequeno número de safras utilizadas na calibração, resultando em intervalo de valores não confiáveis para os parâmetros ajustados (TABELA 4.8). Acredita-se que os baixos valores atribuídos ao HI_o não foram suficientes para simular as condições de seca que ocorreram em algumas safras.

As análises para a cultivar Quartzo em Ponta Grossa, na safra 2015 ($Ea = 294,11 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 15,28\%$), apresentaram boas condições de simulação. Os erros observados deveram-se provavelmente a problemas relacionados a pragas, doenças ou plantas infestantes, assim como observado para a cultivar Supera, na safra de 2009, em Castro. A cultivar Quartzo em Ponta Grossa, na safra 2017 ($Ea = 1437,57 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 68,33\%$), não apresentou boas condições de simulação. Houve estresse hídrico no ciclo, contabilizando apenas 8 mm de precipitação pluviométrica nos primeiros 35 dias após plantio (TABELA 4.8).

Para a cultivar Sinuelo em Ponta Grossa, na safra 2017 ($Ea = 715,00 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 19,78\%$), houve ausência de chuva no período de 20 dias, indo até o fim do florescimento. Em outro experimento com a cultivar Sinuelo, na safra 2017 ($Ea = 1996,56 \text{ kg ha}^{-1}$ e $Er = 113,51\%$) o estresse hídrico foi ainda maior, contabilizando nos primeiros 35 dias após plantio apenas 8 mm de precipitação pluviométrica. Como agravante, nos 29 dias que antecederam o florescimento não ocorreu precipitação, e durante o florescimento houve apenas 1,8 mm de chuva. (TABELA 4.8).

Para as cultivares Toruk e Sossego em Ponta Grossa, ambas na safra 2017, a principal limitação foi ausência de precipitação em períodos de 20 a 28 dias, respectivamente, que antecederam o florescimento (TABELA 4.8).

Hsiao et al. (2009) considera que erros absolutos superiores a 1000 kg ha^{-1} são considerados além dos limites de confiança do modelo. Logo, exceto para a cultivar Sossego, pode-se afirmar que a calibração possibilitou bons resultados para as cultivares nos municípios de Castro e Ponta Grossa.

Em geral, as maiores limitações observadas para associação das produtividades Y_{real} vs $Y_{simulada}$ deveram-se à ausência de água em períodos críticos da cultura. A incidência de precipitação é um fator climático, não podendo ser ajustado no modelo para melhorar os dados de saída.

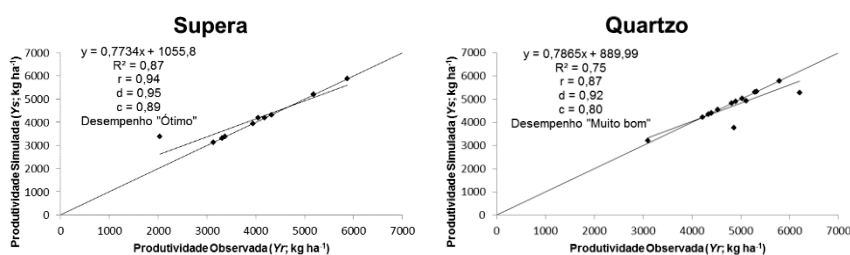
Em Castro, o desempenho obtido foi “ótimo” para a cultivar Supera e “muito bom” para Quartzo, tendo coeficiente de correlação $r = 0,94$ e $r = 0,87$, respectivamente (FIGURA 4.2a), indicando que o ajuste dos parâmetros no processo de calibração foi adequado para as cultivares na região. O índice “ d ” = 0,95 obtido no município de Castro é semelhante ao obtido por Kumar et al. (2014) na Índia (índice “ d ” = 0,96), para rendimento final em grãos. Andarzian et al. (2011) estudando o trigo irrigado no Irã também obtiveram bons resultados na validação (índice “ d ” = 0,97).

O desempenho “sofrível” e “mau” observado em Ponta Grossa para as cultivares TBIO Toruk e TBIO Sossego, respectivamente, deveu-se provavelmente ao pequeno número de experimentos utilizados na calibração (FIGURA 4.2c). Além disso, pode-se destacar a alta susceptibilidade destas cultivares a doenças, como Brusone, Manchas foliares, Oídio, entre outras (APÊNDICE 8). Logo, acredita-se que não foi possível ajustar adequadamente os parâmetros obtidos nas análises de sensibilidade e regressão linear para as duas cultivares, prejudicando a interpretação dos dados. Para as demais cultivares, o desempenho do modelo foi satisfatório, variando entre “muito bom” e “ótimo”.

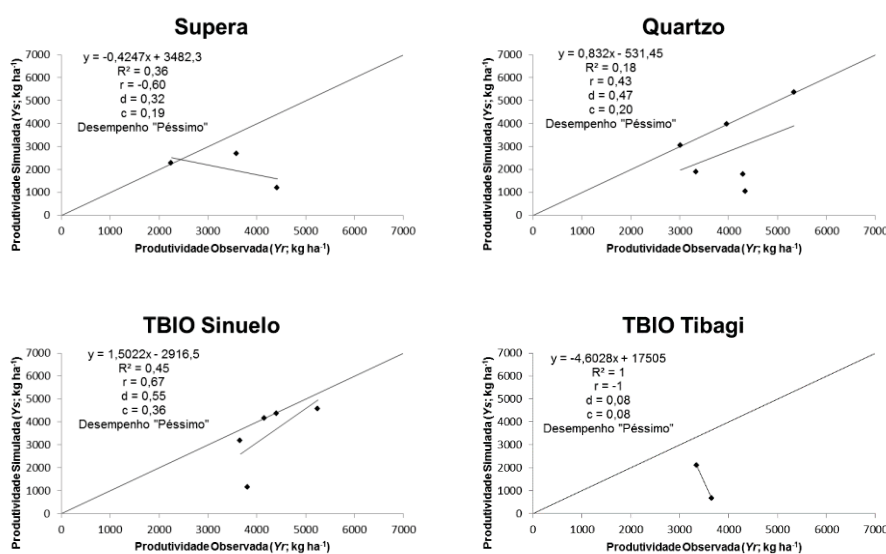
Todas as cultivares apresentaram desempenho “péssimo” em Itaberá (FIGURA 4.2b). O período de estiagem na maioria das safras prejudicou as análises de calibração e validação. Mesmo considerando a calibração por município, o desempenho apresentado ainda foi “péssimo”. A calibração mais adequada dos parâmetros do AquaCrop para as cultivares em Itaberá somente seria possível com maior número de experimentos e ausência de longos períodos de estiagem.

Considerando os ajustes estatísticos na validação, os melhores desempenhos obtidos foram para as cultivares Supera e TBIO Tibagi, em Ponta Grossa, com $RMSE = 93,45 \text{ kg ha}^{-1}$ para Supera e $RMSE = 5,76 \text{ kg ha}^{-1}$ para TBIO Tibagi, ambas com coeficiente de determinação (r^2), índices “ d ” e “ c ” igual a 1,00 (FIGURA 4.2). Os resultados obtidos foram semelhantes aos obtidos por Toumi et al. (2016), em que $r^2 = 0,98$ e $RMSE = 100 \text{ kg ha}^{-1}$.

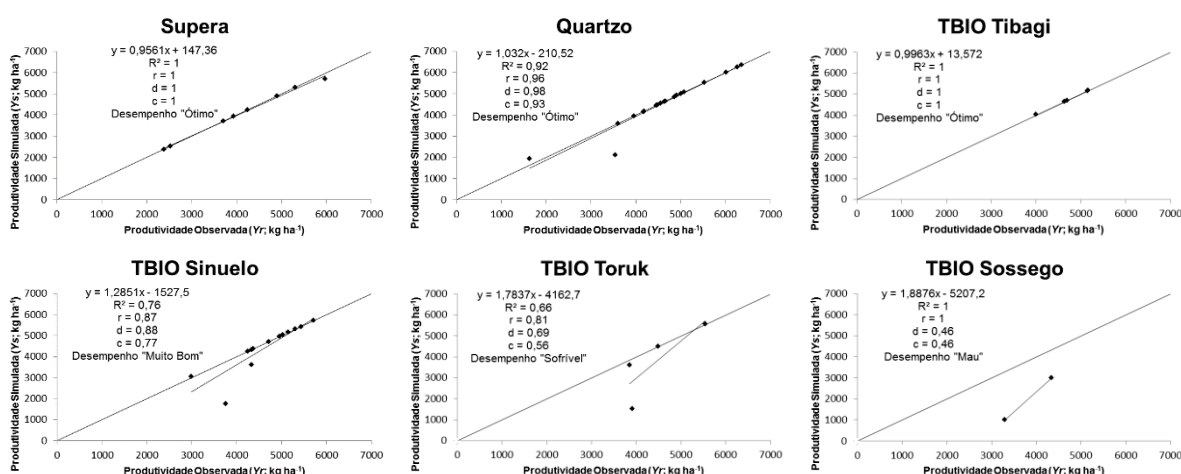
FIGURA 4.2 – ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E SEUS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (r^2), CORRELAÇÃO (r) E ÍNDICES “ d ”, ENTRE A PRODUTIVIDADE SIMULADA E OBSERVADA NO PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO AQUACROP, POR CULTIVAR AVALIADA NAS LOCALIDADES DE: a) CASTRO, b) ITABERÁ, c) PONTA GROSSA.



(a) Validação para as cultivares em Castro-PR, Região dos Campos Gerais.



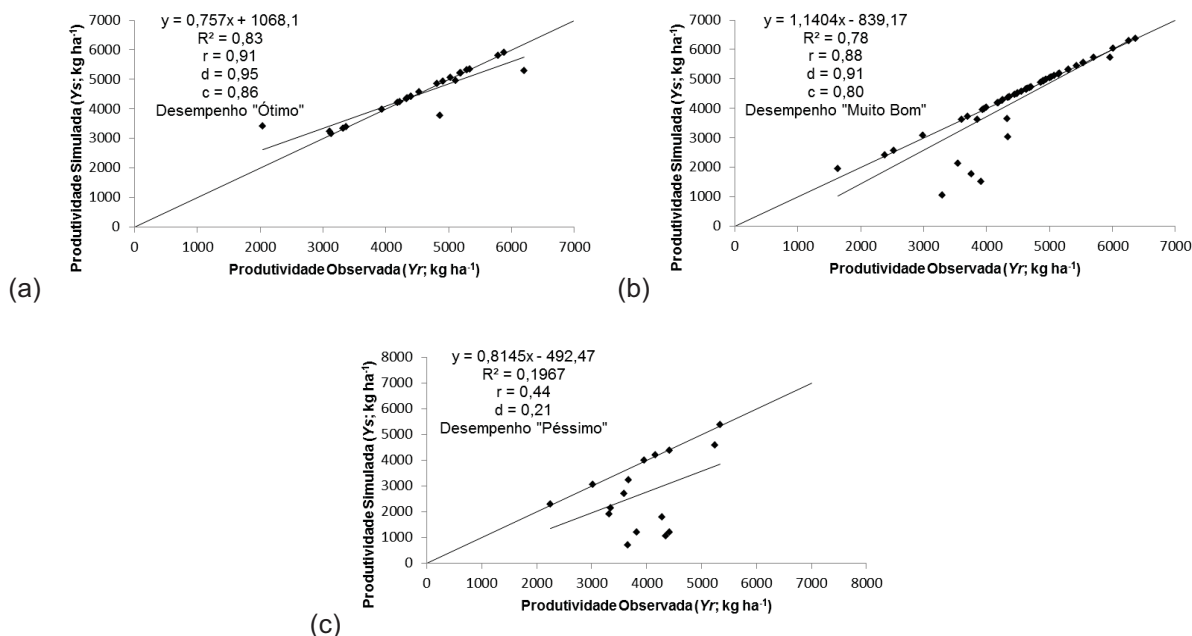
(b) Validação para as cultivares em Itaberá-SP, Região dos Campos Gerais.



(c) Validação para as cultivares em Ponta Grossa-PR, Região dos Campos Gerais.

FONTE: A autora (2018).

FIGURA 4.3 – ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E SEUS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (r^2), CORRELAÇÃO (r) E ÍNDICES “ d ”, ENTRE A PRODUTIVIDADE SIMULADA E OBSERVADA NO PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO AQUACROP, PARA TODAS AS CULTIVARES AVALIADAS NAS LOCALIDADES DE: a) CASTRO, b) PONTA GROSSA; E, c) ITABERÁ.



FONTE: A autora (2018).

A cultivar TBIO Sinuelo em Ponta Grossa ($RMSE = 588,43 \text{ kg ha}^{-1}$ e índice “ d ” = 0,88) foi a que mais se aproximou dos resultados de Kale (2016), que validou o trigo com AquaCrop considerando os valores de parâmetros sugeridos por Raes et al. (2009b), obtendo $RMSE = 330 \text{ kg ha}^{-1}$ e índice “ d ” = 0,83. A validação de Iqbal et al. (2014) com o trigo na China também apresentou resultados próximos, com $RSME = 580 \text{ kg ha}^{-1}$ e índice “ d ” = 0,92.

Análises entre a produtividade simulada e observada na validação do AquaCrop, considerando todas as cultivares avaliadas (FIGURA 4.3), indicaram resultados parecidos aos das análises por cultivar avaliada (FIGURA 4.2). Castro obteve desempenho “ótimo” ($r = 0,91$; “ d ” = 0,95 e “ c ” = 0,86), Ponta Grossa desempenho “muito bom” ($r = 0,88$; “ d ” = 0,91 e “ c ” = 0,80) e Itaberá desempenho “péssimo” ($r = 0,44$; “ d ” = 0,21 e “ c ” = 0,09). Os resultados obtidos em Castro e Ponta Grossa são muito promissores, e os de Itaberá merecem ser investigados. As produtividades estimadas em Itaberá tiveram boa associação e concordância

(distância da reta de 45°). Como a junção das cultivares não comprometeram os resultados de Castro e Ponta Grossa, outros fatores influenciaram nas estimativas das produtividades. São fatores que o processo de calibração não conseguiu ajustar adequadamente, ou que o AquaCrop não identificou.

4.6 CONCLUSÕES

- O intervalo de valores atribuído aos parâmetros mais sensíveis possibilitou excelentes calibrações para todas as cultivares de trigo avaliadas;
- O modelo AquaCrop gerou boa estimativa de rendimento para as cultivares Quartzo e Supera avaliadas no município de Castro, Estado do Paraná, apresentando resultados simulados muito semelhante aos observados;
- A validação das cultivares TBIO Toruk e TBIO Sossego no município de Ponta Grossa, Estado do Paraná, não foi adequada devido ao baixo número de safras disponíveis para o processo de calibração;
- No processo de validação todas as cultivares, avaliadas individualmente e em conjunto, apresentaram desempenho “Péssimo” no município de Itaberá, Estado de São Paulo, devido ao baixo número de safras utilizadas no processo de calibração e períodos de estiagem na validação.

4.7 REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDARZIAN, B., BANNAYAN, M., STEDUTO, P., MAZRAEH, H., BARATI, M. E., BARATI, M. A., RAHNAMA, A. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 100, p. 1–8, 2011.
- ANGULO, C.; RÖTTER, R.; LOCK, R.; ENDERS, A.; FRONZEK, S.; EWERT, F. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 170, p. 32-46, 2013.
- BELLO, Z. A.; WALKER, S. Calibration and validation of AquaCrop for pearl millet (*Pennisetum glaucum*). **Crop and Pasture Science**, v. 69, n. 3, p. 948-960, 2016.

BOUAZZAMA, B.; KARROU, M.; BOUTFIRASS, M.; BAHRI, A. Assessment of Aquacrop model in the simulation of durum wheat (*Triticum aestivum* L.) growth and yield under different water regimes. **Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires**, v. 5, n. 3, p. 222-230, 2017.

BUZETTI, S.; TEIXEIRA, M. C. M. Estimativa da produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada utilizando modelagem neuro fuzzy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 180-187, 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**, v. 5, p. 89-97, 1997.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. A cultura do trigo. Brasília: Conab, 2017. 218p.

CURTIS, B. C.; RAJARAM, S.; MACPHERSON, H. G. Wheat in the world, IN: Bread Wheat: Improvement and Production. **FAO Plant Production and Protection Series, N° 30**. Roma, FAO. 2002.

DARKO, R. O.; SHOUQI, Y.; HAOFANG, Y.; JUNPING, L.; ABBEY, A. Calibration and validation of AquaCrop for deficit and full irrigation of tomato. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 9, n. 3, p. 104-110, 2016.

EZEKIEL, O.; IGBADUN, H. E.; MUDIARE, O. J.; OYEBODE, M. A. Calibrating and validating AquaCrop model for maize crop in Northern zone of Nigeria. **Agricultural Engineering International**, v. 18, n. 3, 16p., 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, FAO. **Land & Water**. Aquacrop version 6.0. 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/Aquacrop/en/>> Acesso em 03 mar. 2018.

FOSTER, T.; BROZIVIĆ, N.; BUTLER, A. P.; NEALE, C. M. U.; RAES, D.; STEDUTO, P.; FERERES, E.; HSIAO, T. C. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. **Agricultural Water Management**, v. 181, p. 18-22, 2017.

GEERTS, S.; RAES, D.; GARCIA, M.; MIRANDA, R.; CUSICANQUI, J. A.; TABOADA, C.; MENDOZ, J.; HUANCA, R.; MAMANI, A.; CONDORI, O.; MAMANI, J.; MORALES, B.; OSCO, V.; STEDUTO, P. Simulating Yield Response of Quinoa to Water Availability with AquaCrop. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 499-508, 2009.

GOODING, M. J. **Wheat: Chemistry and Technology**. In: Chapter 2: The Wheat Crop. A volume in American Associate of Cereal Chemists International, 4ª Edição. Department of Agriculture, The University of Reading, Berkshire, United Kingdom, p. 19-49, 2009.

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

HSIAO, T. C.; HENG, L.; STEDUTO, P. AquaCrop – The FAO AquaCrop model simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 448-459, 2009.

HSIAO, T. C.; FERERES, E.; STEDUTO, P.; RAES, D. Chapter 3.3 AquaCrop parameterization, calibration, and validation guide; IN: Crop yield response to water. **FAO Irrigation and Drainage Paper N° 66**. Roma, FAO. 2012. 500p.

IQBAL, M. A.; SHEN, Y.; STRICEVIC, R.; PEI, H.; SUN, H.; AMIRI, E.; PENAS, A.; del RIO, S. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. **Agricultural Water Management**, v. 135, p. 61–72, 2014.

JACOVIDES, C. P.; KONTOYIANNIS, H. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. **Agricultural Water Management**, v. 27, p. 365-371, 1995.

JIN, X.; FENG, H.; ZHU, X.; LI, Z.; SONG, S.; SONG, X.; YANG, G.; XU, X.; GUO, W. Assessment of the AquaCrop Model for Use in Simulation of Irrigated Winter Wheat Canopy Cover, Biomass, and Grain Yield in the North China Plain. **Plos One**, v. 9, n. 1, 11p., 2014.

KALE, S. Assessment of Aquacrop model in the simulation of wheat growth under different water regimes. **Scientific Papers. Series A. Agronomy**, v. LIX, p. 308-314, 2016.

KUMAR, P.; SARANGI, A.; SINGH, D. K.; PARIHAR, S.S. Evaluation of Aquacrop model in predicting wheat yield and water productivity under irrigated saline regimes. **Irrigation and Drainage**, v. 63, p. 474–487, 2014.

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

MIRSAFI, Z.; 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, 2016.

MOHAMMADI, M.; GHAHRAMAN, B.; DAVARY, K.; ANSARI, H.; SHAHIDI, A.; BANNAYAN, M. Nested validation of Aquacrop model for simulation of winterwheat grain yield, soil moisture and salinity profiles under simultaneous salinity and water stress. **Irrigation and Drainage**, v. 65, p. 112–128, 2016.

MONTOYA, F.; CAMARGO, D.; ORTEGA, J. F.; CÓRCOLES, J. I.; DOMÍNGUEZ, A. Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, v. 164, part 2, p. 267-280, 2016.

PAREEK, N.; ROY, S.; SAHA, S.; NAIN, A. Calibration & validation of Aquacrop model for wheat crop in *Tarai* region of Uttarakhand. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 6, n. 5, p. 1442-1445, 2017.

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

PIERRI, L.; PAULETTI, V.; SILVA, D. A.; SCHERAIBER, C. F.; SOUZA, J. L. M.; MUNARO, F. C. Sazonalidade e potencial energético da biomassa residual agrícola na região dos Campos Gerais do Paraná. **Revista Ceres**, v. 63, n. 2, p. 129-137, 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**, v. 101, p. 438-447, 2009a.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. Crop Water Productivity. Calculation Procedures and Calibration Guidance. Aquacrop Version 3.0. Rome, FAO, 2009b.

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

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**: Chapter 3: Calculation procedures. Version 4.0. Rome, Italy. FAO, 2012, 125p.

RAES, D. **AquaCrop training handbooks**: Book I Understanding AquaCrop. Rome, Italy. FAO, 2017a. Disponível em: < <http://www.fao.org/3/a-i6051e.pdf>>. Acesso em 24 mai. 2018.

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

RAES, D. STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**: Chapter 1: FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water. Version 6.0 - 6.1. Rome, Italy. FAO, 2018a, 19p.

RAES, D. STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**: Chapter 2: Users Guide. Version 6.0 - 6.1. Rome, Italy. FAO, 2018b, 302p.

RAES, D. STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**: Chapter 3: Calculation procedures. Version 6.0 - 6.1. Rome, Italy. FAO, 2018c, 141p.

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

SHIMANDEIRO, A.; KANTELHARDT, J.; WEIRICH NETO, P. H. Characterization of major crop management in the buffer zone of Vila Velha State Park, state of Paraná, Brazil. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, p. 225-230, 2008.

SILVA, V. P. R.; SILVA, R. A.; MACIEL, G. F.; BRAGA, C. C.; JUNIOR, J. L. C.; SOUZA, E. P.; ALMEIDA, R. S. R.; SILVA, M. T.; HOLANDA, R. M. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 48, n. 1, 2018.

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

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

TAO, Z.; CHANG, X.; WANG, D.; WANG, Y.; MA, S.; YANG, Y.; ZHAO, G. Effects of sulfur fertilization and short-term high temperature on wheat grain production and wheat flour proteins. **The Crop Journal**, 13p., 2018.

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 Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 219-235, 2016.

TROMBETTA, A.; IACOBELLIS, V.; TARANTINO, E.; GENTILE, F. Calibration of the AquaCrop model for winter wheat using MODIS LAI images. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 304-316, 2016.

VAN VLIET, J.; BREGT, A. K.; BROWN, D. G.; VAN DELDEN, HECKBERT, S.; VERBURG, P. H. A review of current calibration and validation practices in land-change modeling. **Environmental Modelling & Software**, v. 82, p. 174-182, 2016.

XIANGXIANG, W.; QUANJIU, W.; JUN, F.; QIUPING, F. Evaluation of the AquaCrop model for simulating the impact of water deficits and different irrigation regimes on the biomass and yield of winter wheat grown on China's Loess Plateau. **Agricultural Water Management**, v. 129, p. 95-104, 2013.

WILLMOTT, C. J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 63, n.11, p. 1309-1313, 1982.

ZADOKS, J. C., CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, v. 14, p. 415-421, 1974.

ZHANG, W.; LIU, W.; XUE, Q.; CHEN, J.; HAN, X. Evaluation of the AquaCrop model for simulating yield response of winter wheat to water on the southern Loess Plateau of China. **Water Science & Technology**, v. 68, n. 4, p. 821-828, 2013.

5 CONCLUSÕES GERAIS

- Os atributos físico-hídricos avaliados não evidenciaram restrições ao manejo de culturas na Região dos Campos Gerais. Devido a variabilidade, a determinação e comparação de atributos físico-hídricos é importante para estudos futuros envolvendo a estimativa do rendimento de culturas nos Campos Gerais, utilizando modelos de simulação agrícola;
- Recomenda-se o ajuste por meio da calibração do AquaCrop para os parâmetros mais sensíveis observados no presente estudo. O índice de colheita de referência (HI_o) foi o parâmetro que apresentou maior sensibilidade no AquaCrop para a cultura do trigo, nas três localidades avaliadas. A produtividade da água normalizada para ET_o e CO_2 (WP^*), coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{CTR,x}$), níveis de fertilidade e máxima cobertura do dossel (CC_x) também são sensíveis para as três localidades avaliadas;
- O intervalo de valores atribuído aos parâmetros mais sensíveis possibilitou excelentes calibrações para todas as cultivares de trigo avaliadas;
- O modelo AquaCrop gerou boa estimativa de rendimento para as cultivares Quartzo e Supera avaliadas no município de Castro, Estado do Paraná, apresentando resultados simulados muito semelhante aos observados. A validação das cultivares TBIO Toruk e TBIO Sossego no município de Ponta Grossa, Estado do Paraná, não foi adequada devido ao baixo número de safras disponíveis para o processo de calibração.

6 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O modelo AquaCrop foi capaz de gerar boa estimativa de rendimento para a cultura do trigo na Região dos Campos Gerais, principalmente nos municípios de Castro e Ponta Grossa, Estado do Paraná. A principal limitação para o município de Itaberá, Estado de São Paulo, foi devido ao baixo número de safras e períodos de estiagem. É necessário que o modelo AquaCrop seja calibrado e validado para condições de déficit hídrico, para abranger de maneira adequada cenários climáticos com limitação de precipitação.

Com os valores estabelecidos para os parâmetros mais sensíveis no presente estudo é possível estimar a produtividade da cultura em outras localidades na Região Sul do País, as quais apresentem mesma condição de clima. Já os valores dos atributos físico-hídricos devem ser inseridos no programa baseados em observações a campo para cada área de estudo, para que os dados gerados apresentem maior confiabilidade.

Uma vez determinado os valores dos parâmetros no processo de calibração é possível identificar as melhores épocas de plantio da cultura nos diferentes municípios que adotam o cultivo do trigo.

Com o entendimento das respostas da planta ao estresse hídrico observado no AquaCrop é possível adotar um plano de irrigação em áreas sob déficit hídrico.

7 REFERÊNCIAS GERAIS

ADÂMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L. G.; NETTO, J. M. Caracterização da região dos Cerrados. In: GOEDERT, W. J. **Solos dos cerrados. Tecnologias e estratégias de manejo**, 1985. Brasília: Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, 1985. p. 33-74.

ALENCAR, L. P. **Parametrização e validação do modelo aquacrop para a cultura da cana-de-açúcar**. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2014.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, **56**, Rome: FAO, 1998. 300 p.

ALMEIDA, A. T. **Processos de decisões nas organizações**: Construindo modelo de decisão multicritério. 1ª Edição. São Paulo: Atlas, 2013. 256 p.

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

ANDARZIAN, B., BANNAYAN, M., STEDUTO, P., MAZRAEH, H., BARATI, M. E., BARATI, M. A., RAHNAMA, A. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 100, p. 1–8, 2011.

ANDRADE, A. S.; SANTOS, P. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; ARAUJO, L. C.; PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S.; MARIN, F. R.; LARA, M. A. S. Simulating tropical forage growth and biomass accumulation: an overview of model development and application. **Grass and Forage Science**, v. 1, p. 1-12, abr. 2015.

ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 111-116, 2011.

ANDRIOLO, M. V.; SANTOS, I.; GIBERTONI, R. C.; CAMARGO, A. S. G. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 2008, Belo Horizonte. **Anais do VI SPMCH**. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2008. v. 1, 18p.

ANGULO, C.; RÖTTER, R.; LOCK, R.; ENDERS, A.; FRONZEK, S.; EWERT, F. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 170, p. 32-46, 2013.

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

BAIRD, B. F. *Managerial Decisions Under Uncertainty: An Introduction to the Analysis of Decision Making*. **Wiley Series In Engineering & Technology Management**. New York. 1989, 544p.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M.H.F.; MACHADO, R.E. & OLIVEIRA, M.P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro - Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 253-261, 2010.

BARBOSA, J. dos S.; SILVA, K. do C. R.; CARDUCCI, C. E.; SANTOS, K. L. dos; KOHN, L. S.; FUCKS, J. S. Atributos físico-hídricos de um Cambissolo Húmico sob sistema agroflorestal no planalto catarinense. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017, 9p.

BASSO, B.; CAMMARANO, D.; CARFAGNA, E. Review of crop yield forecasting methods and early warning systems. In: Proceedings of the First Meeting of the Scientific Advisory Committee of the Global Strategy to Improve Agricultural and Rural Statistics. **FAO Headquarters**, Rome, Italy, p. 18–19, 2013.

BELLO, Z. A.; WALKER, S. Calibration and validation of AquaCrop for pearl millet (*Pennisetum glaucum*). **Crop and Pasture Science**, v. 69, n. 3, p. 948-960, 2016.

BELTON, V.; STEWART, T. **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach**. Kluwer Academic Publishers, 2002, 372 p.

BITRI, M.; GRAZHDANI, S. Validation of AquaCrop model in the simulation of sugar beet production under different water regimes in southeastern Albania. **International Journal of Engineering Science and Innovative Technology**, v. 4, n. 6, p. 171-181, nov. 2015.

BOGNOLA, I. A.; DEDECEK, R. A.; LAVORANTI, O. J.; HIGA, A. R. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, p. 37-49, 2010.

BOUAZZAMA, B.; KARROU, M.; BOUTFIRASS, M.; BAHRI, A. Assessment of Aquacrop model in the simulation of durum wheat (*Triticum aestivum* L.) growth and yield under different water regimes. **Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires**, v. 5, n. 3, p. 222-230, mar. 2017.

BOUYOUCOS, G. J. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soil. **American Society of Agronomy Journal**, v. 43, p. 434-438, 1951.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 5. ed. São Paulo: F. Bastos, 1979. 647 p.

BROCH, D. T.; KLEIN, V. A. Maximum soil density of Entisols as a function of silt content. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 12, 2017, 7p.

BUZETTI, S.; TEIXEIRA, M. C. M. Estimativa da produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada utilizando modelagem neuro fuzzy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 180-187, 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**, v. 5, p. 89-97, 1997.

CARDOSO, C.; FARIA, F. T.; FOLEGATTI, M. V. Aplicação do modelo CERES-maize na análise de estratégias de irrigação para milho “safrinha” em Londrina-PR. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 37-45, jan./abr. 2004.

CARLESSO, R.; SANTOS, R. F. Disponibilidade de água às plantas de milho em solos de diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 17-25, 1999.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. de; REIS, E. F. dos; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. de. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 147-157, 2009.

CASTELLINI, M.; GIGLIO, L.; NIEDDA, M.; PALUMBO, A. D.; VENTRELLA, D. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 1-13, 2015.

CASTRO, M. A. de; CUNHA, F. F. da; LIMA, S. F. de; NETO, V. B. de P.; LEITE, A. P. MAGALHÃES, F. F.; CRUZ, G. H. M. da. Atributos físico-hídricos do solo ocupado com pastagem degradada e floresta nativa no Cerrado Sul-Matogrossense. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Ituiatuba, v. 3, n. 2, p. 498-512, jul./dec. 2012.

CHRISTENSEN, A. J.; SRINIVASAN, V.; HART, J. C.; MARSHALL-COLON, A. Use of computational modeling combined with advanced visualization to develop strategies for the design of crop ideotypes to address food security. **Nutrition reviews**, v. 76, n. 5, p. 332-347, may. 2018.

CIBIN R.; SUDHEER, K.P.; CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 1133-1148, 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. A cultura do trigo. Brasília: Conab, 2017. 218p.

CURTIS, B. C.; RAJARAM, S.; MACPHERSON, H. G. Wheat in the world, IN: Bread Wheat: Improvement and Production. **FAO Plant Production and Protection Series, N° 30**. Roma, FAO. 2002.

DALLA MARTA, A.; NATALI, F.; ORLANDINI, S. **Serbia for excel**: Aquacrop the FAO crop-model to simulate yield response to water. Department of Agrifood Production and Environmental Sciences University of Firenze, Italy. Novi Sad, Serbia. 2016, 125p. Disponível em: <http://serbiaforexcell.com/upload/dokumenta/1501521354-AquaCrop_short.pdf> Acesso em 09 out. 2017.

DARKO, R. O.; SHOUQI, Y.; HAOFANG, Y.; JUNPING, L.; ABBEY, A. Calibration and validation of AquaCrop for deficit and full irrigation of tomato. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 9, n. 3, p. 104-110, 2016.

DOORENBOS, J., KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper N° 33**. Roma, FAO. 1979.193p.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212p.

EZEKIEL, O.; IGBADUN, H. E.; MUDIARE, O. J.; OYEBODE, M. A. Calibrating and validating AquaCrop model for maize crop in Northern zone of Nigeria. **Agricultural Engineering International**, v. 18, n. 3, 16p., 2016.

FABIAN, A. J.; OTTONI FILHO, T. B. Determinação de capacidade de campo *in situ* ou através de equações de regressão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 1029-1036, mai. 2000.

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

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

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015-2024**. In: BRAZILIAN AGRICULTURE: PROSPECTS AND CHALLENGES. 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i4738e.pdf>>. Acesso em 02 mar. 2018.

FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS T. Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 469-476, 2009.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Água em solos arenosos: estabelecimento de déficit hídrico em culturas. In: **XXVII REUNIÃO DE PESQUISAS DE SOJA DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL**, 2005. Cornélio Procópio: Embrapa Soja, 2005. p. 147-155.

FORSYTHE, W. **Física de suelos: Manual de laboratorio**. San José, Costa Rica: IICA, 1975. 212p.

FOSTER, T.; BROZIVIĆ, N.; BUTLER, A. P.; NEALE, C. M. U.; RAES, D.; STEDUTO, P.; FERERES, E.; HSIAO, T. C. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. **Agricultural Water Management**, v. 181, p. 18-22, 2017.

FREITAS, L. de; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, V. M. R. de; OLIVEIRA, I. A de; MORETI, T. C. F. Avaliação de atributos químicos e físicos de solos com diferentes

texturas sob vegetação nativa. In: **ENCICLOPÉDIA Biosfera**. Goiânia: Centro Científico Conhecer. 2014, v. 10, n. 18, p. 523.

FUNDAÇÃO ABC. Soluções tecnológicas para o agronegócio. Disponível em: <<http://www.fundacaoabc.org>>. Acesso em 15 jun. 2018.

FUNDAÇÃO ABC. Soluções tecnológicas para o agronegócio. Disponível em: <<http://www.fundacaoabc.org>>. Acesso em 16 set. 2017.

GARCIA-VILA, M.; FERERES, E.; MATEOS, L.; ORGAZ, F.; STEDUTO, P. Deficit irrigation optimization of cotton with Aquacrop. **Agronomy Journal**, v. 10, p. 477-487, 2009.

GARG, A.; LI, J.; HOU, J.; BERRETTA, C.; GARG, A. A new computational approach for estimation of wilting point for green infrastructure. **Measurement**, v. 111, p. 351-358, jul. 2017.

GEERTS, S.; RAES, D.; GARCIA, M.; MIRANDA, R.; CUSICANQUI, J. A.; TABOADA, C.; MENDOZA, J.; HUANCA, R.; MAMANI, A.; CONDORI, O.; MAMANI, J.; MORALES, B.; OSCO, V.; STEDUTO, P. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 498-508, 2009.

GIMENES, F. H. S. **Curva de retenção na avaliação da qualidade física do solo**. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2012.

GOMES, A. C. dos S.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; SOARES, F. C.; PARIZI, A. R. C. Modelo para estimativa da produtividade para a cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 1, p. 43-49, jan. 2014.

GONÇALVES, A. D. M. de A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1174-1184, 2013.

GONÇALVES, D. R. P.; ROCHA, C. H. Indicadores de qualidade de água e padrões de uso da terra em bacias hidrográficas no Estado do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p.1172-1183, set. 2016.

GOODING, M. J. **Wheat: Chemistry and Technology**. In: Chapter 2: The Wheat Crop. A volume in American Associate of Cereal Chemists International, 4ª Edição. Department of Agriculture, The University of Reading, Berkshire, United Kingdom, p. 19-49, 2009.

GUBIANI, P.I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v. 36, p. 664-668, abr. 2006.

GUPTA, S. C., LARSON, W. E. Modeling Soil Mechanical Behavior During Tillage. IN: UNGER, P.; VAN DOREN JR, D. M.; WHISLER, F.D.; SKIDMORE, E.L. **Symposium on predicting tillage effects on soil physical properties and processes**. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America: ASA Special Publication 44, Madison, WI. p. 151-178, 1982.

GURSKI, B. C. **Componentes hídricas prováveis e zoneamento de risco agroclimático para o Estado do Paraná**. 121 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

HE, D.; WANG, E.; WANG, J.; ROBERTSON, M. J. Data requirement for effective calibration of process-based crop models. **Agricultural and Forest Meteorologist**, v. 234, p. 136-148, 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**, v. 101, p. 487-498, 2009.

HILLEL, D. **Solo e água: fenômeno e princípios físicos**. Porto alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 231p.

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. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n.3, p. 448–459, 2009.

HSIAO, T. C.; FERERES, E.; STEDUTO, P.; RAES, D. Chapter 3.3 AquaCrop parameterization, calibration, and validation guide; IN: Crop yield response to water. **FAO Irrigation and Drainage Paper N° 66**. Roma, FAO. 2012. 500p.

HUANG, M.; LIANG, T.; WANG, L.; ZHOU, C. Effects of no-tillage systems on soil physical properties and carbon sequestration under long-term wheat–maize double cropping system. **Catena**, Amsterdam, v. 128, P. 195-202, 2015.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2015). IBGE@idades, Produção Agrícola Municipal. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/TABELA/99>>. Acesso em 04 jul. de 2018.

IQBAL, M. A.; SHEN, Y.; STRICEVIC, R.; PEI, H.; SUN, H.; AMIRI, E.; PENAS, A.; del RIO, S. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. **Agricultural Water Management**, v. 135, p. 61–72, 2014.

JACOVIDES, C. P.; KONTOYIANNIS, H. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. **Agricultural Water Management**, v. 27, p. 365-371, 1995.

JIN, X.; FENG, H.; ZHU, X.; LI, Z.; SONG, S.; SONG, X.; YANG, G.; XU, X.; GUO, W. Assessment of the AquaCrop Model for Use in Simulation of Irrigated Winter Wheat Canopy Cover, Biomass, and Grain Yield in the North China Plain. **Plos One**, v. 9, n. 1, 11p., 2014.

KALE, S. Assessment of Aquacrop model in the simulation of wheat growth under different water regimes. **Scientific Papers. Series A. Agronomy**, v. LIX, p. 308-314, 2016.

KIEHL, J.E. **Manual de edafologia**. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KLEIN, V. A. **Propriedade do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira**. Passo Fundo: Ed. UPF, 2005. 61p.

KOEKKOEK, E. J. W.; BOOLTINK, H. Neural network models to predict **soil** water retention. **European Journal of Soil Science**, v. 50, p. 489-495, sep. 1999.

KUMAR, P.; SARANGI, A.; SINGH, D. K.; PARIHAR, S.S. Evaluation of Aquacrop model in predicting wheat yield and water productivity under irrigated saline regimes. **Irrigation and Drainage**, v. 63, p. 474–487, 2014.

LELIS, T.A.; CALIJURI, M.L.; SANTIAGO, A.F.; LIMA, D.C.; ROCHA, E.O. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, 12p., 2012.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

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

LOSS, A.; SANTOS JUNIOR, E. dos.; SCHMITZ, D.; VEIGA, M. da.; KURTZ, C.; COMIN, J. J. Atributos físicos do solo em cultivo de cebola sob sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas**, Bogotá, Colombia, v. 11, n. 1, p. 105-113, jan./jun. 2017.

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, 2015.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 163-170, 2006.

MARSARO, M. F. **Estudo de robustez e análise de sensibilidade no modelo multicritério para gerenciamento de risco em gasodutos baseado em MAUT**. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2013.

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

MARTÍN, M. A.; REYES, M.; TAGUAS, J. Estimating soil bulk density with information metrics of soil texture. **Geoderma**, v. 287, p. 66-70, 2017.

MARTINS, M. A. **Estimativa da produtividade da cultura do milho no semiárido brasileiro, com base no modelo Aquacrop e previsão climática sazonal**. Tese 115 f. (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2017.

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.

MOHAMMADI, M.; GHAHRAMAN, B.; DAVARY, K.; ANSARI, H.; SHAHIDI, A.; BANNAYAN, M. Nested Validation of Aquacrop Model for Simulation of Winter Wheat Grain Yield, Soil Moisture and Salinity Profiles under Simultaneous Salinity and Water Stress. **Irrigation and Drainage**, v. 65, p. 112–128, jan. 2016.

MONTOYA, F.; CAMARGO, D.; ORTEGA, J. F.; CÓRCOLES, J. I.; DOMÍNGUEZ, A. Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, v. 164, part 2, p. 267-280, 2016.

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

MORETTI, A. R.; MENDES, B. V. de M. Sobre a precisão das estimativas de máxima verossimilhança nas distribuições bivariadas de valores extremos. **Pesquisa Operacional**, v. 23, n. 2, mai./ago. 2003.

NUTTALL, J. G.; KIRSTEN, M. B.; DELAHUNTY, A. J.; CHRISTY, B. P.; O'LEARY, G. J. Acute High Temperature Response in Wheat. *Crop Ecology and Physiology*. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 4, may. 2018. 13p.

OLIVEIRA, C. T. **Calibração, validação, análise de sensibilidade e identificação dos melhores períodos de plantio das culturas da soja e milho com o modelo Aquacrop, na Região dos Campos Gerais**. 87f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Curitiba, 2017.

OLIVEIRA, P. D. de; SATO, M. K.; LIMA, H. V. de; RODRIGUES, S.; SILVA, A. P. da. Critical limits of the degree of compactness and soil penetration resistance for the soybean crop in N Brazil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 179, p. 78–87, 2016.

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

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

PARDO, A.; AMATO, M.; CHIARANDÀ, F. Q. Relationships between soil structure, root distribution and water uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.). Plant growth and water distribution. **European Journal of Agronomy**, v. 13, p. 39-45, 2000.

PAREEK, N.; ROY, S.; SAHA, S.; NAIN, A. Calibration & validation of Aquacrop model for wheat crop in Tarai region of Uttarakhand. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 6, n. 5, p. 1442-1445, 2017.

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

PIEKARSKI, K. R. **Produtividade de soja e milho em plantio direto com o modelo Aquacrop na região dos Campos Gerais**. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

PIEKARSKI, K. R.; SOUZA, J. L. M. de; JERSZURKI, D.; TSUKAHARA, R. Y.; OLIVEIRA, C. T. de. Simulação da produtividade da soja em três tipos de solo como modelo AquaCrop. **IV Convibra Congresses Conferences**, 2016.

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

PIERRI, L.; PAULETTI, V.; SILVA, D. A.; SCHERAIBER, C. F.; SOUZA, J. L. M.; MUNARO, F. C. Sazonalidade e potencial energético da biomassa residual agrícola na região dos Campos Gerais do Paraná. **Revista Ceres**, v. 63, n. 2, p. 129-137, 2016.

PREVEDELLO, C. L. Programa Splintex para estimar a curva de retenção de água a partir da granulometria (composição) do solo. Versão 1.0. Curitiba: UFPR, 1999.

QUEIROZ, A. F. de. **Caracterização e classificação de solos do município de Casa Nova-BA para fins de uso, manejo e conservação**. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2013.

RAES, D. **AquaCrop training handbooks: Book I Understanding AquaCrop**. Rome, Italy. FAO, 2017a. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i6051e.pdf>>. Acesso em 24 mai. 2018.

RAES, D. STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual: Chapter 1: FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water. Version 6.0 - 6.1**. Rome, Italy. FAO, 2018a, 19p.

RAES, D. STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual: Chapter 2: Users Guide. Version 6.0 - 6.1**. Rome, Italy. FAO, 2018b, 302p.

RAES, D. STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual: Chapter 3: Calculation procedures. Version 6.0 - 6.1**. Rome, Italy. FAO, 2018c, 141p.

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

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. Crop Water Productivity. Calculation Procedures and Calibration Guidance. Aquacrop Version 3.0. Rome, FAO, 2009b.

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

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**: Chapter 2: Users guide. Version 4.0. Rome, Italy. FAO, 2012a, 164p.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual**: Chapter 3: Calculation procedures. Version 4.0. Rome, Italy. FAO, 2012b, 125p.

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

RAMOS, B. Z.; PAIS, P. S. M.; FREITAS, W. A.; JUNIOR, M. S. D. Avaliação dos atributos físico-hídricos em um Latossolo Vermelho distroférrico sob diferentes sistemas de manejo – Lavras/Minas Gerais/Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 36, n. 3, p. 340-346, jul. 2013.

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

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478p.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 14, n. 27, p. 29-48, jul./dez. 2003.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, mai. 2006, 30p.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. Falling head soil core (Tank) method. In: DANE, J.H.; TOPP, C. **Methods of soil analysis**. **Soil Science Society of America**, 2002, p. 809-812.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. da G. B. de F.; SAMPAIO, F. de M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, jul./ago. 2007.

RICHARDS, L. A.; WALDLEIGHT, C. H. Soil water and plant growth. In: **Soil physical conditions growth**. Ed. BT Shaw. Academic Press, New York. p. 73-251, 1952.

RIZZARDI, A. S.; RIGHES, A. A.; KEMERICH, D. da C.; SILVA, R. F. da; SANTOS, S. A. dos; BORBA, W. F. de. Atributos físicos e fluxo de água em solos da bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim – RS. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 13, n. 5, p. 3690-3701, 2014.

ROSA, H. A.; VELOSO, G.; SECCO, D.; RUFFATO, G. G.; MARCONDES, L. C.; SANTOS, R. F. Efeitos do tempo de adoção do sistema plantio direto em atributos físicos de um Latossolo argiloso. **Cascavel**, v. 5, n. 2, p. 165-174, 2012.

ROSA, S. L. K.; SOUZA, J. L. M.; TSUKAHARA, R. Y.; SANTOS, A. A.; RITA, Y. L. Análise de sensibilidade do modelo AquaCrop para a cultura do trigo na Região dos Campos Gerais. **VI Convibra Congresses Conferences**, 2018.

ROSSETTI, K. de V.; CENTURION, J.F. Sistemas de manejo e atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 5, p. 472-479, 2013.

RÜHLMANN, J.; KÖRSCHENS, M.; GRAEFE, J. A new approach to calculate the particle density of soils considering properties of the soil organic matter and the mineral matrix. **Geoderma**, v. 130, n. 3-4, p. 272-283, 2006.

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

SANTANA, S. C. **Indicadores físicos da qualidade de solos no monitoramento de pastagens degradadas da Região Sul do Tocantins**. 76 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2009.

SANTOS, F. C. dos; BARCELOS, A. C.; RODRIGUES, S. C. Distribuição de atributos físicos do solo sob vertente em ambiente de Cerrado nativo do Triângulo Mineiro. **Caderno de Geografia**, v. 25, n. 43, 2015.

SCHAETZEL, R. J.; ANDERSON, S. **Soils: Genesis and Geomorphology**. New York: Cambridge University Press, 2005, 817p.

SCHERAIBER, C. F. **Adaptação metodológica para a estimativa e caracterização das relações hídricas como suporte ao planejamento agrícola**. 153f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

SCHJØNNING, P.; MCBRIDE, R. A.; KELLER, T.; OBOU, P. B. Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. **Geoderma**, v. 286, p. 83-87, 2017.

SCHOENHOLTZ, S. H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J. A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, v. 138, p. 335-356, 2000.

SCHOONOVER, J. E.; CRIM, J. F. An Introduction to Soil Concepts and the Role of Soils in Watershed Management. **Journal of Contemporary Water Research e Education**, v. 154, n. 1, p. 21-47, 2015.

SECCO, D.; ROS, C. O. da; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 407-414, 2005.

SHIMANDEIRO, A.; KANTELHARDT, J.; WEIRICH NETO, P. H. Characterization of major crop management in the buffer zone of Vila Velha State Park, state of Paraná, Brazil. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 2, p. 225-230, abr./jun. 2008.

SILVA, A. C. da. **Modelos de pedotransferência aplicados na simulação das funções hidráulicas e da variabilidade espacial do solo**. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

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

SILVA, J. F. G.; SEVERIANO, E. da C.; COSTA, K. A. de P.; BENITES, V. de M.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. da S.; BENTO, J. C. Chemical and physical-hydric characterisation of a Red Latosol after five years of management during the summer between-crop season. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1576-1586, 2014.

SILVA, J. M. A. **Modelo hidrológico para o cálculo do balanço hídrico e obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas: desenvolvimento e aplicação**. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Viçosa, 2002.

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

SILVA, V. P. R.; SILVA, R. A.; MACIEL, G. F.; BRAGA, C. C.; JUNIOR, J. L. C.; SOUZA, E. P.; ALMEIDA, R. S. R.; SILVA, M. T.; HOLANDA, R. M. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 48, n. 1, 2018.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 191-199, 2000.

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

SOARES, J. D. R. **Modelagem matemática na previsão da colheita de bananeira: regressão linear múltipla x redes neurais artificiais**. 115 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2011.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF. Classification of Soil Texture Class Boundaries. In: **Soil Survey Manual**. U.S. Govt. Printing Office, 1993. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_031477.pdf>. Acesso em 19 dez. 2017.

SOUZA, G.S. de; SOUZA, Z.M. de; COOPER, M.; TORMENA, C.A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, v. 72, p. 270-277, may./jun. 2015.

SOUZA, J. L. M.; PIEKARSKI, K. R.; TSUKAHARA, R. Y.; GURSKI, B. C. Atributos físico-hídricos de solos no sistema de plantio direto, Região dos Campos Gerais. **Convibra Congresses Conferences**, 2017.

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

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

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301–1309, 2013.

TACONELI, C. A.; BARRETO, M. C. M. Intervalos de confiança para a média populacional usando amostragem em conjuntos ordenados. **Revista de Matemática e Estatística**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 41-66, 2003.

TAO, Z.; CHANG, X.; WANG, D.; WANG, Y.; MA, S.; YANG, Y.; ZHAO, G. Effects of sulfur fertilization and short-term high temperature on wheat grain production and wheat flour proteins. **The Crop Journal**, 13p., 2018.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; RIBON, A. A. Physical properties of dystrophic red Latosol (Oxisol) under different agricultural uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 925-933, 2010.

TODOROVIC, M.; ALBRIZIO, R.; ZIVOTIC, L.; ABI SAAB M. T.; STÖCKLE, C.; STEDUTO, P. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 508–521, 2009.

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

TROMBETTA, A.; IACOBELLIS, V.; TARANTINO, E.; GENTILE, F. Calibration of the AquaCrop model for winter wheat using MODIS LAI images. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 304-316, 2016.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

VAN LIER, Q. de J. Field capacity, a valid upper limit of crop available water?. **Agricultural Water Management**, v. 19, p. 214-220, nov. 2017.

VAN VLIET, J.; BREGT, A. K.; BROWN, D. G.; VAN DELDEN, HECKBERT, S.; VERBURG, P. H. A review of current calibration and validation practices in land-change modeling. **Environmental Modelling & Software**, v. 82, p. 174-182, 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**, n. 62, p.351-360, 2014.

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; WILLEMNS, P. Considering sink strength to model crop production under elevated atmospheric CO₂. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 12, p.1753-1762, dez. 2011.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentages of soils. **Science**, v. 68, p. 75-94, 1949.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction storage and movement of soil, air and water. **American Society of Agricultural Engineering**, v. 4, p. 242-246, 1966.

WAHA, K.; HUTH, N.; CARBERRY, P.; WANG, E. How model and input uncertainty impact maize yield simulations in West Africa. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 2, fev. 2015. 11p.

WARRICK, A. W. Appendix 1: Spatial variability. In Hillel D. **Environmental Soil Physics**. Academic Press, San Diego, p. 655-675, 1998.

WILLMOTT, C. J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 63, n.11, p. 1309-1313, 1982.

XIANGXIANG, W.; QUANJIU, W.; JUN, F.; QIUPING, F. Evaluation of the AquaCrop model for simulating the impact of water deficits and different irrigation regimes on the biomass and yield of winter wheat grown on China's Loess Plateau. **Agricultural Water Management**, v. 129, p. 95-104, 2013.

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

ZADOKS, J. C., CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, v. 14, p. 415-421, 1974.

ZHANG, W.; LIU, W.; XUE, Q.; CHEN, J.; HAN, X. Evaluation of the AquaCrop model for simulating yield response of winter wheat to water on the southern Loess Plateau of China. **Water Science & Technology**, v. 68, n. 4, p. 821-828, 2013.

APÊNDICE 1 – DETERMINAÇÃO DA TEXTURA DO SOLO COM O MÉTODO DO HIDRÔMETRO DE BOUYOUCOS (1951)

Passos ou procedimentos para realização do método:

- Solução dispersante: Calgon: 4 g L⁻¹ de NaOH + 10 g L⁻¹ de Hexametáfosfato de sódio.
- Materiais: Peneiras, frasco de vidro de 500 ml, provetas, NaOH 1N e Hexametáfosfato de Sódio (Calgon);
- Equipamentos: agitador elétrico, cronômetro, densímetro, balança de precisão e estufa;
- Procedimento: Secar as amostras de solo em estufa a 105 °C por 24 horas (TFSE). Passar o solo seco em peneira 2 mm. Pesar 40 g de solo e colocar no frasco de vidro para agitação. Adicionar 200 mL de solução dispersante ao frasco de vidro. Adicionar água destilada no vidro de agitação até atingir 3/4 do volume do frasco e agitar por 16 horas. Colocar o conteúdo na proveta de 1000 mL e completar o volume com água. Para a prova em branco adiciona-se o mesmo volume de dispersante e completa com água. Homogeneizar a suspensão por um minuto. Colocar o hidrômetro 10 segundos antes da primeira leitura, que deverá ser feita 40 segundos após o término da agitação. Realizar a segunda leitura duas horas após a homogeneização. Determinar o fator f de correção da massa de solo.
- Cálculos do fator f :

$$f = \frac{\text{TFSA}}{\text{TFSE}}$$

Sendo: TFSA – terra fina seca em ar; TFSE – terra fina seca em estufa.

- Cálculo das frações granulométricas:

$$\text{Areia total (\%)} = 100 - (1^\circ \text{ Leitura} - \text{Branco})$$

$$\text{Silte (\%)} = [(1^\circ \text{ Leitura} - 2^\circ \text{ Leitura}) - \text{Branco}] \cdot 2,5$$

$$\text{Argila (\%)} = (2^\circ \text{ Leitura} - \text{Branco}) \cdot 2,5$$

É importante observar que é necessária a correção das leituras, dividindo-se o resultado de cada leitura pelo fator f .

FIGURA A1-1 – MÉTODO DO HIDRÔMETRO DE BOUYOUCOS EM LABORATÓRIO PARA DETERMINAÇÃO DE TEXTURA DO SOLO.



FONTE: A autora (2018).

REFERÊNCIAS

BOUYOUCOS, G. J. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soil. **American Society of Agronomy Journal**, v. 43, p. 434-438, 1951.

APÊNDICE 2 – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DO SOLO COM O MÉTODO DO BALÃO VOLUMÉTRICO MODIFICADO (Adaptado de Gubiani et al., 2006)

Passos ou procedimentos para realização do método:

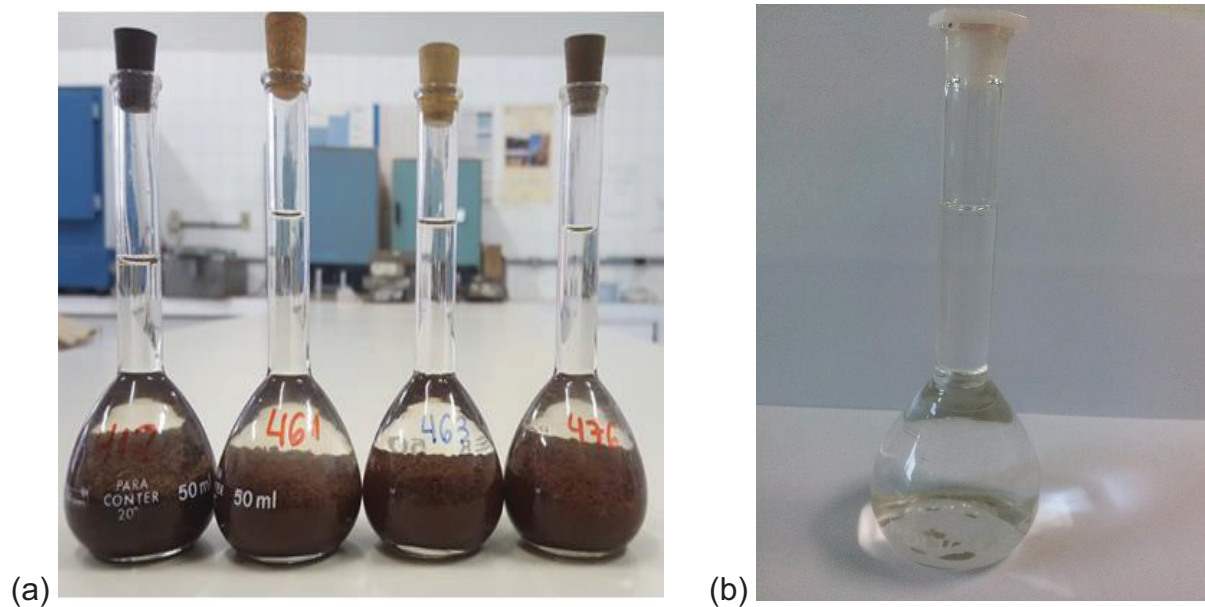
- Reagente: álcool etílico (92 °GL);
- Materiais: balão volumétrico de 50 ml e bureta;
- Equipamentos: estufa e balança de precisão;
- Procedimento: macerar as amostras de solo, secar em estufa a 105 °C por 24 horas (TFSE) e resfriar em dessecador. Medir a massa do balão volumétrico seco. Transferir aproximadamente 20 g de TFSE para o balão volumétrico e pesar a massa do balão mais solo. Adicionar álcool etílico (92 °GL) na bureta e transferir o álcool da bureta até a metade do volume do balão contendo solo. Agitar manualmente até eliminação do ar existente entre as partículas do solo. Completar o volume do balão com álcool até o menisco de aferição. Ajustar novamente o volume do álcool com o menisco de aferição do balão, gotejando-se álcool com uso de bureta (FIGURA A2-1a). Pesar o balão contendo o solo mais o álcool. Determinar a massa específica do álcool adicionando-o em balão volumétrico de massa previamente conhecida, até ajustar a sua capacidade e tomando-se a massa do álcool contido no balão (FIGURA A2-1b). Realizar a média de quatro repetições para a determinação da massa específica do álcool;
- Cálculos:

$$\rho_a = \frac{M_a}{V_b}$$

$$\rho_{ps} = \frac{M_{bs} - M_b}{50 - \left(\frac{M_{bsa} - M_{bs}}{\rho_a} \right)}$$

Sendo: ρ_a – massa específica do álcool (g cm^{-3}); M_a – massa de álcool (g); V_b – volume do balão (cm^{-3}); ρ_{ps} – massa específica de partículas do solo (g cm^{-3}); M_b – massa do balão volumétrico (g); M_{bs} – massa do balão volumétrico contendo o solo (g); M_{bsa} – massa do balão volumétrico contendo solo mais álcool (g).

FIGURA A2-1 – MÉTODO DO BALÃO VOLUMÉTRICO MODIFICADO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DO SOLO: a) BALÕES VOLUMÉTRICOS CONTENDO SOLO E ÁLCOOL; E, b) BALÃO VOLUMÉTRICO CONTENDO ÁLCOOL PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO ÁLCOOL.



FONTE: A autora (2018).

REFERÊNCIAS

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v. 36, p. 664-668, 2006.

APÊNDICE 3 – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO SOLO COM O MÉTODO DO ANEL VOLUMÉTRICO (Adaptado de Embrapa, 1997)

Passos ou procedimentos para realização do método:

– Materiais e equipamentos: anel de aço (Kopecky) de bordas cortantes; paquímetro; estufa; e, balança de precisão;

– Procedimento: com o auxílio de um paquímetro, determinar as dimensões do anel volumétrico fazendo as medidas de diâmetro e altura, e calcular o volume de cada anel. As amostras indeformadas de solo deverão ser coletadas cravando o anel na profundidade de solo desejada. Realizar a toailete da amostra em laboratório (FIGURA A3-1). Colocar anel e amostra em estufa a 105 °C por 48 horas e pesar após total resfriamento. Retirar a amostra de solo do anel e pesar a massa de solo;

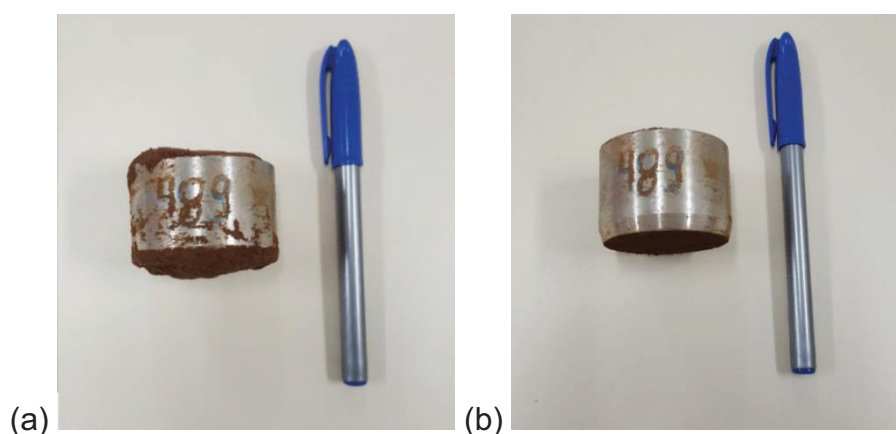
– Cálculos:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V}$$

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h$$

Sendo: ρ_s – massa específica do solo (kg m^{-3}); V – Volume do anel (m^{-3}); D – diâmetro do anel (m); h – altura do anel (m); m_s – massa de solo seco (kg).

FIGURA A3-1 – AMOSTRA INDEFORMADA DE SOLO, COLETADA COM ANEL VOLUMÉTRICO, PARA DETERMINAÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA DO SOLO: a) ANTES DA TOAILETE; E, b) APÓS TOAILETE.



FONTE: A autora (2018).

REFERÊNCIAS

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212p.

APÊNDICE 4 – DETERMINAÇÃO DA UMIDADE NA CAPACIDADE DE CAMPO COM O MÉTODO DA MESA DE TENSÃO, PARA OBTENÇÃO DA MICROPOROSIDADE DO SOLO (Adaptado de Embrapa, 1997)

Passos ou procedimentos para realização do método:

- Materiais: anel de aço (Kopecky) de bordas cortantes, placa de Petri, papel mata-borrão e tela metálica de malha 0,25 mm;
- Equipamentos: mesa de tensão na altura de 60 cm, estufa e balança de precisão;
- Procedimento: limpar a lâmina de vidro da mesa de tensão e colocar a tela metálica de malha 0,25 mm e dimensão de 40 x 40 cm, de forma centralizada. Colocar uma folha de papel mata-borrão com dimensões de 45 x 45 cm centralizada e manter o frasco à 60 cm de altura. Adicionar 500 ml de uma suspensão coloidal proveniente da determinação de argila. Colocar a segunda e terceira folha do papel. Realizar teste de funcionamento da mesa de tensão. Cobrir a base inferior dos cilindros metálicos com um pedaço de poliéster e prender com um elástico. Colocar os anéis volumétricos com as amostras em bandeja com água para saturar por 24 horas e pesar. Colocar as amostras saturadas sobre o papel mata-borrão (FIGURA A4-1), cobrir com bandeja de plástico e abaixar o frasco até o desnível de 60 cm entre o orifício de saída de água e a base da mesa de tensão, formando sucção correspondente a 60 cm de altura de coluna de água. Após 24 horas pesar as amostras, repetindo a operação até obter estabilização dos pesos (pesos constantes). Verificar se não houve quebra da coluna de água. Em seguida colocar o cilindro em placa de Petri, pesar e transferir para a estufa a 105 °C. Após 48 horas, pesar e determinar o peso do bloco seco;
- Cálculos:

$$\theta_{CC} = \frac{(m_{60} - m_{as})}{V \cdot \rho_a}$$

Sendo: θ_{CC} – umidade na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); m_{60} – massa da amostra após equilíbrio quando submetida à tensão de 60 cm de coluna de água; m_{as} – massa da amostra seca (kg); V – volume do anel (m^{-3}); ρ_s – massa específica da água (1000kg m^{-3}).

FIGURA A4-1 – AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLO, COLETADA COM ANEL VOLUMÉTRICO, EM MESA DE TENSÃO DE 60 cm DE COLUNA DE ÁGUA, PARA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE NA CAPACIDADE DE CAMPO.



FONTE: A autora (2018).

REFERÊNCIAS

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212p.

APÊNDICE 5 – DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO, COM O MÉTODO DE CARGA DECRESCENTE (Adaptado de Reynolds e Elrick, 2002)

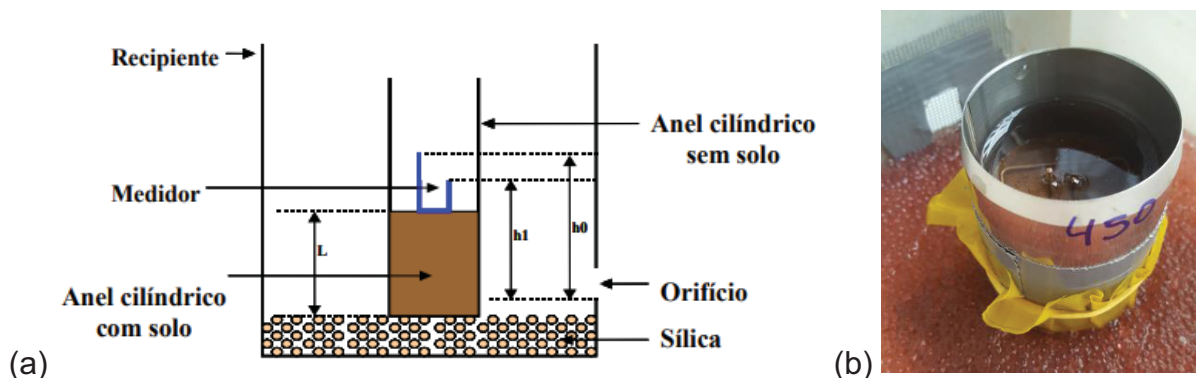
Passos ou procedimentos para realização do método:

- Materiais: anel de aço (Kopecky) de bordas cortantes;
- Recipiente com um orifício contendo sílica;
- Medidor com hastes de metal de tamanho conhecido;
- Equipamento: Cronômetro;
- Procedimento: dispor na extremidade superior do anel volumétrico contendo amostra outro anel de igual tamanho, e unir as extremidades com fita isolante de alta aderência. Inserir o conjunto de anéis em recipiente com sílica, o qual possui orifício que permita que a água escoe estabelecendo fluxo de água através da amostra de solo dentro do recipiente. O deslocamento da água sobre a amostra de solo, de altura L , no tempo t , corresponde ao deslocamento da água entre duas alturas (h_0 e h_1). (FIGURA A5-1).
- Cálculos:

$$K_{SAT} = \left(\frac{L}{t} \right) \cdot \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right)$$

Sendo: K_{sat} – condutividade hidráulica saturada (mm h^{-1}); L – altura do anel cilíndrico com solo (m); h_0 – altura da maior haste (m); h_1 – altura da menor haste (m); t – tempo (segundos).

FIGURA A5-1 – MÉTODO DO PERMEÂMETRO DE CARGA DECRESCENTE PARA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO: a) ILUSTRAÇÃO DO PROCEDIMENTO PARA DETERMINAR A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA COM O MÉTODO DE FALLING-HEAD (CAVALIERI, 2007, ADAPTADO DE REYNOLDS E ELRICK, 2002); E, b) CONJUNTO DE ANÉIS COM PERMEÂMETRO EM FUNCIONAMENTO.



FONTE: a) Cavalieri, 2007; b) A autora (2018).

REFERÊNCIAS

CAVALIERI, K. M. V. **Aspectos metodológicos da pesquisa sobre compactação e qualidade física do solo**. 72 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.

REYNOLDS, W. D. AND ELRICK, D. E. Hydraulic Conductivity of Saturated Soils, Constant Head Method. In: Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods, Book Series 5, **Soil Science Society of America**, Madison, WI, p. 694-700, 2002.

APÊNDICE 6 – ATRIBUTOS FÍSICOS HÍDRICOS OBTIDOS PARA AS LOCALIDADES DE ARAPOTI, ITABERÁ E PONTA GROSSA

TABELA A6-1 – TEORES DE ARGILA, SILTE, AREIA FINA, AREIA GROSSA E AREIA TOTAL, MASSA ESPECÍFICA DO SOLO (ρ_s), MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DE SOLO (ρ_{ps}), POROSIDADE TOTAL (α), MICROPOROSIDADE, MACROPOROSIDADE, UMIDADE VOLUMÉTRICA NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE (θ_{pmp}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (θ_{cc}), CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL (CAD) E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (K_{sat}), EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE ARAPOTI, FUNDAÇÃO ABC, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

Local	Camada (m)	Classificação textural	Argila	Silte	Textura (g kg ⁻¹)			ρ_s (kg m ⁻³)	ρ_{ps} (kg m ⁻³)	α (m ³ m ⁻³)	Microporos (m ³ m ⁻³)	Macroporos (m ³ m ⁻³)	θ_{pmp} (m ³ m ⁻³)	θ_{cc} (m ³ m ⁻³)	CAD (mm)	K_{sat} (mm h ⁻¹)
					Areia fina	Areia grossa	Areia total									
Arapoti	0,0-0,10	Franco Argilo-arenosa	225	75	252,22	447,78	700	1494,55	2777,74	0,50	0,31	0,19	0,12	0,31		143,57
Arapoti	0,10-0,25	Franco Argilo-arenosa	275	25	239,94	460,06	700	1544,14	2777,74	0,47	0,27	0,21	0,14	0,27	51,48	213,64
Arapoti	0,25-0,40	Franco Argilo-arenosa	325	25	224,16	425,84	650	1441,85	2816,87	0,51	0,27	0,25	0,18	0,27		323,94
Arapoti	0,0-0,10	Franco Argilo-arenosa	275	25	222,84	477,16	700	1474,40	2777,74	0,51	0,25	0,26	0,15	0,25		1276,70
Arapoti	0,10-0,25	Franco Argilo-arenosa	275	25	219,61	480,39	700	1582,11	2816,87	0,45	0,28	0,18	0,12	0,28	53,35	64,12
Arapoti	0,25-0,40	Franco Argilo-arenosa	300	25	211,78	463,22	675	1648,74	2777,74	0,44	0,27	0,17	0,14	0,27		358,10
Arapoti	0,0-0,10	Franco Argilo-arenosa	350	25	219,20	405,80	625	1514,12	2739,72	0,45	0,32	0,13	0,18	0,32		55,91
Arapoti	0,10-0,25	Franco Argilo-arenosa	375	50	220,20	354,80	575	1469,41	2816,87	0,47	0,30	0,17	0,18	0,30	48,94	54,55
Arapoti	0,25-0,40	Franco Argilo-arenosa	400	25	227,23	347,77	575	1396,03	2816,87	0,47	0,30	0,16	0,20	0,30		132,30
Arapoti	0,0-0,10	Franco Argilo-arenosa	325	50	214,53	410,47	625	1326,97	2777,74	0,58	0,31	0,27	0,19	0,31		1378,03
Arapoti	0,10-0,25	Franco Argilo-arenosa	350	25	213,23	411,77	625	1264,07	2777,74	0,55	0,29	0,26	0,20	0,29	49,02	744,12
Arapoti	0,25-0,40	Franco Argilo-arenosa	325	25	215,31	434,69	650	1574,95	2816,87	0,45	0,31	0,14	0,15	0,31		31,82
Arapoti	0,0-0,10	Franco Argilo-arenosa	225	50	213,86	511,14	725	1381,41	2816,87	0,52	0,27	0,26	0,12	0,27		471,08
Arapoti	0,10-0,25	Franco Argilo-arenosa	250	25	208,83	516,17	725	1624,28	2816,87	0,46	0,28	0,18	0,10	0,28	62,53	56,40
Arapoti	0,25-0,40	Franco Argilo-arenosa	250	25	208,63	516,37	725	1525,04	2777,74	0,44	0,27	0,17	0,12	0,27		63,29
		Média ⁽¹⁾	301,67	33,33	220,77	444,23	665,00	1484,14	2793,47	0,49	0,29	0,20	0,15	0,29	53,07	357,84
		Desvio Padrão ⁽¹⁾	53,84	15,43	11,84	52,96	51,58	108,37	24,57	0,04	0,02	0,05	0,03	0,02	5,60	440,71
		CV (%) ⁽¹⁾	17,85	46,29	5,36	11,92	7,76	7,30	0,88	8,76	7,81	23,62	21,56	7,81	10,55	123,16

⁽¹⁾ Medidas de tendência e dispersão calculados com valores de todas as amostras retiradas na Estação Experimental de Arapoti (30 amostras). FONTE: A autora (2018).

TABELA A6-2 – TEORES DE ARGILA, SILTE, AREIA FINA, AREIA GROSSA E AREIA TOTAL, MASSA ESPECÍFICA DO SOLO (ρ_s), MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DE SOLO (ρ_{ps}), POROSIDADE TOTAL (α), MICROPOROSIDADE, MACROPOROSIDADE, UMIDADE VOLUMÉTRICA NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE (θ_{MP}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (θ_{cc}), CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL (CAD) E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (K_{sat}), EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE ITABERÁ, FUNDAÇÃO ABC, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

Local	Camada (m)	Classificação Textural	Textura ($g\ kg^{-1}$)					ρ_s ($kg\ m^{-3}$)	ρ_{ps} ($kg\ m^{-3}$)	α ($m^3\ m^{-3}$)	Microporos ($m^3\ m^{-3}$)	Macroporos ($m^3\ m^{-3}$)	θ_{MP} ($m^3\ m^{-3}$)	θ_{cc} ($m^3\ m^{-3}$)	CAD (mm)	K_{sat} ($mm\ h^{-1}$)
			Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total									
Itaberá	0,0-0,10	Argilosa	475	100	254,23	170,77	425	1348,68	2739,72	0,55	0,41	0,15	0,27	0,41		191,81
Itaberá	0,10-0,25	Argilosa	525	75	226,61	173,39	400	1469,42	2777,74	0,51	0,38	0,13	0,27	0,38	43,47	35,16
Itaberá	0,25-0,40	Argilosa	550	50	238,46	161,54	400	1356,78	2777,74	0,52	0,38	0,14	0,29	0,38		15,20
Itaberá	0,0-0,10	Argilosa	575	75	196,39	153,61	350	1384,33	2941,12	0,62	0,44	0,18	0,27	0,44		73,33
Itaberá	0,10-0,25	Argilosa	625	50	183,91	141,09	325	1403,76	2898,54	0,56	0,40	0,16	0,28	0,40	60,50	57,68
Itaberá	0,25-0,40	Argilosa	625	75	177,23	122,77	300	1282,48	2857,12	0,61	0,40	0,21	0,24	0,40		1309,91
Itaberá	0,0-0,10	Argilosa	550	50	164,16	235,84	400	1399,56	2739,72	0,57	0,38	0,20	0,32	0,38		346,17
Itaberá	0,10-0,25	Argilosa	575	50	157,82	217,18	375	1492,84	2816,87	0,51	0,38	0,13	0,30	0,38	38,94	15,37
Itaberá	0,25-0,40	Argilosa	575	50	160,54	214,46	375	1316,47	2856,87	0,55	0,40	0,16	0,27	0,40		209,12
Itaberá	0,0-0,10	Argilosa	525	75	151,42	248,58	400	1409,51	2816,87	0,53	0,39	0,15	0,28	0,39		96,87
Itaberá	0,10-0,25	Argilosa	575	50	144,95	230,05	375	1325,98	2777,74	0,47	0,33	0,14	0,28	0,33	31,68	22,10
Itaberá	0,25-0,40	Argilosa	550	75	148,97	226,03	375	1421,13	2816,90	0,53	0,38	0,16	0,30	0,38		25,61
Itaberá	0,0-0,10	Argilosa	475	100	162,68	262,32	425	1449,61	2816,87	0,52	0,38	0,14	0,25	0,38		116,85
Itaberá	0,10-0,25	Argilosa	500	75	159,50	265,50	425	1553,19	2777,74	0,46	0,36	0,11	0,24	0,36	53,61	13,82
Itaberá	0,25-0,40	Argilosa	550	75	156,79	218,21	375	1312,13	2777,74	0,56	0,38	0,18	0,23	0,38		688,42
		Média ⁽¹⁾	550,00	68,33	178,91	202,76	381,67	1395,06	2812,62	0,54	0,39	0,15	0,27	0,39	45,64	214,49
		Desvio Padrão ⁽¹⁾	45,32	17,59	34,60	45,32	35,94	74,78	56,45	0,04	0,02	0,03	0,03	0,02	11,50	352,01
		CV (%) ⁽¹⁾	8,24	25,75	19,34	22,35	9,42	5,36	2,01	8,06	6,15	17,11	9,31	6,15	25,20	164,11

⁽¹⁾ Medidas de tendência e dispersão calculados com valores de todas as amostras retiradas na Estação Experimental de Itaberá (30 amostras). FONTE: A autora (2018).

TABELA A6-3 – TEORES DE ARGILA, SILTE, AREIA FINA, AREIA GROSSA E AREIA TOTAL, MASSA ESPECÍFICA DO SOLO (ρ_s), MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DE SOLO (ρ_{ps}), POROSIDADE TOTAL (α), MICROPOROSIDADE, MACROPOROSIDADE, UMIDADE VOLUMÉTRICA NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE (θ_{MP}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (θ_{cc}), CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL (CAD) E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (K_{sat}), EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE PONTA GROSSA, FUNDAÇÃO ABC, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

Local	Camada (m)	Classificação textural	Textura (g kg ⁻¹)				ρ_s (kg m ⁻³)	ρ_{ps} (kg m ⁻³)	α (m ³ m ⁻³)	Microporos (m ³ m ⁻³)	Macroporos (m ³ m ⁻³)	θ_{MP} (m ³ m ⁻³)	θ_{cc} (m ³ m ⁻³)	CAD (mm)	K_{sat} (mm h ⁻¹)
			Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa									
Ponta Grossa	0,0-0,10	Franco Argilo-arenosa	200	200	220,11	379,89	600	1499,27	2702,69	0,48	0,34	0,22	0,34	45,70	258,28
Ponta Grossa	0,10-0,25	Franco Argilo-arenosa	350	25	216,12	408,88	625	1565,35	2702,69	0,49	0,31	0,25	0,31	45,70	13,63
Ponta Grossa	0,25-0,40	Franco Argilo-arenosa	350	25	199,74	425,26	625	1365,65	2702,69	0,55	0,32	0,16	0,32		411,89
Ponta Grossa	0,0-0,10	Argilosa	450	125	189,24	235,76	425	1210,87	2739,72	0,64	0,43	0,21	0,43		15,66
Ponta Grossa	0,10-0,25	Argilosa	500	75	187,34	237,66	425	1314,94	2857,12	0,53	0,42	0,11	0,42	92,01	25,08
Ponta Grossa	0,25-0,40	Argilosa	575	50	167,61	207,39	375	1206,61	2739,72	0,62	0,46	0,16	0,46		151,71
Ponta Grossa	0,0-0,10	Argilosa	450	100	225,90	224,10	450	1270,13	2702,69	0,65	0,41	0,23	0,41		954,76
Ponta Grossa	0,10-0,25	Argilosa	525	50	214,52	210,48	425	1362,51	2777,74	0,55	0,40	0,15	0,40	49,38	147,14
Ponta Grossa	0,25-0,40	Argilosa	575	50	198,10	176,90	375	1237,19	2777,74	0,58	0,42	0,16	0,42		42,89
Ponta Grossa	0,0-0,10	Argilosa	450	100	193,16	256,84	450	1173,73	2702,69	0,61	0,45	0,16	0,45		56,41
Ponta Grossa	0,10-0,25	Argilosa	525	50	187,86	237,14	425	1358,37	2777,74	0,55	0,41	0,14	0,41	60,08	39,20
Ponta Grossa	0,25-0,40	Argilosa	575	25	181,27	218,73	400	1123,82	2739,72	0,70	0,42	0,27	0,42		493,32
Ponta Grossa	0,0-0,10	Argilosa	475	125	181,25	218,75	400	1288,69	2702,69	0,61	0,40	0,21	0,40		1061,95
Ponta Grossa	0,10-0,25	Argilosa	550	75	184,84	190,16	375	1282,36	2739,72	0,54	0,37	0,18	0,37	70,55	222,33
Ponta Grossa	0,25-0,40	Argilosa	650	50	158,77	141,23	300	1077,57	2666,64	0,67	0,40	0,26	0,40		1069,41
	Média ⁽¹⁾		480,00	75,00	193,72	251,28	445,00	1289,14	2735,47	0,58	0,40	0,19	0,40	63,54	330,91
	Desvio Padrão ⁽¹⁾		113,47	48,18	19,11	84,57	96,46	130,55	47,37	0,06	0,04	0,05	0,04	18,64	389,31
	CV (%) ⁽¹⁾		23,64	64,24	9,86	33,66	21,68	10,13	1,73	10,94	26,15	24,00	11,20	29,34	117,65

⁽¹⁾ Medidas de tendência e dispersão calculados com valores de todas as amostras retiradas na Estação Experimental de Ponta Grossa (30 amostras).
 FONTE: A autora (2018).

APÊNDICE 7 – SÉRIE TEMPORAL DOS DADOS CLIMÁTICOS DAS LOCALIDADES DE CASTRO-PR, ITABERÁ-SP E PONTA GROSSA-PR, INSERIDOS NO AQUACROP PARA REALIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

FIGURA A7.1 – SÉRIE DE DADOS CLIMÁTICOS DO MUNICÍPIO DE CASTRO-PR, INSERIDOS NO AQUACROP PARA REALIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES: a) TEMPERATURAS MÍNIMA, MÁXIMA E MÉDIA, E PRECIPITAÇÃO; b) UMIDADE RELATIVA, VELOCIDADE DO VENTO E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE.

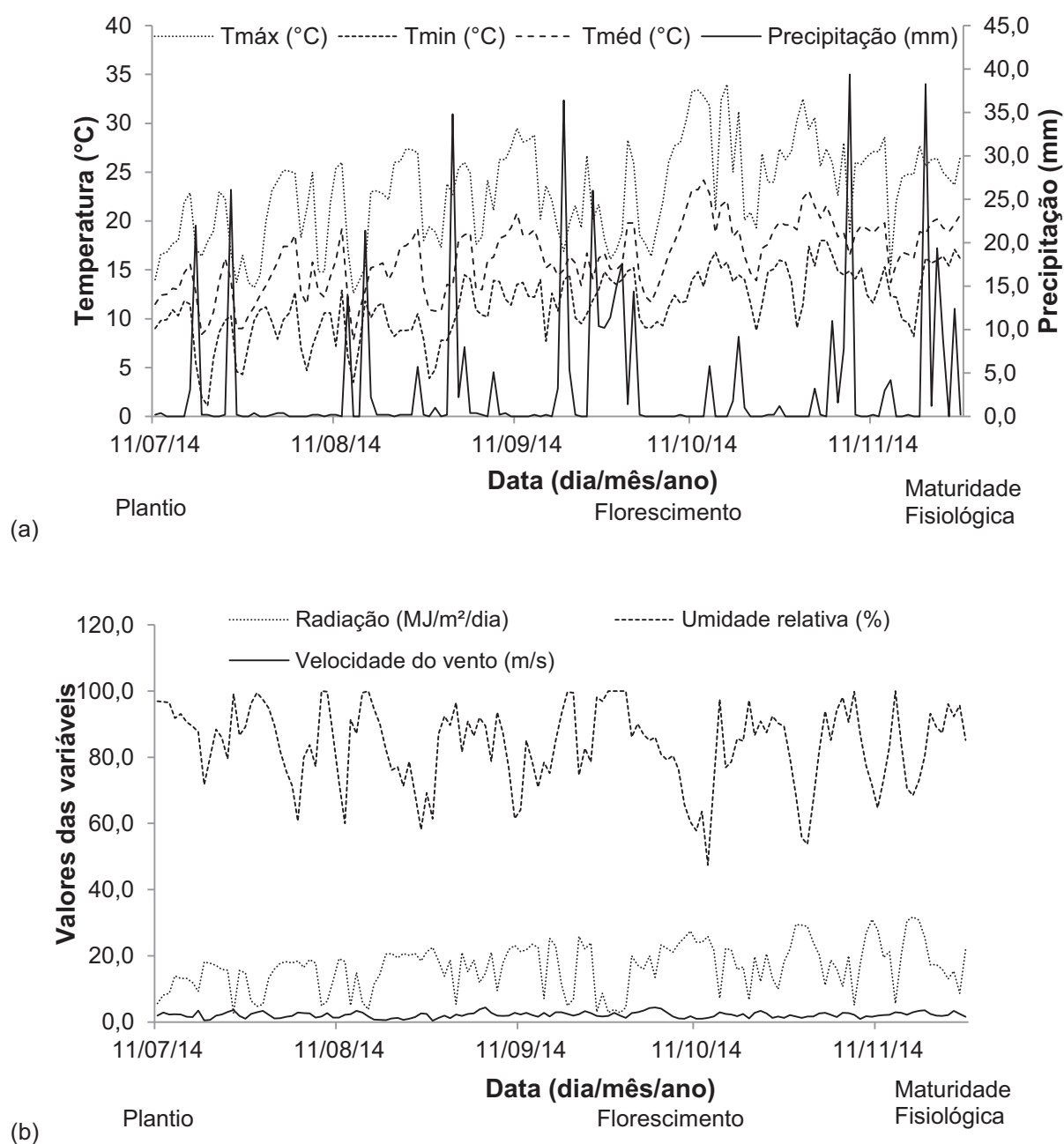


FIGURA A7.2 – SÉRIE DE DADOS CLIMÁTICOS DO MUNICÍPIO DE ITABERÁ-SP, INSERIDOS NO AQUACROP PARA REALIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES: a) TEMPERATURAS MÍNIMA, MÁXIMA E MÉDIA, E PRECIPITAÇÃO; b) UMIDADE RELATIVA, VELOCIDADE DO VENTO E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE.

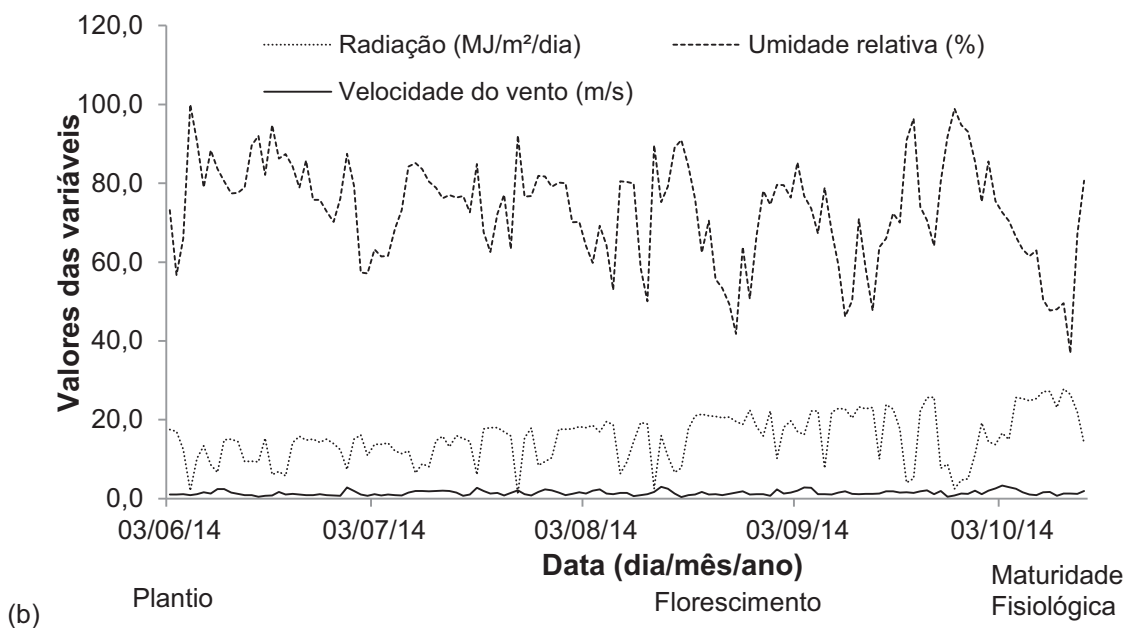
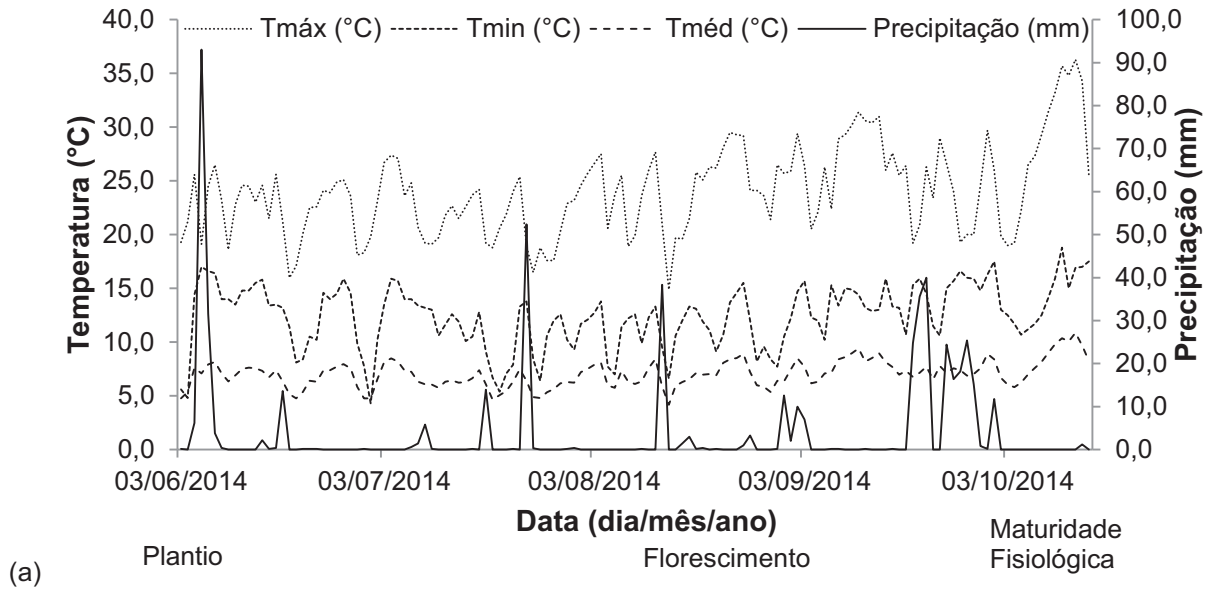
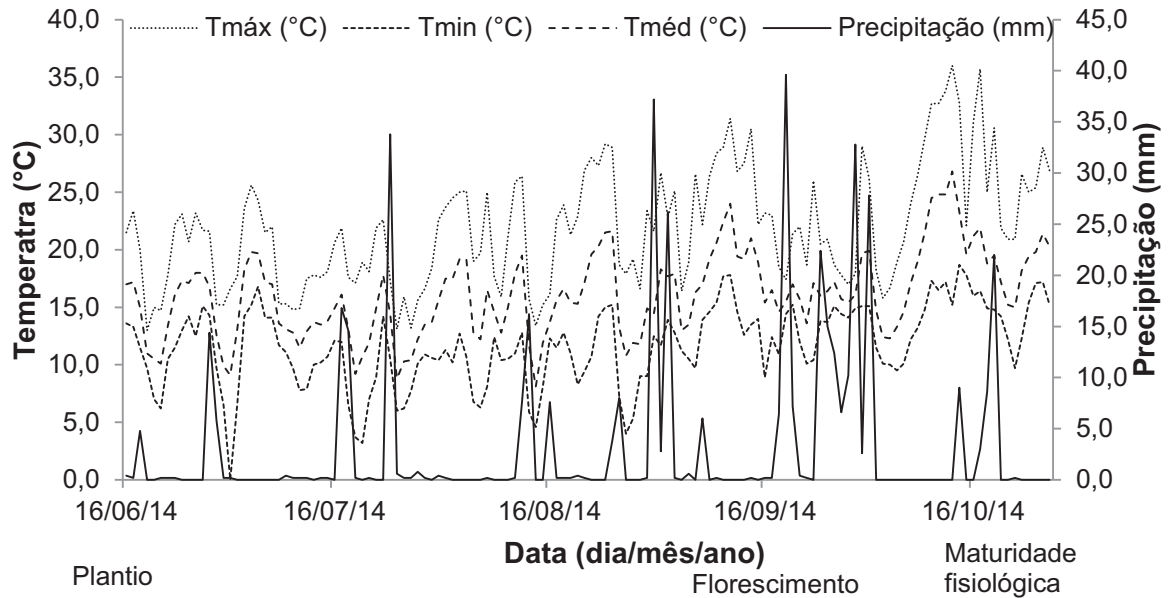
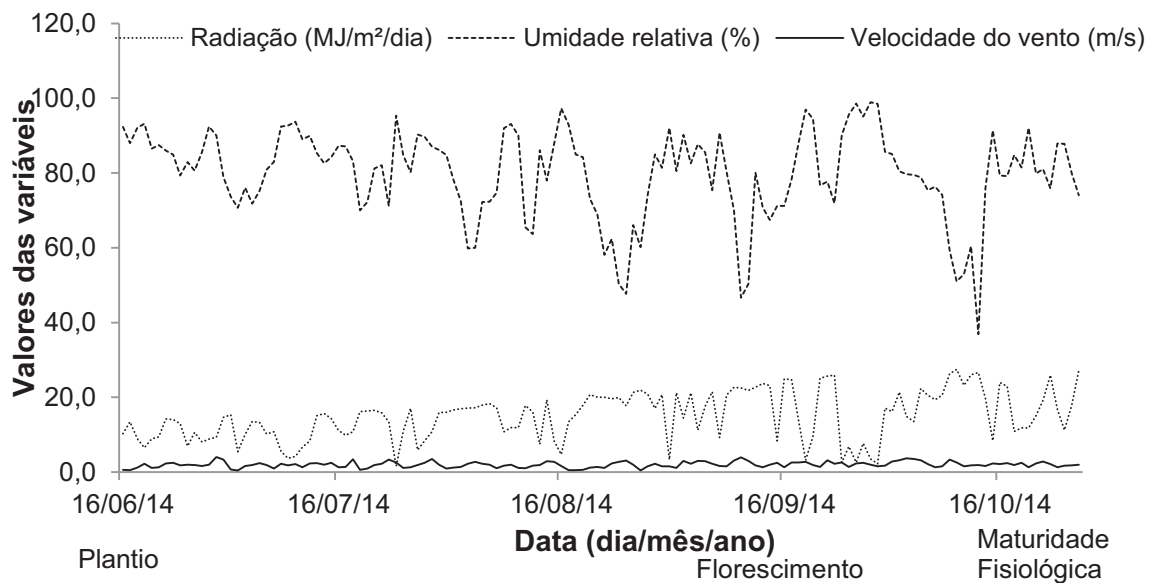


FIGURA A7.3 – SÉRIE DE DADOS CLIMÁTICOS DO MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA-PR, INSERIDOS NO AQUACROP PARA REALIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES: a) TEMPERATURAS MÍNIMA, MÁXIMA E MÉDIA, E PRECIPITAÇÃO; b) UMIDADE RELATIVA, VELOCIDADE DO VENTO E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE.



(a)



(b)

APÊNDICE 8 – ASPECTOS AGRONÔMICOS DA CULTURA DO TRIGO

TABELA A8-1 – ESCALA DECIMAL DE DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DO TRIGO, CONFORME CLASSIFICAÇÃO DE ZADOKS ET AL. (1974).

Código	Estádio	Código	Estádio
----- Germinação -----		----- Emergência da inflorescência -----	
0.0	Semente seca	50	Primeira espiguetta da inflorescência visível
0.1	Início da embebição	51	-----
0.2	-----	52	25% das inflorescências emergidas
0.3	Embebição completa	53	-----
0.4	-----	54	50% das inflorescências emergidas
0.5	Emergência da radícula da cariopse	55	-----
0.6	-----	56	75% das inflorescências emergidas
0.7	Coleóptilo emergido	57	-----
0.8	-----	58	Emergência completa da inflorescência
0.9	Folha no ápice do coleóptilo	59	-----
----- Crescimento da plântula -----		----- Antese -----	
10	Primeira folha através do coleóptilo	60	Início da antese
11	Primeira folha aberta	61	-----
12	Duas folhas abertas	62	-----
13	Três folhas abertas	63	-----
14	Quatro folhas abertas	64	Metade da antese completa
15	Cinco folhas abertas	65	-----
16	Seis folhas abertas	66	-----
17	Sete folhas abertas	67	-----
18	Oito folhas abertas	68	Antese completa
19	Nove ou mais folhas abertas	69	-----
----- Afilhamento -----		----- Desenvolvimento do grão leitoso -----	
20	Somente o colmo principal	70	-----
21	Colmo principal e um afilho	71	Cariopse aquosa
22	Colmo principal e dois afilhos	72	-----
23	Colmo principal e três afilhos	73	Início do estado leitoso
24	Colmo principal e quatro afilhos	74	-----
25	Colmo principal e cinco afilhos	75	Estado leitoso
26	Colmo principal e seis afilhos	76	-----
27	Colmo principal e sete afilhos	77	Final do estado leitoso
28	Colmo principal e oito afilhos	78	-----
29	Colmo principal e nove ou mais afilhos	79	-----
----- Alongamento -----		----- Desenvolvimento do grão em massa -----	
30	Pseudocolmo ereto	80	-----
31	Primeiro nó visível	81	-----
32	Segundo nó visível	82	-----
33	Terceiro nó visível	83	Início do estado de massa
34	Quarto nó visível	84	-----
35	Quinto nó visível	85	Estado de massa mole
36	Sexto nó visível	86	-----
37	Folha bandeira recém-visível	87	Estado de massa dura
38	-----	88	-----
39	Lígula da folha bandeira recém-visível	89	-----
----- Emborrachamento -----		----- Maturação -----	
40	-----	90	-----
41	Bainha da folha bandeira em extensão	91	Cariopse dura (difícil dividir com a unha)
42	-----	92	Cariopse dura (não pode ser dividida com a unha)
43	Início do emborrachamento	93	Cariopse soltando-se durante o dia
44	-----	94	Maturação, palha seca e quebradiça
45	Emborrachamento completo	95	Semente dormente
46	-----	96	Semente viável com 50% de germinação
47	Abertura da bainha da folha bandeira	97	Semente não dormente
48	-----	98	Dormência secundária induzida
49	Primeiras aristas visíveis	99	Dormência secundária perdida

TABELA A8-2 – CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DAS CULTIVARES DE TRIGO, UTILIZADAS NAS ANÁLISES DO MUNICÍPIO DE CASTRO, ESTADO DO PARANÁ.

Genótipo	Data do Plantio	Data da Colheita	Duração do ciclo fenológico
SUPERA	06/07/2007	16/11/2007	133
SUPERA	07/07/2008	14/11/2008	130
SUPERA	10/06/2009	28/10/2009	140
SUPERA	19/06/2009	28/10/2009	131
SUPERA	08/07/2009	11/11/2009	126
SUPERA	17/07/2009	18/11/2009	124
QUARTZO	08/06/2010	19/11/2010	164
QUARTZO	08/06/2010	09/11/2010	154
QUARTZO	30/06/2010	01/12/2010	154
QUARTZO	29/06/2010	01/12/2010	155
QUARTZO	29/06/2010	24/11/2010	148
QUARTZO	31/05/2011	08/11/2011	161
SUPERA	31/05/2011	24/10/2011	146
QUARTZO	15/06/2011	08/11/2011	146
SUPERA	15/06/2011	24/10/2011	131
SUPERA	15/06/2011	03/11/2011	141
QUARTZO	15/06/2011	23/11/2011	161
QUARTZO	15/06/2011	24/11/2011	162
SUPERA	28/06/2011	10/11/2011	135
QUARTZO	28/06/2011	23/11/2011	148
SUPERA	12/07/2011	24/11/2011	135
QUARTZO	12/07/2011	01/12/2011	142
QUARTZO	26/06/2012	30/10/2012	126
QUARTZO	29/06/2012	14/11/2012	138
QUARTZO	26/06/2012	07/11/2012	134
SUPERA	05/06/2013	29/10/2013	146
QUARTZO	05/06/2013	14/11/2013	162
QUARTZO	10/07/2013	19/11/2013	132
SUPERA	10/07/2013	12/11/2013	125
QUARTZO	16/07/2013	27/11/2013	134
SUPERA	12/06/2013	05/11/2013	146
QUARTZO	12/06/2013	19/11/2013	160
SUPERA	09/07/2013	26/11/2013	140
QUARTZO	09/07/2013	26/11/2013	140
QUARTZO	16/07/2013	03/12/2013	140
SUPERA	16/07/2013	26/11/2013	133
QUARTZO	17/06/2014	11/11/2014	147
QUARTZO	11/07/2014	19/11/2014	131
QUARTZO	11/07/2014	26/11/2014	138

TABELA A8-3 – CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DAS CULTIVARES DE TRIGO, UTILIZADAS NAS ANÁLISES DO MUNICÍPIO DE ITABERÁ, ESTADO DE SÃO PAULO.

Genótipo	Data do Plantio	Data da Colheita	Duração do ciclo fenológico
QUARTZO	13/05/2010	21/09/2010	131
QUARTZO	01/06/2010	08/10/2010	129
QUARTZO	18/07/2013	18/11/2013	123
QUARTZO	07/06/2013	15/10/2013	130
SUPERA	07/06/2013	08/10/2013	123
TBIO TIBAGI	07/06/2013	08/10/2013	123
QUARTZO	13/06/2013	24/10/2013	133
SUPERA	13/06/2013	15/10/2013	124
TBIO TIBAGI	13/06/2013	15/10/2013	124
QUARTZO	11/07/2013	07/11/2013	119
SUPERA	11/07/2013	07/11/2013	119
TBIO TIBAGI	11/07/2013	07/11/2013	119
QUARTZO	18/07/2013	14/11/2013	119
SUPERA	18/07/2013	14/11/2013	119
TBIO TIBAGI	18/07/2013	14/11/2013	119
SINUELO	03/06/2014	15/10/2014	134
SINUELO	18/05/2015	01/10/2015	136
SUPERA	15/06/2016	19/10/2016	126
SINUELO	15/06/2016	24/10/2016	131
SUPERA	13/07/2016	01/11/2016	111
SINUELO	13/07/2016	17/11/2016	127
QUARTZO	11/05/2017	26/09/2017	138
SINUELO	11/05/2017	26/09/2017	138
QUARTZO	23/05/2017	26/09/2017	126
SINUELO	23/05/2017	26/09/2017	126
QUARTZO	16/06/2017	23/10/2017	129
SINUELO	16/06/2017	23/10/2017	129

TABELA A8-4 – CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DAS CULTIVARES DE TRIGO, UTILIZADAS NAS ANÁLISES DO MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA, ESTADO DO PARANÁ.

Genótipo	Data do Plantio	Data da Colheita	Duração do ciclo fenológico
SUPERA	10/06/2010	22/10/2010	134
SUPERA	10/06/2010	22/10/2010	134
QUARTZO	10/06/2010	11/11/2010	154
QUARTZO	10/06/2010	11/11/2010	154
SUPERA	21/06/2010	29/10/2010	130
QUARTZO	30/06/2010	24/11/2010	147
SUPERA	30/06/2010	11/11/2010	134
SUPERA	09/07/2010	11/11/2010	125
QUARTZO	15/06/2012	29/10/2012	136
QUARTZO	28/06/2012	05/11/2012	130
QUARTZO	06/06/2013	29/10/2013	145
SUPERA	06/06/2013	23/10/2013	139
TBIO TIBAGI	06/06/2013	23/10/2013	139
QUARTZO	06/06/2013	05/11/2013	152
QUARTZO	11/06/2013	05/11/2013	147
SUPERA	11/06/2013	29/10/2013	140
TBIO TIBAGI	11/06/2013	29/10/2013	140
QUARTZO	10/07/2013	26/11/2013	139
QUARTZO	10/07/2013	14/11/2013	127
SUPERA	10/07/2013	08/11/2013	121
TBIO TIBAGI	10/07/2013	08/11/2013	121
QUARTZO	17/07/2013	20/11/2013	126
SUPERA	17/07/2013	14/11/2013	120
TBIO TIBAGI	17/07/2013	14/11/2013	120
QUARTZO	04/06/2014	16/10/2014	134
SUPERA	04/06/2014	09/10/2014	127
SINUELO	04/06/2014	16/10/2014	134
TBIO TIBAGI	04/06/2014	09/10/2014	127
QUARTZO	04/06/2014	23/10/2014	141
SINUELO	04/06/2014	27/10/2014	145
SINUELO	28/06/2014	12/11/2014	137
QUARTZO	16/06/2014	27/10/2014	133
SUPERA	16/06/2014	16/10/2014	122
SINUELO	16/06/2014	27/10/2014	133
TBIO TIBAGI	16/06/2014	16/10/2014	122
QUARTZO	16/06/2014	10/11/2014	147
SINUELO	16/06/2014	10/11/2014	147
QUARTZO	26/06/2014	03/11/2014	130
SUPERA	26/06/2014	27/10/2014	123
SINUELO	26/06/2014	03/11/2014	130
TBIO TIBAGI	26/06/2014	27/10/2014	123
QUARTZO	28/06/2014	12/11/2014	137
QUARTZO	10/07/2014	10/11/2014	123
SUPERA	10/07/2014	06/11/2014	119
SINUELO	10/07/2014	10/11/2014	123
TBIO TIBAGI	10/07/2014	06/11/2014	119
QUARTZO	10/07/2014	17/11/2014	130
SINUELO	10/07/2014	17/11/2014	130

TABELA A8-4 – CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DAS CULTIVARES DE TRIGO, UTILIZADAS NAS ANÁLISES DO MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA, ESTADO DO PARANÁ. (conclusão)

Genótipo	Data do Plantio	Data da Colheita	Duração do ciclo fenológico
SINUELO	03/06/2015	16/10/2015	135
TORUK	03/06/2015	16/10/2015	135
QUARTZO	22/07/2015	18/11/2015	119
SINUELO	22/07/2015	18/11/2015	119
TORUK	22/07/2015	18/11/2015	119
QUARTZO	03/06/2015	21/10/2015	140
SINUELO	03/06/2015	21/10/2015	140
QUARTZO	18/06/2015	07/11/2015	142
SINUELO	18/06/2015	07/11/2015	142
QUARTZO	29/06/2015	11/11/2015	135
SINUELO	29/06/2015	11/11/2015	135
QUARTZO	22/07/2015	11/11/2015	112
SINUELO	22/07/2015	18/11/2015	119
QUARTZO	03/06/2015	16/10/2015	135
SINUELO	03/06/2015	16/10/2015	135
TORUK	03/06/2015	16/10/2015	135
SINUELO	04/07/2016	28/11/2016	147
QUARTZO	12/05/2017	05/10/2017	146
TORUK	12/05/2017	05/10/2017	146
SOSSEGO	12/05/2017	05/10/2017	146
SINUELO	12/05/2017	05/10/2017	146
QUARTZO	25/05/2017	16/10/2017	144
TORUK	25/05/2017	16/10/2017	144
SOSSEGO	25/05/2017	16/10/2017	144
SINUELO	25/05/2017	16/10/2017	144
QUARTZO	12/06/2017	24/10/2017	134
TORUK	12/06/2017	24/10/2017	134
SOSSEGO	12/06/2017	24/10/2017	134
SINUELO	12/06/2017	24/10/2017	134
QUARTZO	27/06/2017	13/11/2017	139
TORUK	27/06/2017	13/11/2017	139
SOSSEGO	27/06/2017	13/11/2017	139
SINUELO	27/06/2017	13/11/2017	139