Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Abordagem multi-modelos para a simulação da produtividade da cultura do algodoeiro e seu uso na definição do *yield gap* em diferentes regiões brasileiras

Juliana Chagas Rodrigues

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2021

Juliana Chagas Rodrigues
Engenheira Agrônoma

**Abordagem multi-modelos para a simulação da produtividade da cultura do algodoeiro
e seu uso na definição do *yield gap* em diferentes regiões brasileiras**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO CESAR SENTELHAS**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Rodrigues, Juliana Chagas

Abordagem multi-modelos para a simulação da produtividade da cultura do algodoeiro e seu uso na definição do *yield gap* em diferentes regiões brasileiras / Juliana Chagas Rodrigues. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

200 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. *Gossypium hirsutum* L. 2. Quebra de produtividade 3. MZA-FAO 4. AquaCrop 5. DSSAT 6. APSIM I. Título

Aos meus pais, Aílto Rodrigues e Lenora Chagas
Pelo amor, carinho, dedicação e ensinamentos durante todos os anos de minha vida.

A minha irmã, Lenise Rodrigues
Pelo carinho, amor, amizade, companheirismo e incentivo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela benção da vida e ser fonte de minha felicidade, entusiasmo e esforço.

A minha família pelo apoio, dedicação e carinho.

A Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela formação acadêmica e oportunidade de realização do curso de doutorado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Sentelhas pela orientação, ensinamento, paciência, apoio, incentivo, respeito, amizade, competência, profissionalismo e oportunidades.

A empresa Tropical Melhoramento & Genética (TMG) pela concessão do banco de dados de produtividade, solos e meteorológicos de suas áreas de pesquisa; em especial, Eduardo Kawakami, Paulo Aguiar, Vinícius Ferreira, e Rafael Zeni, pelo apoio durante o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Ederaldo Chiavegato pela transmissão de seu riquíssimo conhecimento da cultura do algodoeiro, além de viabilizar o contato com a empresa TMG.

A Profa. Dra. Patrícia Marques e ao Prof. Dr. Thiago Romanelli por terem me recebido como orientada até que eu pudesse ser oficialmente orientada pelo Prof. Dr. Paulo Sentelhas.

Aos docentes Durval Dourado Neto, Fábio Marin, Felipe Pilau, Gil Câmara, Marcos Sorrentino, Marília Chiavegato, Paulo Sentelhas e Sônia Piedade pela formação acadêmica.

Aos colegas e ex-colegas da “Cúpula”, pelo apoio, amizade e momentos de descontração; em especial, Elvis Elli, Fabiani Bender, Henrique Dias, Isabella Martins e Rogério Nóia Júnior por me auxiliarem no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Rogério Nóia Júnior, Tibério Feitosa e Welinton Hirai pelo apoio durante o período de realização das disciplinas.

A Joyse Tatiane Santos pela elaboração dos mapas apresentados neste trabalho.

Aos amigos paraenses e nordestinos pelo apoio, acolhimento e por fazerem desse período longe de casa mais reconfortante; em especial, Arnaldo Souza, Caroline Jardim e Siglea Chaves.

A Antônio Claudio Lima e Bruno Soares pelo companheirismo, carinho e apoio.

Aos membros das bancas examinadoras do exame de qualificação e defesa pelas sugestões de correção que muito contribuíram para meu trabalho.

Finalmente, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

Muito obrigada!!!

EPÍGRAFE

*“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos.
Enquanto existir um sonho, nada é por acaso”.*

João Batista Sérgio Murad (“Beto Carrero”)

*“Sempre acreditei que jamais deveria desistir
e que deveria continuar lutando
mesmo que houvesse apenas uma chance mínima”.*

Michael Schumacher

*“Nunca deixe ninguém te dizer que não pode fazer alguma coisa.
Se você tem um sonho tem que correr atrás dele.
As pessoas não conseguem vencer e dizem que você também não vai vencer.
Se você quer uma coisa corre atrás”.*

Filme “A procura da felicidade” (“The Pursuit of Happyness”)

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	12
1. INTRODUÇÃO GERAL	13
1.1. Introdução	13
1.2. Objetivos.....	15
1.2.1. Objetivos específicos	15
1.3. Revisão bibliográfica.....	16
1.3.1. Aspectos gerais da cultura do algodoeiro	16
1.3.1.1. Características botânicas	16
1.3.1.2. Fases fenológicas.....	19
1.3.1.3. Condições edafoclimáticas	21
1.3.2. Efeito das adversidades climáticas na cultura do algodoeiro	23
1.3.2.1. Déficit hídrico.....	23
1.3.2.2. Temperatura do ar e do solo e umidade do solo	24
1.3.3. <i>Yield gap</i> do algodoeiro	26
1.3.3.1. <i>Yield gap</i>	26
1.3.3.2. <i>Yield gap</i> do algodoeiro no mundo e no Brasil	28
1.3.4. Modelos de simulação de produtividade	29
1.3.4.1. Modelo Zona Agroecológica-FAO.....	30
1.3.4.2. Modelo AquaCrop	32
1.3.4.3. Modelo CROPGRO- <i>Cotton</i> (DSSAT)	34
1.3.4.4. Modelo OzCot (APSIM)	36
1.3.4.5. Abordagem multi-modelos	38
REFERÊNCIAS.....	39
2. TOLERÂNCIA DE CULTIVARES BRASILEIRAS DE ALGODÃO À SECA, SIMULADA POR MEIO DE UM MODELO AGROMETEOROLÓGICO	51
RESUMO	51
ABSTRACT	51
2.1. Introdução	52
2.2. Material e métodos	54
2.2.1. Dados de produtividade da cultura do algodoeiro	54

2.2.2. Informações dos solos das áreas experimentais	55
2.2.3. Dados meteorológicos	56
2.2.4. Modelo Zona Agroecológica-FAO – descrição, calibração e validação	57
2.2.5. Desempenho do modelo Zona Agroecológica-FAO	60
2.2.6. Análise de agrupamento para a sensibilidade de cultivares brasileiras de algodão ao déficit hídrico	61
2.3. Resultados e discussão	62
2.3.1. Calibração e validação do modelo Zona Agroecológica-FAO para estimação da produtividade do algodoeiro	62
2.3.2. Agrupamento de cultivares brasileiras de algodão para a tolerância à seca	65
2.4. Conclusões	69
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICES	75
3. INTERCOMPARAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO ALGODOEIRO – UMA ABORDAGEM MULTI-MODELOS	79
RESUMO	79
ABSTRACT	79
3.1. Introdução	80
3.2. Material e métodos	82
3.2.1. Dados de produtividade da cultura do algodoeiro	82
3.2.2. Modelos de simulação de produtividade	84
3.2.3. Dados meteorológicos	86
3.2.4. Dados de solo	87
3.2.5. Etapas da calibração dos modelos de simulação da cultura do algodoeiro	88
3.2.5.1. Análise de sensibilidade dos modelos	88
3.2.5.2. Calibração dos modelos	89
3.2.6. Validação dos modelos	90
3.2.7. Abordagem multi-modelos	90
3.2.8. Avaliação de desempenho dos modelos	90
3.3. Resultados e discussão	91
3.3.1. Análise de sensibilidade dos modelos	91
3.3.2. Desempenho de modelos individuais de simulação da produtividade do algodoeiro – Fase de calibração	95

3.3.3. Desempenho de modelos individuais de simulação de produtividade do algodoeiro – Fase de validação.....	97
3.3.4. Desempenho da abordagem multi-modelos	99
3.4. Conclusões.....	101
REFERÊNCIAS.....	101
APÊNDICES	108
4. <i>YIELD GAP</i> DA CULTURA DO ALGODOEIRO NO BRASIL – UMA ABORDAGEM MULTI-MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE SUAS MAGNITUDES E CAUSAS .	117
RESUMO	117
ABSTRACT	117
4.1. Introdução.....	118
4.2. Material e métodos	120
4.2.1. Dados de produtividade da cultura do algodoeiro	120
4.2.2. Dados meteorológicos	122
4.2.3. Dados de solo	123
4.2.4. Modelos de simulação de produtividade da cultura do algodoeiro	124
4.2.4.1. Condições iniciais, datas de semeadura e cultivar.....	125
4.2.4.2. Simulação das produtividades potencial e atingível.....	125
4.2.5. Análise do <i>yield gap</i> e das eficiências da cultura do algodoeiro	126
4.3. Resultados e discussão.....	127
4.3.1. Produtividades potencial, atingível e real.....	127
4.3.2. <i>Yield gap</i> da cultura do algodoeiro	136
4.4. Conclusões.....	139
REFERÊNCIAS.....	139
ANEXOS	145
APÊNDICES	146
5. MITIGAÇÃO DO <i>YIELD GAP</i> DA CULTURA DO ALGODOEIRO NO BRASIL COM O USO DA IRRIGAÇÃO, SIMULADA POR UMA ABORDAGEM MULTI-MODELOS ...	165
RESUMO	165
ABSTRACT	165
5.1. Introdução.....	166
5.2. Material e métodos	168
5.2.1. Modelos de simulação da cultura do algodoeiro	168
5.2.2. Base de dados de produtividade, de clima e de solo	168

5.2.3. Condições iniciais, datas de semeadura e cultivar	171
5.2.4. Simulação das lâminas de irrigação na cultura do algodoeiro	172
5.3. Resultados e discussão	172
5.3.1. Variabilidade da produtividade do algodoeiro irrigado	172
5.3.2. Incremento de produtividade do algodoeiro em diferentes tipos de solo e épocas de semeadura.....	179
5.3.3. Produtividade do algodoeiro x lâmina de irrigação aplicada.....	186
5.4. Conclusões	189
REFERÊNCIAS.....	189
ANEXOS	195
APÊNDICES.....	196
6. CONCLUSÕES GERAIS	199

RESUMO

Abordagem multi-modelos para a simulação da produtividade da cultura do algodoeiro e seu uso na definição do *yield gap* em diferentes regiões brasileiras

O Brasil é um dos maiores produtores de algodão do mundo. A cultura é fonte de fibras, alimentos e matéria-prima para a produção de biodiesel. O algodoeiro apresenta certa tolerância à seca, no entanto, o déficit hídrico pode ocasionar expressivas perdas de produtividade, assim como as falhas no manejo agrícola. Essas perdas são denominadas de *yield gap* (YG) da cultura. A produtividade pode ser avaliada por meio de modelos de simulação de culturas agrícolas, quando devidamente calibrados e validados, e, assim, se obter as magnitudes, as causas e as possíveis estratégias de mitigação do YG. O uso desses modelos em uma abordagem multi-modelos, melhora a precisão e reduz as incertezas quando comparado ao uso individual desses. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi determinar por meio da abordagem multi-modelos a produtividade potencial (PP) e a atingível (PA) do algodoeiro em diferentes regiões brasileiras identificar as principais causas da YG da cultura, e definir estratégias para mitigação. Os dados de produtividade das cultivares de algodoeiro empregadas na calibração e validação dos modelos foram obtidos junto aos ensaios conduzidos pela empresa Tropical Melhoramento & Genética (TMG), em seis localidades, nas safras de 2011/2012 a 2018/2019, e em três épocas de semeadura. O modelo Zona Agroecológica (MZA-FAO) foi utilizado para identificar os grupos de cultivares de algodoeiro tolerantes à seca por meio do índice de tolerância ao déficit hídrico (Ky) calibrados. Além do MZA-FAO, outros três modelos de simulação do algodoeiro, AquaCrop, CROPGRO-Cotton (DSSAT) e OzCot (APSIM), também foram devidamente calibrados, validados e empregados de forma individual e sob a abordagem multi-modelos. Os quatro modelos foram utilizados para a estimação da PP, da PA e do YG da cultura, assim como para a avaliação do uso da irrigação. A produtividade real (PR) foi obtida junto ao banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para analisar a magnitude e as causas do YG da cultura foram avaliadas: PP; PA; PR; YG por déficit hídrico (YG_{DH}); YG por déficit de manejo (YG_{MA}); YG total (YG_T); eficiência climática (EC); e eficiência agrícola (EA). Na avaliação do uso da irrigação, foram testados diferentes volumes de irrigação para suprir o déficit hídrico em 0, 20, 40, 60, 80 e 100%. Os resultados mostraram que por meio do uso do Ky do MZA-FAO foram identificados cinco grupos de cultivares de algodoeiro tolerantes à seca. Os modelos de simulação apresentaram desempenho bom a ótimo, com erro absoluto médio em porcentagem (EAMP) variando entre 7,29 e 13,39% e índice C de 0,69 a 0,92 ($d \geq 0,80$). Na abordagem multi-modelos houve melhor desempenho das estimativas, com redução do EAMP para 5,31% e aumento do índice C para 0,95 ($d = 0,98$). A PP e a PA foram, em média, 8793,12 e 5788,71 kg ha⁻¹, respectivamente. A média do YG_T foi de 4550,58 kg ha⁻¹. A maior parte do YG_T foi causada pela deficiência hídrica (66% do total), seguido do manejo agrícola sub-ótimo (34% do total). A produtividade aumentou com o volume de irrigação aplicado, especialmente em solos arenosos e nas semeaduras tardias. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que: o modelo MZA-FAO foi eficiente para identificar a tolerância à seca em cultivares brasileiras de algodoeiro; a abordagem multi-modelos melhorou as estimativas de produtividade da cultura, minimizando as incertezas do emprego individual dos modelos, possibilitando a estimação da PP, da PA e dos YGs da cultura do algodoeiro, e identificando que a principal causa do YG do algodoeiro no Brasil se deve à deficiência hídrica; e que a irrigação representa uma importante ação de manejo para mitigação do YG da cultura em diferentes regiões brasileiras, especialmente, nas semeaduras tardias.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L., Quebra de produtividade, MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT, APSIM

ABSTRACT

Multi-model approach for simulating cotton yield and its use for yield gap determination in different Brazilian regions

Brazil is one of the largest cotton producers in the world. This crop is a source of fiber, food, and raw material to produce biodiesel. Cotton has a certain tolerance to drought, however, the water deficit can cause significant losses in productivity, as well as failures in agricultural management. These losses are called the yield gap (YG) of the crop. Yield can be assessed using crop simulation models when properly calibrated and validated, and thus obtaining the magnitudes, causes and possible mitigation strategies for the YG. The use of these models in a multi-model approach, improves accuracy and reduces uncertainties when compared to their individual use. Therefore, the objective of this study was to determine, through the multi-model approach, the potential (Y_p) and the attainable (Y_a) yield of cotton in different Brazilian regions, to identify the main causes of the YG of the crop, and to define strategies for mitigating. The yield data of the cotton cultivars used in the calibration and validation of the models were obtained from trials conducted by the *Tropical Melhoramento & Genética* (TMG) company, in six locations, in the harvests from 2011/2012 to 2018/2019, and in three sowing dates. The Agroecological Zone model (AZM-FAO) was used to identify groups of cotton cultivars tolerant to drought through the calibrated water deficit tolerance index (K_y). In addition to AZM-FAO, three other cotton simulation models, AquaCrop, CROPGRO-Cotton (DSSAT) and OzCot (APSIM), were also properly calibrated, validated and used individually and under the multi-model approach. These models were used to estimate the cotton Y_p , Y_a and YG, as well as for the evaluation of the use of irrigation. Actual yield (Y_r) was obtained from the database of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). The magnitude and causes of the cotton crop YG were evaluated by using Y_p , Y_a , Y_r , which were used to calculate the YG caused by water deficit (Y_{GDH}), by management deficit (Y_{GMA}), and total YG (Y_{GT}), as well as the climate (CE) and agricultural (AE) efficiencies. By assessing the use of irrigation, different volumes of irrigation were tested to supply the water deficit at 0, 20, 40, 60, 80 and 100%. The results showed that by calibrating K_y five groups of cotton cultivars tolerant to drought were identified. The simulation models presented good to excellent performance, with mean absolute error in percentage (MAEP) varying between 7.29 and 13.39% and index C from 0.69 to 0.92 ($d \geq 0.80$). In the multi-model approach, there was a better performance of the estimates, with a reduction in the MAEP to 5.31% and an increase in the C index to 0.95 ($d = 0.98$). Y_p and Y_a were, on average, 8793.12 and 5788.71 kg ha⁻¹, respectively. Average Y_{GT} totaled 4550.58 kg ha⁻¹, being most of that caused by water deficiency (66% of the total), followed by suboptimal crop management (34% of the total). Crop yield increased with irrigation applied, especially in sandy soils and late sowings. Based on the presented results, the main conclusions are: the AZM-FAO model was efficient to identify drought tolerance in Brazilian cotton cultivars; the multi-model approach improved the crop yield estimates, minimizing the uncertainties regarding the individual use of the models, making it possible to estimate Y_p , Y_a and YGs of the cotton crop, and identifying that the main cause the YG of cotton crop in Brazil is due to water deficiency; and that irrigation represents an important management action to mitigate the cotton crop YG in different Brazilian regions, especially in the late sowings.

Keywords: *Gossypium hirsutum* L., Yield losses, AZM-FAO, AquaCrop, DSSAT, APSIM

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Introdução

O aumento da população mundial vem elevando a demanda por alimentos, roupas e combustíveis em todo o mundo. Na década de 1950, a população humana era estimada em 2,5 bilhões de habitantes, aumentando para 7,6 bilhões, em 2018, e deve ultrapassar 11,2 bilhões de habitantes em 2100 (FAO, 2020). Uma cultura agrícola que pode ser utilizada para suprir parte dessa crescente demanda populacional é o algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* subsp. *latifolium* Hutch), responsável pela produção de 90% do algodão no mundo (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; THORP et al., 2014). Essa cultura é uma importante *commodity* a nível mundial já que é fonte de fibras, alimentos e biocombustível. A fibra de algodão é usada na indústria têxtil, a farinha pode ser utilizada para alimentação de ruminantes e o óleo é refinado para o consumo humano, tendo potencial, ainda, para ser utilizado como matéria-prima para a fabricação de biodiesel (THORP et al., 2014).

Atualmente, o Brasil é o quarto maior produtor de algodão em caroço (pluma e caroço) do mundo e o segundo maior exportador de fibras de algodão (ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 2020; FAO, 2020). Nos últimos anos, o Brasil vem se destacando devido ao aumento da qualidade de fibra, estabilidade da produção e da produtividade, com incremento da área plantada em, aproximadamente, 50% entre 2016 e 2018, o que foi impulsionado pelo aumento do consumo e elevação dos preços de venda, especialmente no mercado internacional (ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 2019).

A partir da década de 1990, o cultivo de algodão no Brasil passou por um processo de tecnificação, migrando de uma cultura familiar para empresarial, sendo a safra 1996/1997 um marco para o início da grande expansão da cultura no país (ALVES; LIMA; FERREIRA FILHO, 2014). A área colhida com algodão passou de 620 mil ha, em 1997, para 1.627 mil ha, em 2019, representando incremento de 262%, enquanto a quantidade produzida também teve aumento, passando de 821 mil t, em 1997, para 6.893 mil t, em 2019, representando um aumento de 840% (IBGE, 2020). Os incrementos da área colhida e da quantidade produzida não seguiram a mesma proporção, o que indica um ganho expressivo de produtividade da cultura do algodoeiro, passando de 1323 kg ha⁻¹, em 1997, para 4236 kg ha⁻¹, em 2019.

Em 2019, aproximadamente, 97% do algodão herbáceo em caroço brasileiro foi produzido nos estados do Mato Grosso (4.652 mil t), Bahia (1.493 mil t), Goiás (183 mil t), Minas Gerais (169 mil t) e Mato Grosso do Sul (167 mil t), sendo que apenas a produção do estado de Mato Grosso compreendeu 67% da produção nacional. Dentre os maiores produtores de algodão

no país, destacam-se os municípios de Sapezal, MT, São Desidério, BA, Campo Novo do Parecis, MT, Campo Verde, MT, e Diamantino, MT, que juntos produziram 2.635 mil t, correspondendo a 40% da produção nacional (IBGE, 2020).

No Brasil, o algodoeiro é, normalmente, cultivado como cultura de segunda safra, sendo semeada logo após a colheita da soja. Ao longo do ciclo, que em média dura de 120 a 170 dias (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; MARUR; RUANO, 2001), a disponibilidade de água no solo vai diminuindo, fazendo com que a cultura fique sujeita à deficiência hídrica, o que compromete a sua produtividade. Mesmo o algodoeiro sendo uma cultura que apresenta certa tolerância à seca quando comparado com os cereais, o déficit hídrico, dependendo de sua duração, intensidade e da fase fenológica em que ocorre, afeta o crescimento, o desenvolvimento, a produtividade e a qualidade das fibras (LOKA; OOSTERHUIS, 2012; ROSOLEM, 2001; ZONTA et al., 2017). Além disso, temperaturas baixas ou muito elevadas também afetam a cultura, reduzindo sua produtividade (ROSOLEM, 2001; SOARES, 2015).

Além das perdas de produtividade causadas pelas condições meteorológicas adversas, a cultura do algodoeiro ainda sofre perdas decorrentes dos diversos aspectos do manejo agrícola, devido à ocorrência de pragas, doenças, plantas daninhas, entre outros problemas. Essas perdas de produtividade, também conhecidas como *yield gap*, podem ser dimensionadas por meio do uso de modelos de simulação e de dados de campo, auxiliando na definição de estratégias para sua mitigação, proporcionando o aumento da produtividade da cultura (SENTELHAS et al., 2016; VAN ITTERSUM et al., 2013).

O *yield gap* pode ser estimado por meio de modelos de simulação de produtividade. Estudos dessa natureza foram realizados com diferentes culturas no Brasil, como a cana-de-açúcar (DIAS; SENTELHAS, 2018; MONTEIRO; SENTELHAS, 2017), o feijão (MEIRELES et al., 2003), a mandioca (VISSÉS; SENTELHAS; PEREIRA, 2018), o milho (ANDREA et al., 2018; DUARTE, 2018; MONTEIRO et al., 2017), a soja (SENTELHAS et al., 2015) e para a sucessão soja-milho (NÓIA JÚNIOR; SENTELHAS, 2020). Apesar de existirem estudos de simulação da produtividade do algodoeiro (ADHIKARI et al., 2016; CONSTABLE; BANGE, 2015) e de determinação do *yield gap* da cultura (AGGARWAL et al., 2008; NACHIMUTHU; WEBB, 2017) em outros países, no Brasil esse tipo de abordagem ainda é pouco explorada.

As simulações da produtividade das culturas têm sido feitas, basicamente, por meio do uso de modelos de forma individualizada (ANDREA et al., 2018; BATTISTI et al., 2020; BOSI et al., 2020; MEIRELES et al., 2003; MONTEIRO; SENTELHAS, 2017; SENTELHAS et al., 2015; VISSÉS; SENTELHAS; PEREIRA, 2018). Entretanto, as diferentes estruturas e parâmetros dos modelos de simulação de culturas têm gerado resultados muitas vezes discrepantes. Para melhorar

a precisão e reduzir as incertezas do uso desses modelos, estudos recentes tem sugerido o emprego da abordagem multi-modelos (*ensemble*) para simulação de produtividade de culturas (ASSENG et al., 2013). A abordagem multi-modelos foi utilizada na estimativa do *yield gap* de algumas culturas no Brasil, como da cana-de-açúcar (DIAS; SENTELHAS, 2018), do milho (DUARTE, 2018), e para a sucessão soja-milho (NÓIA JÚNIOR; SENTELHAS, 2020). Para a cultura do algodoeiro, tal abordagem ainda é incipiente no Brasil, assim como em outros países produtores da cultura.

Considerando-se que a cultura do algodoeiro é altamente influenciada pelas condições meteorológicas da região de cultivo e que os modelos de simulação de cultura têm a capacidade de avaliar os impactos dessas condições na produtividade da cultura, a hipótese deste estudo é que a produtividade do algodoeiro e as causas do *yield gap* da cultura podem ser melhor avaliadas por meio da abordagem multi-modelos, já que esta minimiza as incertezas associadas à estimativa de produtividade por meio de um único modelo.

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste estudo é determinar por meio da abordagem multi-modelos as produtividades potencial e atingível do algodoeiro em diferentes regiões brasileiras e identificar as principais causas do *yield gap* da cultura.

1.2.1. Objetivos específicos

- a) Calibrar, avaliar e realizar a análise de sensibilidade dos modelos Zona Agroecológica (MZA-FAO), AquaCrop, CROPGRO-Cotton (DSSAT) e OzCot (APSIM), e da combinação deles para a simulação da produtividade do algodoeiro;
- b) Estimar a produtividade potencial e a produtividade atingível em diferentes regiões brasileiras;
- c) Identificar grupos de cultivares homogêneos de algodoeiro tolerantes à seca por meio do índice de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky) e o modelo MZA-FAO;
- d) Avaliar o *yield gap* da cultura do algodoeiro devido à deficiência hídrica e ao manejo agrícola sub-ótimo;
- e) Avaliar o uso da irrigação como ação de manejo da cultura para mitigação do *yield gap* da cultura do algodoeiro em diferentes regiões brasileiras.

1.3. Revisão bibliográfica

1.3.1. Aspectos gerais da cultura do algodoeiro

1.3.1.1. Características botânicas

O algodoeiro é uma planta dicotiledônea, pertencente à família Malvaceae e pode apresentar hábito arbóreo e perene ou herbáceo e anual, esse último, atualmente, é o mais explorado de forma comercial, principalmente, o algodoeiro da espécie *Gossypium hirsutum* L., devido a produção de fibras. Essa espécie é originária da América Central e diferenciou-se em sete raças, também denominadas de subespécies, sendo a mais importante a *Latifolium*; desse modo, a espécie *Gossypium hirsutum* subsp. *latifolium* Hutch. é responsável pela produção de 90% do algodão no mundo. No Brasil, também existe o algodoeiro arbóreo (mocó) ou perene (*Gossypium hirsutum* subsp. *Marie galante* Hutch.), que, atualmente, encontra-se restrito a pequenas áreas no semiárido nordestino (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; EVETT et al., 2012; LIMA; AQUINO; BERGER, 2014).

O sistema radicular do algodoeiro é do tipo pivotante, bastante vigoroso e desenvolvido em condições normais de crescimento da planta. O solo explorado pelas raízes pode atingir profundidades entre 1,30 e 2,50 m, porém a profundidade efetiva do sistema radicular encontra-se nos primeiros 20 a 60 cm, e o maior adensamento de raízes pode ser encontrado até 25 cm de distância da haste principal da planta (ANDRADE JÚNIOR et al., 2010; BEZERRA; BARRETO; LUZ, 1998; CAVALERI; INFORZATO, 1956; LIMA; AQUINO; BERGER, 2014; MAGALHAES et al., 1962; SANTOS et al., 2016; SILVA et al., 2009b). Até o aparecimento dos primeiros botões florais, a profundidade alcançada pela raiz principal pode ser 2,5 vezes maior que a altura da planta (OOSTERHUIS; JERNSTEDT, 1999).

O caule do algodoeiro assim como os ramos, as folhas e os pecíolos podem ser glabros ou pilosos. No caule existem tricomas e glândulas internas, onde a planta armazena uma substância denominada gossipol, tóxica aos insetos e animais não ruminantes, e relacionada à defesa da planta contra pragas e doenças (LIMA; AQUINO; BERGER, 2014). O caule do algodoeiro sustenta dois tipos de ramos: vegetativo ou monopodial e reprodutivo ou simpodial (frutífero). Os ramos monopodiais possuem crescimento indeterminado e sua ramificação pode originar ramos monopodiais e simpodiais. Os ramos simpodiais apresentam crescimento determinado e sucessivo em forma de ziguezague, e terminam em uma estrutura reprodutiva (BELTRÃO; SOUZA, 2008; LIMA; AQUINO; BERGER, 2014).

As folhas do algodoeiro são chamadas de macrófilas e possuem morfologia simples e incompleta (não possuem bainha), apresentam estômatos em ambas as faces, e podem ser classificadas como vegetativa ou reprodutiva. As folhas vegetativas encontram-se na haste principal e nos ramos monopodiais, enquanto as folhas reprodutivas ocorrem nos ramos simpodiais junto à estrutura de reprodução. As folhas vegetativas do algodoeiro apresentam filotaxia $3/8$, ou seja, a cada três voltas completas no eixo do caule surgem oito folhas, enquanto que nas folhas reprodutivas a filotaxia é $2/5$ (BELTRÃO; SOUZA, 2008; LIMA; AQUINO; BERGER, 2014). As folhas vegetativas são maiores do que as reprodutivas, são mais longevas, podendo sobreviver até 70 dias em condições ótimas, e são responsáveis pela nutrição dos primeiros frutos (LIMA; AQUINO; BERGER, 2014). O ápice da fotossíntese ocorre aos 20 dias após a abertura da folha (ROSOLEM; ECHER, 2015).

Os ramos reprodutivos apresentam, em média, seis a oito botões que se transformarão em flores. As flores do algodoeiro são isoladas e pedunculares, apresentam brácteas cordiformes, livres, persistentes e 8-12 dentes. A flor, ao abrir-se, é constituída de um involúcro representado por três brácteas, o cálice, que é gamossépalo (sépalas ligadas), e a corola, que é dialipétala (pétalas separadas). As pétalas são imbricadas e apresentam cor variando de branco a creme e, geralmente, sem manchas, tornando-se violáceas após a fecundação. O surgimento de flores no algodoeiro segue o padrão espiral e ascendente para fora da planta. As primeiras flores emitidas estão localizadas na parte de baixo da planta, geralmente, a partir do quinto ao sétimo nó da haste principal e na primeira posição do ramo reprodutivo. As flores são emitidas, normalmente, a cada três a seis dias dependendo do ambiente e da cultivar (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; LIMA; AQUINO; BERGER, 2014; OOSTERHUIS, 1990).

Quando as flores atingem o ápice da planta, prioritariamente, a maior parte dos nutrientes e fotoassimilados são direcionados aos frutos em desenvolvimento. Nessa fase, a produção de flores é escassa ou cessada. Esse evento é conhecido como ponto de maturação fisiológica da planta, corte fisiológico ou em inglês “*cut out*”. Nesse momento, o suprimento de carboidratos é igual à demanda, cessando os desenvolvimentos vegetativo e reprodutivo (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009).

O fruto do algodoeiro apresenta três a cinco lóculos. Cada lóculo possui seis a oito sementes. Quando o fruto está jovem é chamado de maçã e, após aberto, é denominado capulho. O conjunto formado pela semente e as fibras constituem um importante componente de produção do algodoeiro, a massa (peso) do capulho ou algodão em caroço. Quando ocorrem ataques de pragas ou condições climáticas adversas, o fruto se mumifica e passa a ser chamado de carimã, causando perda de produção (LIMA; AQUINO; BERGER, 2014). Cerca de 80 a 90% dos frutos

originam-se de flores abertas no primeiro mês de florescimento (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009). A maturidade do fruto é determinada quando aparece um tegumento escuro nas sementes, conhecido como camada preta (ROSOLEM; ECHER, 2015), e esta depende, principalmente, da temperatura do ar.

O desenvolvimento do fruto acontece em duas fases: na primeira fase ocorre a elongação das fibras, onde se define seu comprimento, e na segunda fase ocorre a deposição de celulose em sucessivas camadas no interior das fibras, processo que ocorre até a completa maturação do fruto, a qual se define o diâmetro da fibra. As características da fibra, como a maturidade, a resistência e o índice de micronaire (complexo entre a finura e a maturidade) são determinadas pela quantidade de celulose depositada nos frutos, definindo a qualidade tecnológica da fibra de algodão. Essas características são fortemente dependentes da interação genótipo e ambiente, em que estresses térmicos e hídricos prejudicam o desenvolvimento das fibras (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009). Além disso, devido ao crescimento indeterminado, no algodoeiro ocorre dissincronia entre os frutos em crescimento (drenos) e as folhas frutíferas (fonte), por isso, há queda de frutos jovens (BELTRÃO; SOUZA, 2008; LIMA; AQUINO; BERGER, 2014).

A semente do algodoeiro é piriforme, com coloração pardo-escura, e a massa varia de 0,10 a 0,13 g. A epiderme possui uma camada de células esclerificadas que podem se diferenciar em fibras, que quando pequenas são chamadas de línter. Abaixo da epiderme está localizado o tegumento que forma a casca, a qual tem coloração escura, é dura e impermeável, sendo constituída de celulose, lignina, pentosana, tanino e substâncias minerais. Dentro da casca encontram-se o endosperma e o núcleo, que formam duas membranas escuras que envolvem a amêndoa, formando o embrião, que, por sua vez, é rico em óleo, substâncias proteicas e glândulas que contêm pigmentos (KOHEL; LEWIS, 1993; LIMA; AQUINO; BERGER, 2014; PASSOS, 1977).

A fibra é constituída por uma única célula e contém mais de 95% de celulose. Quando madura, a fibra apresenta 25 camadas de celulose, cristalina, fibrila e amorfa depositadas em sua parede secundária. O processo de formação da fibra do algodão dura, em média, de 50 a 70 dias. A morfologia microscópica das fibras de algodão diferencia-se dependendo do seu estado de maturação. Quando imaturas possuem o formato da letra “U” ou contorno semelhante a região periférica de um grão de feijão e quando maduras apresentam formas elíptica a circular. A fibra de algodão possui 1,3% de proteínas que auxiliam no processo de tingimento e ceras que funcionam como lubrificante no processo de fiação realizado pela indústria têxtil. A fibra constitui-se no principal componente de produção do algodão (BELTRÃO, 2006; LIMA; AQUINO; BERGER, 2014; SESTREN; LIMA, 2015).

1.3.1.2. Fases fenológicas

O crescimento e o desenvolvimento do algodoeiro apresentam padrão bem distinto de outras culturas anuais. As plantas de algodão possuem crescimento indeterminado e o florescimento ocorre apenas em ramos reprodutivos e em espiral, por isso, é considerada uma planta complexa (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009). Todavia, o conhecimento da fenologia da cultura é imprescindível, especialmente, para a definição da época de semeadura, da aplicação de inseticidas e desfolhantes, da irrigação e da colheita.

Deste modo, algumas escalas fenológicas foram elaboradas para a cultura do algodoeiro. Doorenbos e Kassam (1979) empregaram a seguinte divisão do ciclo da cultura: estabelecimento; vegetativo; florescimento; formação dos frutos; e maturação. Posteriormente, foi proposta uma outra divisão do ciclo do algodoeiro em cinco fases fenológicas: germinação e emergência; estabelecimento das plântulas; desenvolvimento do dossel e da área foliar; desenvolvimento de flores e frutos; e maturação (OOSTERHUIS, 1990).

No Brasil, o ciclo do algodoeiro é dividido em duas grandes fases fenológicas: vegetativa e reprodutiva (CHIAVEGATO; CÂMARA, 2001). Esses autores sugerem que a fase vegetativa compreende o período desde a emergência da plântula até a formação do primeiro ramo reprodutivo, ao passo que a fase reprodutiva compreende o período desde o aparecimento do primeiro botão floral até o momento em que as fibras nos capulhos atingem o ponto de maturidade fisiológica para colheita. Outra escala fenológica para o ciclo do algodoeiro foi proposta por Marur e Ruano (2001), na qual os autores sugeriram a divisão do ciclo em quatro fases fenológicas: vegetativa; formação de botões florais; abertura das flores; e abertura dos capulhos. Essa escala fenológica tem sido a melhor aceita no país atualmente.

O período entre a germinação e a emergência da plântula dura, em média, cinco a dez dias, mas varia conforme as condições físicas, químicas e a umidade do solo, sendo que em locais onde as temperaturas são mais elevadas, a emergência tende a ser mais rápida (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009). A fase vegetativa é subdividida em fases fenológicas, sendo o período entre a emergência das plântulas e a abertura da primeira folha verdadeira (expansão foliar maior que 2,5 cm de comprimento) chamado de fase V0, o período entre a abertura da primeira e a segunda folha verdadeira correspondendo à fase V1 e assim sucessivamente para a abertura de “n” folhas verdadeiras (Vn) (MARUR; RUANO, 2001). No início da fase vegetativa do algodoeiro é priorizado o desenvolvimento do sistema radicular e, posteriormente, o desenvolvimento das folhas (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009).

A fase de botões florais é caracterizada pelo aparecimento do primeiro botão floral que ocorre no primeiro ramo reprodutivo. Assim, a fase fenológica passa a se chamar B1 ao passo que

quando o primeiro botão floral do terceiro ramo reprodutivo estiver visível, o algodoeiro encontra-se na fase B3 e assim sucessivamente à medida forem surgindo os botões florais do “n” ramo reprodutivo (Bn). Normalmente, essa fase ocorre dos 30 aos 35 dias após a emergência (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; MARUR; RUANO, 2001).

A fase desde o primeiro botão floral se transformar em flor e a sua abertura chama-se abertura de flores, e as fases fenológicas passam a ser identificados pela letra “F”. Quando o primeiro botão floral do primeiro ramo reprodutivo se transformar em flor, o algodoeiro se encontra na fase F1, quando o primeiro botão floral do terceiro ramo reprodutivo se transformar em flor, o algodoeiro se encontra na fase F3 e assim sucessivamente à medida que se abrirem as flores do “n” ramo reprodutivo (Fn). Essa fase ocorre, normalmente, de 20 a 25 dias após a fase anterior. A flor após ser fecundada é chamada de maçã (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; MARUR; RUANO, 2001).

O período desde o aparecimento das maçãs até a abertura dos capulhos é denominado de abertura dos capulhos, e passa a ser identificada pela letra “C”. Esta fase tende a ocorrer dos 50 aos 55 dias após a fase anterior. Quando a primeira maçã se transforma em capulho, o algodoeiro se encontra na fase C1 e assim sucessivamente à medida que se abrirem os demais capulhos até o ramo reprodutivo “n” (Cn). A fase reprodutiva é crítica para a produção do algodoeiro, pois a ocorrência de estresses durante esse período ocasiona grandes perdas de produtividade (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; MARUR; RUANO, 2001).

A maturação e deiscência compreende o período desde a deiscência do primeiro ao último fruto do algodoeiro, período que está relacionado à qualidade do algodão produzido (algodão em caroço). Nessa fase, ocorre o desenvolvimento das sementes e das fibras. Para o fruto, a maturidade fisiológica é atingida entre 7 e 15 dias antes de sua abertura, dependendo das condições ambientais, principalmente, temperatura e umidade do ar. A colheita tende a ocorrer dos 45 a 50 dias após a fase anterior (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009).

A ocorrência de cada fase fenológica e a duração do ciclo são características da interação genótipo e ambiente para cada cultivar do algodoeiro. Considerando essas condições, normalmente, o pico de florescimento ocorre entre os 70 e 80 dias de ciclo (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009). Para Doorenbos e Kassam (1979), a duração de cada fase fenológica corresponde: 15 a 25 dias para o estabelecimento; 25 a 35 dias para a fase vegetativa; 60 a 70 dias para o florescimento; 30 a 40 dias para a formação dos frutos; e 15 a 20 dias para a maturação. As cultivares de algodoeiro podem ser classificadas em três grupos de maturação: precoces (120 a 130 dias); médias (140 a 160 dias); e tardias (acima de 170 dias) (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; MARUR; RUANO, 2001).

1.3.1.3. Condições edafoclimáticas

As regiões produtoras da cultura do algodoeiro localizam-se na faixa entre 42°N e 30°S, em locais que apresentem, no mínimo, 180 a 200 dias sem a ocorrência de geadas, temperaturas médias do ar variando entre 20 e 30 °C, chuvas anuais entre 500 e 1500 mm, umidade relativa média de 60 a 70%, inexistência de inversão térmica, insolação de 2500 h ano⁻¹ bem distribuída durante o ciclo da cultura e declividade máxima do terreno de 10% (ANDRADE JÚNIOR et al., 2009; CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; ROSOLEM, 2014).

O algodoeiro pode ser cultivado em todos os tipos de solo, entretanto, alguns tipos devem ser evitados, como solos de textura muito arenosa, solos encharcados ou que sofrem com o encharcamentos frequentes, e solos com alto teor de fósforo. O cultivo do algodoeiro nesses tipos de solo poderá reduzir a produtividade, afetar a qualidade das fibras e, no caso dos solos com alto teor de fósforo, apresentar a coloração avermelhada ou arroxeada das fibras, depreciando sua qualidade e o valor comercial. Os solos recomendados ao cultivo do algodoeiro devem ser profundos (não devem apresentar camadas de impedimento em profundidade menor que 1,0 m), drenados, aerados, conter entre 100 e 150 g kg⁻¹ de argila, de boa fertilidade ou que tenham sua fertilidade corrigida (EVETT et al., 2012; FREIRE, 2015; ROSOLEM, 2014).

A cultura do algodoeiro é particularmente sensível à compactação do solo, quando comparada às culturas do milho, soja e trigo. Quando a densidade do solo atinge 1,3 MPa, o algodoeiro pode diminuir o crescimento da parte aérea em até 80% (ROSOLEM, 2014). O mesmo autor afirma que a compactação pode ser oriunda do tráfego de máquinas, o que afeta negativamente todo o crescimento da cultura, já que o sistema radicular fica confinado a profundidades entre 10 e 20 cm, o que contribui para uma maior sensibilidade da planta aos períodos de veranico (LIMA; AQUINO; BERGER, 2014).

Em relação ao clima, o algodoeiro é uma cultura adaptada a regiões com clima bem definido, em que a estação chuvosa ocorra durante as fases de crescimento e frutificação e a estação seca na colheita (TAKIZAWA, 2015). A necessidade hídrica da cultura do algodoeiro durante o ciclo é de 500 a 700 mm, bem distribuídos (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009). A evapotranspiração do algodoeiro média diária ao longo do ciclo varia de 3,0 a 3,8 mm; sendo que os menores valores ocorrem no início do ciclo, 1,0 a 3,7 mm dia⁻¹; e os maiores valores são encontrados nas fases de florescimento e frutificação, de 7,5 até 10,5 mm dia⁻¹, fase de maior necessidade hídrica da cultura (ADHIKARI et al., 2017; ANAPOLLI et al., 2020; BEZERRA et al., 2012; JOSÉ et al., 2020; LOKA; OOSTERHUIS, 2012). Uma prática de manejo recomendada para amenizar o efeito das elevadas taxas evapotranspiratórias é a manutenção de palha na

superfície do solo (ROSOLEM, 2014). Em regiões onde a restrição climática para o cultivo do algodoeiro está relacionada às poucas chuvas, recomenda-se o uso da irrigação.

A cultura do algodoeiro é exigente em radiação solar durante todo o ciclo (TAKIZAWA, 2015). No entanto, por ser uma planta que possui mecanismo de fixação de carbono do tipo C3, possui a enzima carboxigenase com baixa afinidade com o CO₂ (TAIZ; ZEIGER, 2016), o que a torna pouco eficiente na absorção de CO₂ atmosférico. A fotossíntese líquida máxima é atingida quando a radiação solar atinge 1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, valor típico de plantas de metabolismo C3 (ECHER; ROSOLEM, 2015; WELLS, 2011). Caso o algodoeiro seja exposto a baixos níveis de radiação solar, como em condições de alta nebulosidade e elevada população de plantas, há redução da produção de carboidratos e o aumento na relação etileno/açúcares, resultando na abscisão de órgãos reprodutivos da planta, redução da qualidade e da produtividade (ECHER; ROSOLEM, 2015; GRUNDY; YEATES; BELL, 2020; ROSOLEM, 2014; WELLS, 2011).

O algodoeiro é muito sensível às variações na temperatura do ar, principalmente, em relação às temperaturas média e mínima. Assim, o regime térmico de uma região define a possibilidade de cultivo, assim como a duração do ciclo da cultura. A temperatura basal da cultura do algodoeiro é 15 °C, e a faixa de temperatura ótima para o cultivo é de 20 a 30 °C (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; EVETT et al., 2012; OOSTERHUIS; SNIDER, 2011; REDDY; BAKER; HODGES, 1991; ROSOLEM; ECHER, 2015). Durante a germinação e a emergência, a temperatura média do ar mais adequada é de 32 °C, com temperatura mínima de 18 °C e temperatura máxima de 34 °C. Já durante o crescimento vegetativo, a temperatura média do ar deve estar entre 25 e 30 °C, com temperatura mínima de 15 °C e temperatura máxima entre 33 e 35 °C. Finalmente, durante a frutificação a temperatura média do ar deve variar entre 22 e 26 °C (EVETT et al., 2012; FREIRE, 2015; ROSOLEM, 2014).

Temperaturas noturnas abaixo de 15 °C podem retardar o aparecimento do primeiro ramo reprodutivo. Abaixo de 17,5 °C podem prejudicar o padrão de deposição concêntrica da celulose nos frutos afetando a qualidade das fibras do algodoeiro, tornando as fibras imaturas, muito finas (micronaire baixo), menos resistentes e mais curtas. Temperaturas médias do ar inferiores a 20 °C quando ocorrem nas fases de frutificação e maturação podem paralisar o desenvolvimento das maçãs e reduzir a taxa de acúmulo de celulose nos frutos, isso prejudica o comprimento e a massa das fibras (BELTRÃO et al., 2015; FREIRE, 2015; ROSOLEM, 2014).

As temperaturas noturnas e a disponibilidade de água são fatores primordiais para definir a época de semeadura, especialmente, em cultivares de ciclo tardio. A semeadura em época em que ocorrem condições climáticas favoráveis poderão aumentar a produtividade do algodoeiro em até 60% (BELTRÃO et al., 2015; FREIRE, 2015; ROSOLEM, 2014).

1.3.2. Efeito das adversidades climáticas na cultura do algodoeiro

1.3.2.1. Déficit hídrico

A água exerce papel de extrema importância para os vegetais e os animais. Aproximadamente 97% da água presente nos vegetais retorna para a atmosfera por meio, principalmente, da transpiração, sendo o restante utilizado na expansão celular (2%) e em processos metabólicos, especialmente, a fotossíntese (1%). O déficit hídrico tem efeito em diferentes processos fisiológicos das plantas, sendo esses complexos e interrelacionados. De modo geral, a deficiência hídrica causa danos às plantas, como a redução da expansão celular e foliar, a diminuição das atividades celulares e metabólicas, o fechamento estomático, a inibição fotossintética, a abscisão foliar e a alteração na partição dos fotoassimilados (CHASTAIN et al., 2014; LOKA; OOSTERHUIS; RITCHIE, 2011; TAIZ; ZEIGER, 2016).

Algumas plantas, quando submetidas ao déficit hídrico inibem o crescimento do caule e a expansão foliar, mas o alongamento radicular é estimulado, o que pode ser visto como uma forma de adaptação à seca em vez de uma restrição fisiológica (TAIZ; ZEIGER, 2016). A expansão do sistema radicular, particularmente em profundidade, favorece a exploração das camadas mais profundas do solo em busca de água, promovendo maior tolerância à seca. No entanto, as respostas dos vegetais ao déficit hídrico variam conforme o genótipo, o tipo e a idade do tecido vegetal (crescimento ativo ou maduro), a duração do período com o estresse, as alterações nas atividades das enzimas respiratórias, entre outras (ATKIN; MACHEREL, 2009; HIMANSHU et al., 2019; LOKA; OOSTERHUIS; RITCHIE, 2011; SNOWDEN et al., 2014; ZONTA et al., 2017).

O algodoeiro apresenta certa tolerância à seca quando comparado com os cereais, entretanto, o déficit hídrico pode provocar paralização no crescimento caso ocorra na fase fenológica que abrange desde o primeiro botão até a primeira flor, e queda de partes reprodutivas e frutos (flores e capulhos) caso ocorra na fase fenológica que abrange desde a primeira flor ao primeiro capulho, promovendo queda na produtividade, pois essa última está diretamente relacionada ao número de capulhos produzidos (LOKA; OOSTERHUIS, 2012; ROSOLEM, 2001; ZONTA et al., 2017). Assim, as fases fenológicas mais sensíveis ao déficit hídrico são o florescimento e a formação das maçãs (frutos), nos quais o excesso ou déficit hídrico podem provocar abscisão das estruturas reprodutivas, diminuindo a produtividade da cultura (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; HIMANSHU et al., 2019; LIMA; AQUINO; BERGER, 2014; SNOWDEN et al., 2014; ZONTA et al., 2017).

A diminuição da produção do algodoeiro será menor caso a deficiência de água no solo ocorra nas fases de menor demanda hídrica, como a fase de maturação (JOSÉ et al., 2020). Quanto

maior a duração do déficit hídrico em áreas de cultivo do algodoeiro mais afetados serão os processos de crescimento, de desenvolvimento e da definição da qualidade das fibras (HIMANSHU et al., 2019; ZONTA et al., 2017).

A ocorrência de deficiência hídrica pode reduzir a evapotranspiração do algodoeiro em 50%, o que pode levar à diminuição da produtividade da cultura entre 28 e 45% (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Caso, o déficit hídrico ocorra nas fases de emergência e enchimento das maçãs, quando pelo menos 10% das plantas estão frutificando e as primeiras maçãs estão completamente cheias, a redução na produtividade pode ser de 12 a 61%, respectivamente (ZONTA et al., 2017).

A produtividade do algodoeiro está correlacionada positivamente com a chuva (SILVA et al., 2009a). Esses autores evidenciam que a cultura é sensível a pequenas variações climáticas, como períodos curtos sem chuva durante a estação chuvosa (veranicos), principalmente, durante as fases fenológicas de maior demanda hídrica da cultura. Entretanto, grandes volumes de chuva durante a fase fenológica que abrange desde o primeiro capulho até a colheita podem ocasionar queda na produtividade devido ao apodrecimento das maçãs e capulhos da parte de baixo da planta, onde estão os frutos mais desenvolvidos (ROSOLEM, 2001).

O aporte hídrico adequado aliado ao equilíbrio dos demais fatores de produção proporciona tanto o crescimento dos ramos vegetativos como dos reprodutivos, resultando em aumento de produtividade (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009). Algumas medidas podem ser tomadas para minimizar as perdas de produtividade na cultura do algodoeiro causadas pela deficiência hídrica, sendo elas: uso de genótipos tolerantes à seca; uso de irrigação complementar ou plena; cobertura do solo com palha; adoção de épocas de semeadura mais adequadas, entre outras.

1.3.2.2. Temperatura do ar e do solo e umidade do solo

Apesar do algodoeiro ter origem tropical, ou seja, adaptado a elevadas temperaturas, a cultura não produz satisfatoriamente bem em ambientes muito quentes. Estudos de campo mostram que há correlação negativa entre a produtividade do algodoeiro e a ocorrência de altas temperaturas nas fases do florescimento e formação dos frutos nessa cultura (OOSTERHUIS, 1999; OOSTERHUIS; SNIDER, 2011), evidenciando que essas fases fenológicas além de serem as mais sensíveis ao déficit hídrico também o são em relação ao estresse térmico.

As fases de germinação e emergência, assim como de desenvolvimento inicial do algodoeiro sofrem grande influência da temperatura e umidade do solo. A germinação das sementes é mais rápida quanto maior for a temperatura do solo. O aumento da temperatura de 15,6 °C para

32,2 °C resultou em expansão rápida e maior do hipocótilo e da radícula. No entanto, a expansão desses componentes tende a ser inversamente proporcional ao aumento da umidade do solo (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; WANJURA; BUXTON, 1972).

A combinação de temperaturas abaixo de 20 °C com a alta umidade do solo podem diminuir a velocidade de crescimento da raiz, já que isso proporciona ambiente adequado para a ocorrência de doenças nas plântulas. Além disso, em condições de baixa temperatura, o crescimento da radícula é paralisado e o sistema radicular tende a se tornar superficial (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; MCARTHUR; HESKETH; BAKER, 1976). Entretanto, temperaturas elevadas, acima de 40 °C, prejudicam a germinação, podendo paralisar a emergência das plântulas (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; GEORGES, 1982).

Durante o desenvolvimento inicial do algodoeiro, a planta prioriza o desenvolvimento do sistema radicular em relação à parte aérea, que segue em ritmo relativamente lento. Entretanto, a ocorrência de elevadas temperaturas nas primeiras semanas do ciclo pode prejudicar o crescimento das raízes do algodoeiro, ao passo que a redução da umidade no solo pode favorecê-lo, o que é desejável em cultivos não irrigados (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009).

As melhores taxas de fotossíntese na cultura do algodoeiro são alcançadas em temperaturas do ar próximas de 32 °C, entretanto, a partir de 22 °C, a taxa de fotossíntese líquida é reduzida. A fotorrespiração é baixa quando a temperatura do ar é menor que 25 °C, ao passo que quando esta alcança 35 °C, o processo pode atingir 50% da fotossíntese aparente, tornando a assimilação líquida ineficiente, comprometendo a demanda de fotoassimilados e a produtividade (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; TAIZ; ZEIGER, 2016). Além disso, temperaturas acima de 40 °C podem reduzir a produção de biomassa total da parte aérea do algodoeiro em 50% (OOSTERHUIS; SNIDER, 2011; REDDY; BAKER; HODGES, 1991).

A formação e o desenvolvimento de botões florais, flores, fibras, e o crescimento e desenvolvimento dos frutos também sofrem influência das temperaturas do ar. Elevadas temperaturas noturnas, por volta de 25 °C, retardam o florescimento, enquanto temperaturas noturnas de, aproximadamente, 20 °C, associadas a temperaturas diurnas de 25 °C, favorecem o florescimento (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009).

O desenvolvimento reprodutivo é especialmente sensível à altas temperaturas tanto antes quanto depois da antese. O aumento da temperatura do ar favorece o desenvolvimento de ramos vegetativos em relação aos reprodutivos, ao passo que sob temperaturas elevadas, os eventos de aparecimento de botões florais são acelerados, no entanto, a abscisão das maçãs é mais acentuada quando a temperatura média diária se encontra acima de 32 °C, e a retenção é quase zero a 40 °C

(OOSTERHUIS; SNIDER, 2011; REDDY; HODGES; REDDY, 1992; REDDY et al., 1996; REDDY; BAKER; HODGES, 1991).

Quando ocorrem temperaturas elevadas associadas ao excesso de água e de nutrientes, a formação de ramos vegetativos é favorecida em relação aos ramos reprodutivos e, conseqüentemente, a produção de flores e frutos é reduzida (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009).

1.3.3. *Yield gap* do algodoeiro

1.3.3.1. *Yield gap*

A quebra de produtividade (*yield gap*) é um tema que vem sendo muito estudado nos últimos anos, com o objetivo de identificar sua magnitude e as principais causas, além de auxiliar na estimativa dos efeitos da variabilidade e das possíveis mudanças climáticas na produtividade das culturas e, desse modo, proporcionar a definição de estratégias para mitigação das perdas nos cenários atual e futuro, promovendo a efetiva melhoria da segurança alimentar e energética a nível mundial (SENTELHAS et al., 2016; VAN ITTERSUM et al., 2013).

Para estudos relacionados ao *yield gap*, a produtividade agrícola é dividida em diferentes tipos e níveis. Battisti et al. (2012) classificaram a produtividade em três diferentes níveis e tipos: produtividade potencial (PP), produtividade atingível (PA) e produtividade real (PR) (Figura 1.1).

Figura 1.1. Tipos de produtividade agrícola e seus respectivos níveis e fatores condicionantes (determinantes, limitantes e redutores). Adaptada de Van Ittersum e Rabbinge (1997).

A produtividade potencial ocorre quando a planta é cultivada em um ambiente sem restrição hídrica, nutricional e com controle fitossanitário ótimo. Neste caso, a taxa de crescimento da cultura é condicionada apenas pelos fatores determinantes, ou seja, a interação do genótipo e sua população com a energia do ambiente, representada pela radiação solar, fotoperíodo, e temperatura do ar, além da concentração de dióxido de carbono na atmosfera (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; VAN ITTERSUM et al., 2013; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997). Esse tipo de produtividade é um valor teórico que pode ser alcançado de várias formas, como em condições experimentais, com os cultivos sob manejo ótimo e irrigados com lâmina plena, ou por modelos de simulação de produtividade devidamente calibrados e validados para a cultivar de interesse (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; VAN ITTERSUM et al., 2013).

A produtividade atingível é aquela obtida em condições de sequeiro, porém, com manejo ótimo. Esse tipo de produtividade sofre o efeito dos fatores determinantes e dos fatores limitantes, sendo esses relacionados ao balanço hídrico da cultura, levando-se em consideração o déficit hídrico e o déficit nutricional resultante deste. Nessa condição, os níveis de produtividade serão iguais, caso não haja déficit hídrico, ou menores, caso o déficit hídrico ocorra, do que o da produtividade potencial (HOCHMAN et al., 2012; VAN ITTERSUM et al., 2013). Assim, a produtividade atingível continua sendo um valor teórico, representando a máxima produtividade que os produtores poderão atingir em condições de sequeiro, porém, ainda sem perdas devido ao manejo agrícola ótimo (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; SENTELHAS et al., 2016; VAN ITTERSUM et al., 2013).

A produtividade real, por sua vez, é aquela que realmente é obtida a campo, em que o nível de produtividade é determinado pela interação entre os fatores determinantes, limitantes e redutores, sendo esses relacionados ao manejo agrícola, ou seja, ao nível tecnológico empregado pelo produtor na proteção dos cultivos contra pragas, doenças e plantas daninhas (SENTELHAS et al., 2015; VAN ITTERSUM et al., 2013).

O *yield gap* é definido como a diferença entre os distintos tipos de produtividade em uma condição específica de cultivo (Figura 1.1) e essa serve como indicador da magnitude e das possíveis causas das quebras de produtividade (SENTELHAS et al., 2016; VAN ITTERSUM et al., 2013). O *yield gap* total é definido como a diferença entre a produtividade potencial e a real (SENTELHAS et al., 2016). Quanto menor o *yield gap* total, maior será a proximidade das produtividades potencial e real, havendo, assim, pouca possibilidade de aumento da produtividade (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009). As principais causas do *yield gap* das culturas agrícolas pode ser devido à deficiência hídrica e ao déficit de manejo agrícola (SENTELHAS et al., 2016; VAN ITTERSUM et al., 2013; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997). O *yield gap* devido ao déficit hídrico é dado pela diferença

entre a produtividade potencial e a atingível, enquanto o *yield gap* por déficit de manejo agrícola é obtido pela diferença entre a produtividade atingível e a real (VAN ITTERSUM et al., 2013).

Além dos *yield gaps* ocasionados pelos déficits de água e de manejo, podem ser listadas também as quebras de produtividade causadas por: excesso hídrico; ocorrência de ventos extremos; ocorrência de granizo; distúrbios fisiológicos; desequilíbrio nutricional; problemas de solo (acidez, alcalinidade, compactação, erosão); entre outros (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009).

1.3.3.2. Yield gap do algodoeiro no mundo e no Brasil

O *yield gap* da cultura do algodoeiro foi objeto de estudo de muitas pesquisas em várias regiões no mundo, como na Austrália (CONSTABLE; BANGE, 2015), no Paquistão (ASLAM, 2016), na Índia (AGGARWAL et al., 2008; ELUM; SEKAR, 2015); e nos Estados Unidos (WARADE et al., 2010). No entanto, estudos dessa natureza ainda são escassos no Brasil.

Na Austrália, a cultura do algodoeiro mostrou-se altamente sensível a variação das chuvas, condição responsável pela tendência de maior variabilidade na produtividade da cultura, especialmente, em cultivos de sequeiro, o que provocou um *yield gap* da cultura de 68%, enquanto nos cultivos irrigados as perdas foram de 33% (CONSTABLE; BANGE, 2015). Este estudo também mostrou que a produtividade potencial do algodoeiro obtida por meio de modelos de simulação pode atingir até 7817 kg ha⁻¹ (considerou-se o índice de colheita para o algodão em caroço de 60%). Já no Paquistão, a produtividade potencial do algodoeiro pode alcançar até 4300 kg ha⁻¹ e o *yield gap* total da cultura foi da ordem de 2430 kg ha⁻¹ (ASLAM, 2016).

Na Índia, a magnitude do *yield gap* total do algodoeiro variou entre 550 e 1120 kg ha⁻¹, quando a produtividade potencial foi estimada a partir de dados obtidos em fazendas de alta produtividade e por modelos de simulação, respectivamente (AGGARWAL et al., 2008). Entretanto, a causa do *yield gap* não foi determinada, apesar de que quando a irrigação foi utilizada como ação mitigadora, houve um incremento de 700 kg ha⁻¹ na produtividade do algodoeiro, indicando que grande parte do *yield gap* foi causado pelo déficit hídrico.

Outra pesquisa também realizada na Índia, mostrou que o *yield gap* total na cultura do algodoeiro variou entre 594 e 1658 kg ha⁻¹, respectivamente com o uso de cultivares convencional e transgênica (ELUM; SEKAR, 2015). Para ambas as cultivares, a principal causa do *yield gap* do algodoeiro está relacionado ao manejo agrícola, já que esta foi responsável por perdas de produtividade de 73% no cultivo convencional e de 68% no cultivo transgênico. Estratégias de manejo, como a aplicação da adubação nitrogenada e a fosfatada reduziram o *yield gap* na cultura do algodoeiro, enquanto a adubação com potássio teve efeito contrário.

Nos Estados Unidos, a magnitude do *yield gap* do algodoeiro foi, em média, 865 kg ha⁻¹, sendo que os maiores *yield gaps* ocorreram nas pequenas propriedades (893 kg ha⁻¹), enquanto os menores ocorreram em médias propriedades (834 kg ha⁻¹) (WARADE et al., 2010). Nesse estudo, as causas do *yield gap* da cultura foram de ordem nutricional em pequenas e médias propriedades, enquanto em grandes propriedades estavam relacionadas ao uso excessivo de máquinas agrícolas.

No Brasil, até o momento, há apenas algumas pesquisas que apontam possíveis fatores responsáveis pela redução das produtividades da cultura do algodoeiro, especialmente nos estados do Mato Grosso (SOARES, 2015) e da Paraíba (SILVA et al., 2009a). De acordo com esses autores, as principais causas que contribuem para o *yield gap* do algodoeiro no Brasil são: distribuição irregular de chuvas e ocorrência de veranicos; temperaturas baixas; e problemas fitossanitários, como a infestação de bicudo (*Anthonomus grandis* Boheman) e a ocorrência da ramulose causada pelo fungo *Colletotrichum gossypii* var. *cephalosporioides*.

Atualmente, a produtividade média da cultura do algodoeiro nas condições brasileiras é de 4236 kg ha⁻¹, obtida na safra 2018/2019 (IBGE, 2020). No entanto, Rosolem (2001) evidencia que a produtividade do algodoeiro no Brasil poderia alcançar por volta de 7500 kg ha⁻¹ em condições ideais de cultivo, ou seja, com chuvas regulares ou com o uso de irrigação em locais onde há ocorrência de veranicos, temperaturas do ar entre 21 e 26 °C e controle fitossanitário satisfatório durante todo o ciclo da cultura.

1.3.4. Modelos de simulação de produtividade

Os modelos de simulação de produtividade são representações matemáticas da compreensão atual da interação dos processos biofísicos relacionados à produtividade das culturas, como: fases fenológicas; assimilação de carbono; partição de carboidratos; e da resposta das culturas aos fatores ambientais (clima e solos). Desse modo, esses modelos tentam explicar de forma determinística a interação genótipo, ambiente e manejo (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; VAN ITTERSUM et al., 2013).

Os modelos de simulação de produtividade necessitam de dados de entrada (*input*) da região estudada, como dados meteorológicos diários (temperatura do ar, chuva, radiação solar, umidade relativa do ar), do solo (textura, profundidade, capacidade de água disponível) e das práticas de manejo das culturas (data de semeadura, data de colheita, densidade populacional, irrigação, fertilização etc.) (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; VAN ITTERSUM et al., 2013).

Os atributos desejados para os modelos de simulação de produtividade de culturas são: simulação em escala diária; simulação de processos fisiológicos fundamentais; uso mínimo de

coeficientes relacionados a genética da cultura; simulação com diversos tipos de práticas de manejo; proximidade dos resultados simulados (*output*) com os dados reais; e facilidade de uso e acesso ao modelo (VAN ITTERSUM et al., 2013). Os modelos de simulação também podem ser utilizados para avaliar possíveis ganhos de produtividade por meio de modificações de gerenciamento específicas (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009), como testar o uso da irrigação, cobertura do solo, alteração de datas de semeadura, duração do ciclo da cultura e até mesmo de características genéticas das cultivares (BATTISTI et al., 2017; ELLI et al., 2020).

Os modelos de simulação de produtividade têm sido muito utilizados na determinação do *yield gap* em diversas culturas no Brasil, como da cana-de-açúcar (DIAS; SENTELHAS, 2018; MONTEIRO; SENTELHAS, 2017), do feijão (MEIRELES et al., 2003), da mandioca (VISSES; SENTELHAS; PEREIRA, 2018), do milho (ANDREA et al., 2018; DUARTE, 2018; MONTEIRO et al., 2017) e da soja (SENTELHAS et al., 2015). Os modelos mais empregados nesses estudos são: Zona Agroecológica da FAO; DSSAT; APSIM; MONICA, e AquaCrop. Apesar de existirem estudos da produtividade do algodoeiro (ADHIKARI et al., 2016; CONSTABLE; BANGE, 2015) e da determinação do *yield gap* da cultura (AGGARWAL et al., 2008; NACHIMUTHU; WEBB, 2017), em outros países, no Brasil esse tipo de enfoque ainda é pouco explorado, especialmente, quando se aplica a abordagem multi-modelos (*ensemble*).

1.3.4.1. Modelo Zona Agroecológica-FAO

O modelo Zona Agroecológica da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*, FAO), foi desenvolvido por Kassam (1977), baseado na proposição de De Wit (1965), sendo posteriormente adaptado por Barbieri e Tuon (1992) para seu uso em computadores. Esse modelo estima a produtividade potencial (PP) que é obtida pela interação entre o genótipo, a radiação solar, o fotoperíodo e a temperatura do ar, variáveis que condicionam a fotossíntese bruta, a respiração de manutenção e, assim, a fotossíntese líquida, que representa a energia disponível para o crescimento da cultura. A fotossíntese bruta é estimada pelo somatório da fotossíntese obtida em condições de céu claro e de céu nublado, em função de coeficientes adimensionais relacionados à eficiência do processo fotossintético, associados ao tipo de cultura, ao índice de área foliar, ao metabolismo de fixação de CO₂ atmosférico, à radiação solar e ao fotoperíodo e à temperatura do ar (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

O índice de área foliar máximo da cultura (IAF_{max}) está relacionado ao coeficiente de área foliar (C_{IAF}), o qual define a taxa máxima de crescimento da cultura. Como o IAF varia ao

longo do ciclo é necessária uma correção dada pelo C_{IAF} . Já o processo de respiração de manutenção é em função da temperatura média do ar, definindo assim o coeficiente de ajuste para a respiração de manutenção (C_r). O índice de colheita (C_c), por sua vez, representa a quantidade de biomassa total da cultura que é colhida ao final do ciclo, enquanto o índice de umidade (C_{Um}) indica o teor de água na parte colhida, ou seja, no produto (KASSAM, 1977; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

Quando a PP é penalizada pela deficiência hídrica, o modelo passa a estimar a produtividade atingível (PA) (DOORENBOS; KASSAM, 1979; RAO; SARMA; CHANDER, 1988). A deficiência hídrica relativa ($1 - E_{Tr}/E_{Tc}$) é obtida pela relação entre a evapotranspiração real da cultura (E_{Tr}), estimada por meio do balanço hídrico de cultura, de acordo com o método de Thornthwaite e Mather (1955), e a evapotranspiração máxima da cultura (E_{Tc}). Essa última é obtida pelo produto entre a evapotranspiração de referência (E_{To}), estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO (ALLEN et al., 1998), e o coeficiente de cultura (K_c). No balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), a capacidade de água disponível para o solo e a cultura (profundidade do sistema radicular) de interesse pode ser estimada por meio de funções de pedotransferência devidamente calibradas para a área de estudo (CAMPELO JUNIOR et al., 2014; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

A penalização da PP pela deficiência hídrica também considera a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico por meio do coeficiente de resposta ou coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y), o qual varia com a fase fenológica da cultura. O K_y possibilita dimensionar a tolerância das espécies e suas cultivares ao déficit hídrico por meio da magnitude de seus valores, sendo inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior os valores de K_y menor a tolerância da cultura/cultivar ao déficit hídrico (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Em geral, as plantas são mais sensíveis, isto é, menos tolerantes ao déficit hídrico durante as fases de estabelecimento, florescimento e início da frutificação, enquanto as fases de desenvolvimento vegetativo e maturação são mais tolerantes aos períodos de estiagem (Figura 1.2). A calibração do K_y para cada fase fenológica permite identificar e agrupar as cultivares em relação à tolerância ao déficit hídrico, possibilitando a realização de estudos de risco climático e estimação da produtividade agrícola em diferentes ambientes de produção.

Figura 1.2. Relação entre a quebra relativa de produtividade ($1 - PA/PP$) e a deficiência hídrica relativa ($1 - ET_r/ET_c$) de uma cultura hipotética, com destaque para a magnitude dos valores de K_y em diferentes fases fenológicas (desenvolvimento vegetativo, florescimento, frutificação e maturação). Adaptada de Doorenbos e Kassan (1979) e Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002).

Esse modelo vem sendo muito utilizado em pesquisas brasileiras para simulação da produtividade de culturas, como do arroz (MONTEIRO et al., 2013), da cana-de-açúcar (MONTEIRO; SENTELHAS, 2014, 2017), da mandioca (VISSES; SENTELHAS; PEREIRA, 2018), do milho (ANDRIOLI; SENTELHAS, 2009; MONTEIRO et al., 2017), da soja (BATTISTI; SENTELHAS, 2015; SENTELHAS et al., 2015) e do sorgo (BARROS et al., 2016). Em relação ao algodoeiro, estudos com esse modelo foram realizados apenas com algumas cultivares no estado do Mato Grosso (COSTA et al., 2019; SILVA et al., 2019), e considerando-se as produtividades reais da cultura no nordeste brasileiro (SILVA et al., 2020).

1.3.4.2. Modelo AquaCrop

O modelo AquaCrop foi desenvolvido pela FAO no Borland DELPHI (Versão 4.0, 1998), um software de domínio público. Atualmente, esse modelo encontra-se na versão 6.1, de maio de 2018. O AquaCrop foi elaborado para simular, na escala diária, a produção de biomassa e a produtividade das culturas em função das variáveis meteorológicas, da água disponível no solo e das características do genótipo (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009). Esse modelo foi desenvolvido a partir da evolução da abordagem de Doorenbos e Kassam (1979), abrangendo os

seguintes itens: (I) trata a evapotranspiração da cultura dividida em transpiração e evaporação de água do solo; (II) modelo simples de crescimento e senescência do dossel baseado nas variáveis ambientais; (III) a produtividade final é obtida em função da biomassa total e do índice de colheita; e (IV) separa os efeitos do estresse hídrico nos seguintes processos: crescimento; senescência do dossel; transpiração da cultura; e índice de colheita.

O AquaCrop possui cinco componentes principais e respostas dinâmicas associadas: fenologia; cobertura do dossel; profundidade de enraizamento; produção de biomassa; e produtividade. Essa última responde ao estresse hídrico, em qualquer momento, e por meio da redução da taxa de expansão do dossel (normalmente, durante o crescimento inicial), fechamento dos estômatos (durante toda o ciclo da cultura), aceleração da senescência do dossel (especialmente, durante as fases finais do ciclo) e alterações no índice de colheita (após o início da fase reprodutiva) (STEDUTO et al., 2009). Os efeitos destes estresses na cultura são simulados por coeficientes, que variam de zero (estresse total) a um (sem estresse) (VANUYTRECHT et al., 2014).

Esse modelo se baseia na interação do sistema solo-planta-atmosfera, e utiliza poucos parâmetros e variáveis climáticas, da cultura, de solo e de manejo como dados de entrada. Os dados climáticos abrangem as temperaturas máxima e mínima do ar, a radiação solar, a chuva, a demanda evaporativa da atmosfera expressa como evapotranspiração de referência, e a concentração média anual de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. As quatro primeiras variáveis climáticas podem ser obtidas por registros de estações meteorológicas instaladas próximo ao local de estudo e a concentração de CO_2 pode ser obtida por meio de medidas realizadas pelo Observatório Mauna Loa, no Havaí, e armazenadas no próprio modelo, ou inseridas pelo usuário. A evapotranspiração de referência é estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO, parametrizado por Allen et al. (1998) (STEDUTO et al., 2009).

Os dados da cultura para estimação dos processos de crescimento, desenvolvimento e produtividade, estão disponíveis no próprio modelo como parâmetros padrões calibrados para as principais culturas agrícolas, e esses devem ser calibrados e validados conforme as condições ambientais estudadas. Esses parâmetros podem ser divididos em conservadores, como temperaturas basais inferior e superior, coeficiente de cultura quando o dossel está completo e índice de colheita de referência; e não conservadores, como profundidade efetiva mínima e máxima de raízes, coeficiente de crescimento do dossel e produtividade da água normalizada para a ET_0 e a concentração de CO_2 na atmosfera. Os parâmetros conservadores apresentam muita variação no tempo e no espaço, e devem ser obtidos, principalmente, na abordagem de tentativa e erro, enquanto os parâmetros não conservadores têm pouca variação no tempo e no espaço, portanto, devem ser obtidos por meio da mensuração em campos experimentais (HSIAO et al., 2012; RAES

et al., 2009; STEDUTO et al., 2009; TSAKMAKIS et al., 2019; VANUYTRECHT et al., 2014). Os parâmetros mínimos necessários para a calibração e validação das simulações realizadas pelo modelo AquaCrop foram listadas por Hsiao et al. (2012).

Esse modelo foi parametrizado, primeiramente, para a cultura do milho (HSIAO et al., 2009). Para o algodoeiro, o primeiro estudo a realizar a parametrização e testar o desempenho do AquaCrop para a cultura foi o de Farahani, Izzi e Oweis (2009), em condições de irrigação total e deficitária na região do Mediterrâneo (Síria). Esse modelo também foi utilizado na simulação de produtividade da cultura do algodoeiro na China (LI; YU; ZHAO, 2019; TAN et al., 2018), na Espanha (GARCÍA-VILA et al., 2009), nos Estados Unidos (QIAO, 2012), na Grécia (LINKER et al., 2016; TSAKMAKIS et al., 2019) e na Síria (HUSSEIN; JANAT; YAKOUB, 2011).

Os dados de solo, para o cálculo do balanço hídrico, referem-se à profundidade do sistema radicular e as propriedades hidráulicas (umidade do solo no ponto de saturação, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e condutividade hidráulica), as quais podem ser obtidas na própria interface do modelo ou por meio de funções de pedotransferência devidamente calibradas para a região de estudo (CAMPELO JUNIOR et al., 2014; STEDUTO et al., 2009). O algoritmo do balanço hídrico baseia-se na capacidade de armazenamento de água em cada camada do solo, descrita nos modelos BUDGET (RAES, 1982; RAES et al., 2006) e CROPWAT (SMITH, 1992).

Alguns aspectos de manejo podem ser considerados no AquaCrop, como datas de semeadura, irrigação, fertilização, cobertura morta e plantas daninhas, mas ainda não considera ataques de pragas ou doenças (STEDUTO et al., 2009).

1.3.4.3. Modelo CROPGRO-Cotton (DSSAT)

O Sistema de Apoio à Decisão para a Transferência de Agrotecnologia (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*, DSSAT) foi desenvolvido no final da década de 1980 por uma rede internacional de pesquisadores. O DSSAT visa simular sistemas de produção agrícola considerando a interação entre o clima, o solo, as culturas e a gestão do manejo. Além disso, o DSSAT fornece uma plataforma amigável ao usuário de modo que este possa retirar e incorporar facilmente os módulos adicionais do sistema. Esse sistema simula o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade de uma cultura em uma determinada área uniforme com manejo prescrito ou simulado, assim como modificações no conteúdo de água no solo, carbono e nitrogênio que ocorram no sistema durante o cultivo (JONES et al., 2003).

A plataforma DSSAT consiste na reunião de programas independentes (banco de dados, modelos de simulação – culturas e aplicação) que operam em conjunto e os modelos de simulação

de culturas representam o núcleo do sistema (JONES et al., 2003). Atualmente, o DSSAT encontra-se na versão 4.7.5 e está calibrado para diferentes culturas agrícolas, como algodão, amendoim, arroz, batata, cana-de-açúcar, canola, cártamo, cevada, ervilha, feijão caupi, feijão fava, feijão guandu, feijão seco, feijão verde, girassol, grão de bico, maçã, mandioca, milheto, milho, milho doce, pimenta, repolho, soja, sorgo, tomate e trigo (HOOGENBOOM et al., 2017).

O modelo de simulação para a cultura do algodoeiro na plataforma DSSAT é chamado de *Cropping System Model* (CSM)-CROPGRO-*Cotton*, e é baseado no modelo CROPGRO. Esse modelo foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade da Flórida em conjunto com a Universidade da Geórgia, ambas localizadas nos Estados Unidos, e foi introduzido ao DSSAT apenas na versão 4.5 da plataforma (HOOGENBOOM et al., 2012; PATHAK et al., 2007). Ele foi precedido pelo modelo CROPGRO-*Soybean*, a linguagem de programação é escrita em Fortran e a simulação desse modelo é realizada em escala diária, com a integração sendo realizada desde a semeadura até a maturação ou data de colheita especificada pelo usuário (HOOGENBOOM; JONES; BOOTE, 1992; JONES et al., 2003; THORP et al., 2014).

O modelo CROPGRO-*Cotton* simula os processos de crescimento e desenvolvimento da cultura do algodoeiro, como fenologia, assimilação potencial do carbono, tamanho do dossel, componentes de produção e estresses hídrico, por nitrogênio e térmico (THORP et al., 2014). Além disso, esse modelo simula processos atmosféricos e do solo, como efeito da concentração de CO₂ na fotossíntese e na transpiração; evapotranspiração de referência por meio dos métodos de Priestley e Taylor (1972) e Penman-Monteith-FAO (ALLEN et al., 1998); balanço de água no solo baseado na abordagem do “balde basculante” (*tipping bucket approach*) para um perfil de solo unidirecional (RITCHIE et al., 1998, 2009); nitrogênio no solo (GIJSMAN et al., 2002; GODWIN; SINGH, 1998); fósforo no solo; e encharcamento e inundação no solo (THORP et al., 2014).

De modo geral, para realizar as simulações, o modelo CROPGRO-*Cotton* necessita de dados de entrada, como dados ambientais (clima e solo), manejo da cultura e informações genéticas das cultivares de algodão (HUNT; WHITE; HOOGENBOOM, 2001). Os dados ambientais são: dados de clima em escala diária (temperaturas máximas e mínimas do ar, irradiância solar, chuva, velocidade do vento e umidade relativa do ar) e de solo. Os dados de solo referem-se às características da superfície do solo, como declividade, cor, albedo, drenagem e descrição de um perfil de solo unidimensional relacionado à textura (número e profundidade das camadas do solo, conteúdo de areia e argila, e teor de carbono orgânico), às propriedades físico-químicas (pH, capacidade de troca catiônica – CTC e densidade do solo) e hidráulicas (teor de água na saturação, capacidade do campo e ponto de murcha permanente, e condutividade hidráulica em solo saturado) (HOOGENBOOM et al., 2017; THORP et al., 2014). Quando inexistentes, a capacidade de campo

e o ponto de murcha permanente poderão ser obtidos por meio de funções de pedotransferência devidamente calibradas para a região de estudo (CAMPELO JUNIOR et al., 2014).

As práticas de manejo da cultura incluídas no modelo são: data de semeadura/plantio; método de semeadura/plantio; distribuição de plantio; população de plantas na semeadura; espaçamento entre linhas; direção da linha; profundidade de semeadura; datas, quantidades e tipo de aplicação da irrigação; datas, quantidades e tipo de aplicação de fertilizantes; e datas de aplicação e tipos de cobertura morta. No módulo Modificações Ambientais (*Environmental modifications*), variáveis como fotoperíodo (duração do dia), radiação solar, temperaturas máximas e mínimas do ar, chuva, concentração de CO₂ na atmosfera, umidade relativa do ar e velocidade do vento podem ser alteradas visando simular os efeitos das mudanças climáticas na fisiologia e na produtividade da cultura do algodoeiro (HOOGENBOOM et al., 2017; THORP et al., 2014).

As informações genéticas relacionadas às cultivares estão dispostas em três arquivos, sendo eles: espécie; ecótipo; e cultivar. O arquivo espécie apresenta parâmetros de uma cultura específica e faz parte do desenvolvimento e calibração do modelo principal. O arquivo ecótipo abrange parâmetros que definem características únicas de um grupo de cultivares, e geralmente, não mudam entre as cultivares similares. Recomenda-se que esses dois arquivos não sejam alterados pelo usuário. Por outro lado, o arquivo cultivar, que inclui alguns parâmetros comuns a todas as cultivares, como área foliar específica, interceptação da radiação solar e tempo térmico entre o surgimento do primeiro capulho e a maturidade fisiológica, deve ser alterado de acordo com a cultivar utilizada, com base em um conjunto de dados experimentais (HOOGENBOOM et al., 2017; PATHAK et al., 2007, 2012; THORP et al., 2014).

O modelo CROPGRO-*Cotton* é um dos mais utilizados para simulação de produtividade da cultura do algodoeiro no mundo (ADHIKARI et al., 2016; AMOUZOU et al., 2018; CAMMARANO et al., 2012; LI; YU; ZHAO, 2019; LOISON et al., 2017; PATHAK et al., 2007, 2012; RAHMAN et al., 2018). Esse modelo também foi utilizado para simulação de diferentes práticas de manejo, como teste de datas de semeadura e doses de nitrogênio (WAJID et al., 2014), uso da irrigação (MAUGET; LEIKER; NAIR, 2013); e na estimativa dos impactos das mudanças climáticas na fenologia (AHMAD et al., 2017; GÉRARDEAUX et al., 2013) do algodoeiro.

1.3.4.4. Modelo OzCot (APSIM)

O Simulador de Sistemas de Produção Agrícola (*Agricultural Production Systems Simulator*, APSIM) foi desenvolvido no início da década de 1990 pela agência estatal responsável pela pesquisa de sistemas de produção agrícola na Austrália, *Commonwealth Scientific and Industrial Research*

Organisation (CSIRO). A plataforma foi desenvolvida com o objetivo de simular a produção agrícola por meio da modelagem baseada em processos, sendo composta por vários módulos relacionados aos dados meteorológicos, de solo, do genótipo (cultivar) e de manejo de várias culturas de áreas temperadas e tropicais no mundo (HOLZWORTH et al., 2014; KEATING et al., 2003).

Atualmente, o APSIM encontra-se na versão *Next Generation*, mas essa ainda está sendo aprimorada para várias culturas. Na versão anterior, APSIM 7.10, encontram-se todos os módulos das culturas devidamente calibradas para alfafa, algodão, amendoim, arroz, cana-de-açúcar, canola, cevada, ervilha, eucalipto, feijão, grão de bico, milho, palma de óleo, pastagem, soja, sorgo, tremoço e trigo. O modelo da cultura do algodoeiro ainda não é abordado pelo APSIM *Next Generation*. A modelagem de produção de culturas por meio da plataforma APSIM se aproxima bem das condições reais desde que as características da cultura/cultivar e as propriedades do solo sejam bem definidos (HOLZWORTH et al., 2014).

O módulo para a cultura do algodoeiro na plataforma APSIM é baseada no modelo OzCot, sendo a linguagem de programação a C#, sucessora do Fortran, e a simulação desse modelo é realizada em escala diária (HEARN, 1994; HEARN; ROZA, 1985; THORP et al., 2014). Os primeiros modelos que tentaram simular os processos fisiológicos do algodoeiro apresentavam a abordagem de baixo para cima (*bottom up*), que dificultava o processo de suporte a decisão na produção da cultura. Para facilitar esse processo foi desenvolvido, de forma alternativa, o modelo OzCot que apresenta a abordagem de cima para baixo (*top-down*), a qual desmembra os processos produtivos o máximo necessário para fornecer informações a nível de gerenciamento (HEARN, 1994). Originalmente, esse modelo foi desenvolvido a partir do modelo de manejo de pragas SIRATAC (HEARN; ROZA, 1985; THORP et al., 2014). Esse modelo pode simular a penalização da produtividade do algodoeiro por meio dos estresses causados por água, nitrogênio e carbono (HEARN, 1994; HEARN; ROZA, 1985).

O modelo OzCot simula os processos de crescimento e desenvolvimento da cultura do algodoeiro, como fenologia, assimilação potencial do carbono, respiração, particionamento de carboidratos, componentes de produção e estresses hídricos, por nitrogênio e térmicos (THORP et al., 2014). Além disso, esse modelo simula processos atmosféricos e do solo, como evapotranspiração e balanço de água no solo baseado na abordagem de Ritchie (1972); com enfoque estático e empírico que prediz o potencial de absorção de nitrogênio e os efeitos negativos do encharcamento no solo (THORP et al., 2014).

Os dados de entrada do modelo são relativos aos dados meteorológicos, de solo, do genótipo (cultivar) e de manejo. Os dados de clima utilizados nesse modelo são: chuva; temperaturas máxima, média e mínima do ar; radiação solar global; umidade relativa média do ar;

e velocidade do vento, em escala diária. Os dados de solo incluem informações físico-hídricas, como o número de camadas do solo, as profundidades, a densidade e as texturas; a capacidade de água disponível para as plantas, a qual pode ser obtida por meio de funções de pedotransferência devidamente calibradas para a área de estudo (CAMPELO JUNIOR et al., 2014); e a água inicialmente disponível para as plantas (THORP et al., 2014). Além disso, são necessárias informações químicas do solo, como pH, concentrações de cálcio, magnésio, sódio, potássio, alumínio, boro, manganês, e o percentual de carbono orgânico.

Em relação aos dados do genótipo, o modelo OzCot necessita de informações gerais da cultura/cultivar, como temperaturas basais inferior e superior; área foliar máxima; e coeficientes de estresse hídrico e por nitrogênio em diferentes fases fenológicas. Também apresenta informações específicas de cultivares, as quais devem ser calibradas, tais como: percentual de fibras; índice de área foliar; e tempo térmico do ciclo e das fases fenológicas. Com relação ao manejo da cultura, o modelo exige as seguintes informações: cultivar utilizada; data de semeadura; profundidade de semeadura; espaçamento entre linhas; densidade populacional; quantidade e volume de irrigação; uso de fertilizantes; e uso de cobertura morta (THORP et al., 2014).

Os principais resultados gerados pelo modelo OzCot incluem as estimativas de produtividade de fibras e do algodão em caroço, datas do início da ocorrência de distintas fases fenológicas, IAF máximo, uso do nitrogênio e métricas relativas ao balanço hídrico, como eficiência do uso da água pela cultura (THORP et al., 2014).

O modelo OzCot vem sendo utilizado para simulação da produtividade do algodoeiro na Austrália (BRAUNACK; BANGE; JOHNSTON, 2012; WILLIAMS et al., 2015) e na China (YANG et al., 2014), onde se avaliou a produtividade em condição irrigada (BRAUNACK; BANGE; JOHNSTON, 2012), assim como em condições de mudanças climáticas, tanto nas regiões tradicionais de produção quanto em regiões com potencial de expansão para o algodoeiro (LUO et al., 2016; WILLIAMS et al., 2015; YANG et al., 2014).

1.3.4.5. Abordagem multi-modelos

A simulação da produtividade de culturas agrícolas tem sido feita com a utilização de modelos de forma individualizada (ANDREA et al., 2018; BATTISTI et al., 2020; BOSI et al., 2020; MEIRELES et al., 2003; MONTEIRO et al., 2017; MONTEIRO; SENTELHAS, 2017; SENTELHAS et al., 2015; VISSÉS; SENTELHAS; PEREIRA, 2018), devido à praticidade dessa abordagem. Entretanto, dada as diferentes estruturas e parâmetros considerados pelos modelos de simulação de culturas, as produtividades estimadas têm apresentado resultados distintos. Com o

intuito de melhorar a precisão e a acurácia das estimativas de produtividade e de se reduzir as incertezas associadas à utilização desses modelos, estudos recentes tem sugerido o uso da abordagem multi-modelos, o que implica em se usar diferentes modelos de simulação de culturas e, posteriormente, se utilizar a combinação (*ensemble*) dos resultados desses para as análises dos impactos da variabilidade e das mudanças climáticas na produtividade das culturas (ASSENG et al., 2013). A abordagem multi-modelos vem sendo utilizada na estimativa do *yield gap* de algumas culturas no Brasil, como a cana-de-açúcar (DIAS; SENTELHAS, 2018), o milho (DUARTE, 2018), e na sucessão soja-milho (NÓIA JÚNIOR; SENTELHAS, 2020). Estudos baseados na abordagem de multi-modelos para a cultura do algodoeiro ainda são inexistentes no Brasil, sendo, assim, um tema a ser amplamente abordado, especialmente quando se quer entender a respeito dos impactos do clima na produtividade do algodoeiro, tanto nos cenários atuais quanto futuros.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, P. et al. Calibration and validation of CSM-CROPGRO-Cotton model using lysimeter data in the Texas High Plains. **Journal of Contemporary Water Research & Education**, v. 162, p. 61–78, 2017.
- ADHIKARI, P. et al. Simulating future climate change impacts on seed cotton yield in the Texas High Plains using the CSM-CROPGRO-Cotton model. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 317–330, 2016.
- AGGARWAL, P. K. et al. **Global theme on agroecosystems: Quantification of yield gaps in rainfed rice, wheat, cotton and mustard in India**. Andhra Pradesh: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 2008.
- AHMAD, S. et al. Quantification of climate warming and crop management impacts on cotton phenology. **Plants**, v. 6, n. 7, p. 1–16, 2017.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998.
- ALVES, L. R. A.; LIMA, F. F.; FERREIRA FILHO, J. B. DE S. Aspectos econômicos. In: BORÉM, A.; FREIRE, E. C. (Eds.). **Algodão: Do plantio a colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2014. p. 9–30.
- AMOUZOU, K. A. et al. CROPGRO-Cotton model for determining climate change impacts on yield, water- and N- use efficiencies of cotton in the Dry Savanna of West Africa. **Agricultural Systems**, v. 165, p. 85–96, 2018.

- ANAPALLI, S. S. et al. Quantifying evapotranspiration and crop coefficients for cotton (*Gossypium hirsutum* L.) using an eddy covariance approach. **Agricultural Water Management**, v. 233, p. 106091, 2020.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. DE et al. Zoneamento de aptidão climática para o algodoeiro herbáceo no estado do Piauí. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 2, p. 175–184, 2009.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. DE et al. **Zoneamento de risco climático para as culturas de algodão e feijão-caupi consorciadas no estado do Piauí**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2010.
- ANDREA, M. C. S. et al. Variability and limitations of maize production in Brazil: Potential yield, water-limited yield and yield gaps. **Agricultural Systems**, v. 165, p. 264–273, 2018.
- ANDRIOLI, K. G.; SENTELHAS, P. C. Brazilian maize genotypes sensitivity to water deficit estimated through a simple crop yield model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 7, p. 653–660, 2009.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2019.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2020.
- ASLAM, M. Agricultural productivity current scenario, constraints and future prospects in Pakistan. **Sarhad Journal of Agriculture**, v. 32, n. 4, p. 289–303, 2016.
- ASSENG, S. et al. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 827–832, 2013.
- ATKIN, O. K.; MACHEREL, D. The crucial role of plant mitochondria in orchestrating drought tolerance. **Annals of Botany**, v. 103, p. 581–597, 2009.
- BARBIERI, V.; TUON, R. L. **Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas culturas**. Piracicaba: DFM/ESALQ/USP, 1992.
- BARROS, A. C. et al. Utilização do modelo ZAE/FAO para a estimativa da produtividade do sorgo em Alagoas. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 3, p. 705–714, 2016.
- BATTISTI, R. et al. Assessment of soybean yield with altered water-related genetic improvement traits under climate change in Southern Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 83, p. 1–14, 2017.
- BATTISTI, R. et al. Rules for grown soybean-maize cropping system in Midwestern Brazil: Food production and economic profits. **Agricultural Systems**, v. 182, p. 102850, 2020.

- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Drought tolerance of brazilian soybean cultivars simulated by a simple agrometeorological yield model. **Experimental Agriculture**, v. 51, n. 2, p. 285–298, 2015.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G. Eficiência agrícola da produção de soja, milho e trigo no estado do Rio Grande do Sul entre 1980 e 2008. **Ciência Rural**, v. 42, n. 1, p. 24–30, 2012.
- BELTRÃO, N. E. DE M. Fisiologia da produção do algodoeiro. **Circular Técnica**, p. 1–8, 2006.
- BELTRÃO, N. E. DE M. et al. Zoneamento agroclimático do algodoeiro no Cerrado brasileiro. In: FREIRE, E. C. (Ed.). **Algodão no Cerrado do Brasil**. 3a ed. Brasília: Gráfica e Editora Positiva, 2015. p. 39–63.
- BELTRÃO, N. E. DE M.; SOUZA, J. G. Fitologia do algodoeiro herbáceo: Sistemática, organografia e anatomia. In: BELTRÃO, N. E. DE M.; AZEVEDO, D. M. P. DE (Eds.). **O agronegócio do algodão no Brasil**. 2a ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 181–218.
- BEZERRA, B. G. et al. Evapotranspiration and crop coefficient for sprinkler-irrigated cotton crop in Apodi Plateau semiarid lands of Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 86–93, 2012.
- BEZERRA, J. R. C.; BARRETO, A. N.; LUZ, M. J. DA S. E. **Caracterização físico-hídrica dos solos da área experimental da Embrapa Algodão em São Gonçalo, PB**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 1998.
- BOSI, C. et al. CROPGRO-Perennial Forage model parameterization for simulating Piatã palisade grass growth in monoculture and in a silvopastoral system. **Agricultural Systems**, v. 177, p. 102724, 2020.
- BRAUNACK, M. V.; BANGE, M. P.; JOHNSTON, D. B. Can planting date and cultivar selection improve resource use efficiency of cotton systems? **Field Crops Research**, v. 137, p. 1–11, 2012.
- CAMMARANO, D. et al. Agronomic and economic evaluation of irrigation strategies on cotton lint yield in Australia. **Crop and Pasture Science**, v. 63, n. 7, p. 647, 2012.
- CAMPELO JUNIOR, J. H. et al. Estimativa da retenção de água em Latossolos do Cerrado mato-grossense cultivados com algodão. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 8, n. 3, p. 318–326, 2014.
- CAVALERI, P. A.; INFORZATO, R. Estudo do sistema radicular do algodoeiro nos três principais tipos de solo do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 15, n. 24, p. 337–346, 1956.

- CHASTAIN, D. R. et al. Water deficit in field-grown *Gossypium hirsutum* primarily limits net photosynthesis by decreasing stomatal conductance, increasing photorespiration, and increasing the ratio of dark respiration to gross photosynthesis. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, n. 17, p. 1576–1585, 2014.
- CHIAVEGATO, E. J.; CÂMARA, G. M. DE S. **Algodão – Fenologia: Guia de fases de desenvolvimento**. Paulínia: Stoller do Brasil Ltda. (Divisão Arbore), 2001.
- CHIAVEGATO, E. J.; SALVATIERRA, D. K. DE; GOTTARDO, L. C. B. Algodão. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Ed.). **Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. 1a ed. Brasília: INMET, 2009. p. 33–49.
- CONSTABLE, G. A.; BANGE, M. P. The yield potential of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Field Crops Research**, v. 182, p. 98–106, 2015.
- COSTA, P. M. C. et al. Yield response factor to water (Ky) of FMX 993, FMT 701 and FMX 910 cotton varieties in Campo Verde, MT. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 39, n. 4, p. 1–8, 2019.
- DE WIT, C. T. Photosynthesis of leaf canopies. **Agriculture Research Report No. 663**. Wageningen: Wageningen University, 1965.
- DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. **Science of The Total Environment**, v. 637–638, p. 1127–1136, 2018.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper No. 33**. Roma, Italy: FAO, 1979.
- DUARTE, Y. C. N. **Modelos de simulação da cultura do milho: Uso na determinação das quebras de produtividade (yield gaps) e na previsão de safra da cultura no Brasil**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2018.
- ECHER, F. R.; ROSOLEM, C. A. Cotton yield and fiber quality affected by row spacing and shading at different growth stages. **European Journal of Agronomy**, v. 65, p. 18–26, 2015.
- ELLI, E. F. et al. Global sensitivity-based modelling approach to identify suitable *Eucalyptus* traits for adaptation to climate variability and change. **in silico Plants**, v. 2, n. 1, 2020.
- ELUM, Z. A.; SEKAR, C. An empirical study of yield gap in seed cotton production in Tamil Nadu state, India. **Indian Journal of Agricultural Research**, v. 49, n. 6, p. 549–553, 2015.
- EVETT, S. R. et al. Cotton. In: STEDUTO, P. et al. (Eds.). Crop yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper No 66**. Roma, Italy: FAO, 2012. p. 150–161.
- FAO. **FAOSTAT**. 2020. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat>>. Acesso em: 5 fev. 2021.

- 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.
- FREIRE, E. C. Fatores que afetam a qualidade das fibras. In: FREIRE, E. C. (Ed.). **Algodão no Cerrado do Brasil**. 3a ed. Brasília: Gráfica e Editora Positiva, 2015. p. 751–766.
- GARCÍA-VILA, M. et al. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 477–487, 2009.
- GEORGES, P. **Le cotonnier et ses produits**. Paris: Maisonneuve et Larose, 1982.
- GÉRARDEAUX, E. et al. Positive effect of climate change on cotton in 2050 by CO₂ enrichment and conservation agriculture in Cameroon. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, n. 3, p. 485–495, 2013.
- GIJSMAN, A. J. et al. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter–residue module from CENTURY. **Agronomy Journal**, v. 94, n. 3, p. 462, 2002.
- GODWIN, D. C.; SINGH, U. Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems. In: TSUJI, G. Y. (Ed.). **Understanding Options for Agricultural Production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 55–77.
- GRUNDY, P. R.; YEATES, S. J.; BELL, K. L. Cotton production during the tropical monsoon season. I – The influence of variable radiation on boll loss, compensation and yield. **Field Crops Research**, v. 254, p. 107790, 2020.
- HEARN, A. B. OZCOT: A simulation model for cotton crop management. **Agricultural Systems**, v. 44, n. 3, p. 257–299, 1994.
- HEARN, A. B.; ROZA, G. D. DA. A simple model for crop management applications for cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Field Crops Research**, v. 12, p. 49–69, 1985.
- HIMANSHU, S. K. et al. Evaluation of crop-growth-stage-based deficit irrigation strategies for cotton production in the Southern High Plains. **Agricultural Water Management**, v. 225, p. 105782, 2019.
- HOCHMAN, Z. et al. Quantifying yield gaps in rainfed cropping systems: A case study of wheat in Australia. **Field Crops Research**, v. 136, p. 85–96, 2012.
- HOLZWORTH, D. P. et al. APSIM - Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 327–350, 2014.
- HOOGENBOOM, G. et al. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]**. Honolulu: University of Hawaii, 2012.
- HOOGENBOOM, G. et al. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7 (www.DSSAT.net)**. Gainesville: DSSAT Foundation, 2017.

- HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using Soygro, Pnutgro, and Beangro: A review. **Transactions of the ASAE**, v. 35, n. 6, p. 2043–2056, 1992.
- HSIAO, T. C. et al. 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. et al. AquaCrop parameterization, calibration, and validation guide. In: STEDUTO, P. et al. (Eds.). Crop yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper No 66**. Roma, Italy: FAO, 2012. p. 70–87.
- HUNT, L.; WHITE, J.; HOOGENBOOM, G. Agronomic data: Advances in documentation and protocols for exchange and use. **Agricultural Systems**, v. 70, n. 2–3, p. 477–492, 2001.
- HUSSEIN, F.; JANAT, M.; YAKOUB, A. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 4, p. 1319–1330, 2011.
- IBGE. **Produção Agrícola Municipal 2019**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.
- JONES, J. W. et al. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 235–263, 2003.
- JOSÉ, J. V. et al. Quantification of cotton water consumption by remote sensing. **Geocarto International**, v. 35, n. 16, p. 1800–1813, 2020.
- KASSAM, A. H. **Net biomass production and yield crops**. Roma, Italy: FAO, 1977.
- KEATING, B. A. et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 267–288, 2003.
- KOHEL, R. J.; LEWIS, C. F. **Cotton**. Madison: American Society of Agronomy, 1993.
- LI, F.; YU, D.; ZHAO, Y. Irrigation scheduling optimization for cotton based on the AquaCrop model. **Water Resources Management**, v. 33, p. 39–55, 2019.
- LIMA, T. C.; AQUINO, L. Â. DE; BERGER, P. G. Botânica. In: BORÉM, A.; FREIRE, E. C. (Eds.). **Algodão: Do plantio a colheita**. 1a ed. Viçosa: UFV, 2014. p. 49–66.
- LINKER, R. et al. Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: A simulation study with cotton, potato and tomato. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 236–243, 2016.
- LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, n. 1, p. 179–204, 2009.
- LOISON, R. et al. Designing cotton ideotypes for the future: Reducing risk of crop failure for low input rainfed conditions in Northern Cameroon. **European Journal of Agronomy**, v. 90, p. 162–173, 2017.

- LOKA, D. A.; OOSTERHUIS, D. M.; RITCHIE, G. L. Water-deficit stress in cotton. In: OOSTERHUIS, D. M. (Ed.). **Stress physiology in cotton**. Cordova: The Cotton Foundation, 2011. p. 37–72.
- LOKA, D. A.; OOSTERHUIS, D. M. Water stress and reproductive development in cotton. In: OOSTERHUIS, D. M.; COTHREN, J. T. (Eds.). **Flowering and fruiting in cotton**. Candova: The Cotton Foundation, 2012. p. 51–58.
- LUO, Q. et al. Effectiveness of agronomic practices in dealing with climate change impacts in the Australian cotton industry – A simulation study. **Agricultural Systems**, v. 147, p. 1–9, 2016.
- MAGALHAES, A. C. et al. Desenvolvimento do sistema radicular do algodoeiro na camada arável do solo. **Bragantia**, v. 21, n. 3, p. 21–30, 1962.
- MARUR, C. J.; RUANO, O. A reference system for determination of developmental stages of upland cotton. **Revista de Oleaginosas e Fibras**, v. 5, n. 2, p. 313–317, 2001.
- MAUGET, S.; LEIKER, G.; NAIR, S. A web application for cotton irrigation management on the U.S. Southern High Plains. Part I: Crop yield modeling and profit analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 248–257, 2013.
- MCARTHUR, J. A.; HESKETH, J. D.; BAKER, D. N. Cotton. In: EVANS, L. T. (Ed.). **Crop physiology: Some case histories**. [s.l.] Cambridge University Press, 1976. p. 297–325.
- MEIRELES, E. J. L. et al. Risco climático de quebra de produtividade da cultura do feijoeiro em Santo Antônio de Goiás, GO. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 163–171, 2003.
- MONTEIRO, J. E. B. DE A. et al. Rice yield estimation based on weather conditions and on technological level of production systems in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 2, p. 123–131, 2013.
- MONTEIRO, J. E. B. DE A. et al. Modeling of corn yield in Brazil as a function of meteorological conditions and technological level. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 3, p. 137–148, 2017.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Calibration and testing of an agrometeorological model for the estimation of soybean yields in different Brazilian regions. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 3, p. 265–272, 2014.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap: Can it be determined at national level with a simple agrometeorological model? **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 3, p. 272–284, 2017.
- NACHIMUTHU, G.; WEBB, A. A. Closing the biotic and abiotic stress-mediated yield gap in cotton by improving soil management and agronomic practices. In: **Plant tolerance to individual and concurrent stresses**. New Delhi: Springer India, 2017. p. 17–31.

- NÓIA JÚNIOR, R. DE S.; SENTELHAS, P. C. Yield gap of the double-crop system of main-season soybean with off-season maize in Brazil. **Crop and Pasture Science**, v. 71, n. 5, p. 445, 2020.
- OOSTERHUIS, D. M. Growth and development of the cotton plant. In: MILEY, W. N.; OOSTERHUIS, D. M. (Eds.). **Nitrogen nutrition of cotton: Practical issues: Proceedings of first annual workshop for practicing agronomists**. Madison: American Society of Agronomy, 1990. p. 1–24.
- OOSTERHUIS, D. M. Yield response to environmental extremes in cotton. In: OOSTERHUIS, D. M. (Ed.). **Proceedings of the 1999. Cotton research meeting and summaries of cotton research in progress**. Report 193. Special report / Arkansas Agricultural Experiment Station, Division of Agriculture, University of Arkansas, 0571-0189 ;204. Fayetteville, Ark.: Arkansas Agricultural Experiment Station, 1999. p. 30–38.
- OOSTERHUIS, D. M.; JERNSTEDT, J. Morphology and anatomy of the cotton plant. In: SMITH, C. W.; COTHREN, J. T. (Eds.). **Cotton: Origin, history, technology and production**. Nova Iorque: John Wiley, 1999.
- OOSTERHUIS, D. M.; SNIDER, J. L. High temperature stress on floral development and yield of cotton. In: OOSTERHUIS, D. M. (Ed.). **Stress physiology in cotton**. Cordova: The Cotton Foundation, 2011. p. 1–24.
- PASSOS, S. M. G. **Algodão**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1977.
- PATHAK, T. B. et al. Use of global sensitivity analysis for CROPGRO Cotton model development. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 6, p. 2295–2302, 2007.
- PATHAK, T. B. et al. Uncertainty analysis and parameter estimation for the CSM-CROPGRO-Cotton model. **Agronomy Journal**, v. 104, n. 5, p. 1363–1373, 2012.
- PEREIRA, A.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002.
- PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, n. 2, p. 81–92, 1972.
- QIAO, X. **Parameterization of FAO AquaCrop model for irrigated cotton in the humid southeast - US**. [s.l.] Clemson University, 2012.
- RAES, D. **A summary simulation model of the water budget of a cropped soil**. [s.l.] K.U. Leuven University, 1982.
- RAES, D. et al. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. **Agricultural Water Management**, v. 81, n. 3, p. 335–357, 2006.

- RAES, D. et al. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 438–447, 2009.
- RAHMAN, M. H. UR et al. Multi-model projections of future climate and climate change impacts uncertainty assessment for cotton production in Pakistan. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 253–254, p. 94–113, 2018.
- RAO, N. H.; SARMA, P. B. S.; CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 13, p. 25–32, 1988.
- REDDY, K. R.; HODGES, H. F.; REDDY, V. R. Temperature effects on cotton fruit retention. **Agronomy Journal**, v. 84, n. 1, p. 26–30, 1992.
- REDDY, V. R. et al. **Weather and cotton growth: Present and future**. [s.l.] Office of Agricultural Communications, Division of Agriculture, Forestry, and Veterinary Medicine, Mississippi State University, 1996.
- REDDY, V. R.; BAKER, D. N.; HODGES, H. F. Temperature effects on cotton canopy growth, photosynthesis, and respiration. **Agronomy Journal**, v. 83, n. 4, p. 699–704, 1991.
- RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, v. 8, n. 5, p. 1204–1213, 1972.
- RITCHIE, J. T. et al. Cereal growth, development and yield. In: TSUJI, G. Y. (Ed.). **Understanding Options for Agricultural Production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 79–98.
- RITCHIE, J. T. et al. Extension of an existing model for soil water evaporation and redistribution under high water content conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 3, p. 792, 2009.
- ROSOLEM, C. A. Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro. **Informações Agronômicas**, n. 95, p. 1–9, 2001.
- ROSOLEM, C. A. Exigências edafoclimáticas. In: BORÉM, A.; FREIRE, E. C. (Eds.). **Algodão: Do plantio a colheita**. 1a ed. Viçosa: Editora UFV, 2014. p. 67–89.
- ROSOLEM, C. A.; ECHER, F. R. Ecofisiologia do algodoeiro: Implicações na época de semeadura e qualidade. In: FREIRE, E. C. (Ed.). **Algodão no Cerrado do Brasil**. 3a ed. Brasília: Gráfica e Editora Positiva, 2015. p. 533–558.
- SANTOS, S. R. et al. Crescimento e produção do algodoeiro fertirrigado com água residuária sanitária no semiárido de Minas Gerais. **Irriga**, v. 21, n. 1, p. 40–57, 2016.
- SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil: Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, p. 1–18, 2015.

- SENTELHAS, P. C. et al. *Yield gap*: Conceitos, definições e exemplos. **Informações Agronômicas**, n. 155, p. 9–12, 2016.
- SESTREN, J. A.; LIMA, J. J. DE. Características e classificação da fibra de algodão. In: FREIRE, E. C. (Ed.). **Algodão no Cerrado do Brasil**. 3a ed. Brasília: Gráfica e Editora Positiva, 2015. p. 653–749.
- SILVA, E. S. et al. Zoning of water deficiency risk for conventional cotton in Mato Grosso. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 35, n. 4, p. 1–12, 2019.
- SILVA, F. D. DOS S. et al. Cenários climáticos e produtividade do algodão no nordeste do Brasil. Parte I: Calibração e validação do modelo agrometeorológico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. spe, p. 903–912, 2020.
- SILVA, L. L. et al. Influência das precipitações na produtividade agrícola no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 454–461, 2009a.
- SILVA, P. S. L. et al. Weed control via intercropping with gliricidia. I. Cotton crop. **Planta Daninha**, v. 27, n. 1, p. 97–104, 2009b.
- SMITH, M. CROPWAT – A computer program for irrigation planning and management. **Irrigation and Drainage Paper No. 46**. Roma, Italy: FAO, 1992.
- SNOWDEN, M. C. et al. Timing of episodic drought can be critical in cotton. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 452–458, 2014.
- SOARES, L. C. DA S. **Efeito da temperatura e chuva sobre a qualidade da fibra e produtividade de algodão no estado de Mato Grosso**. [s.l.] Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2015.
- STEDUTO, P. et al. 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.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 6a ed. Porto Alegre: Artmed, 2016.
- TAKIZAWA, E. K. Manejo da cultura do algodão no Cerrado. In: FREIRE, E. C. (Ed.). **Algodão no Cerrado do Brasil**. 3a ed. Brasília: Gráfica e Editora Positiva, 2015. p. 203–239.
- TAN, S. et al. Performance of AquaCrop model for cotton growth simulation under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang, China. **Agricultural Water Management**, v. 196, p. 99–113, 2018.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955.
- THORP, K. R. et al. Development and application of process-based simulation models for cotton production: A review of past, present, and future directions. **The Journal of Cotton Science**, v. 18, p. 10–47, 2014.

- TSAKMAKIS, I. D. et al. Evaluation of AquaCrop model simulations of cotton growth under deficit irrigation with an emphasis on root growth and water extraction patterns. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 419–432, 2019.
- VAN ITTERSUM, M. K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance: A review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013.
- VAN ITTERSUM, M. K.; RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. **Field Crops Research**, v. 52, p. 197–208, 1997.
- VANUYTRECHT, E. et al. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 351–360, 2014.
- VISSES, F. A.; SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. B. Yield gap of cassava crop as a measure of food security – An example for the main Brazilian producing regions. **Food Security**, v. 10, n. 5, p. 1191–1202, 2018.
- WAJID, A. et al. Modeling growth, development and seed-cotton yield for varying nitrogen increments and planting dates using DSSAT. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 51, n. 3, p. 639–647, 2014.
- WANJURA, D. F.; BUXTON, D. R. Hypocotyl and radicle elongation of cotton as affected by soil environment. **Agronomy Journal**, v. 64, n. 4, p. 431–434, 1972.
- WARADE, S. et al. Yield gap analysis in cotton of Akola District. **Journal of Social and Economic Development**, v. 12, n. 1, p. 71–81, 2010.
- WELLS, R. Light and the cotton plant. In: OOSTERHUIS, D. M. (Ed.). **Stress physiology in cotton**. Cordova: The Cotton Foundation, 2011. p. 73–83.
- WILLIAMS, A. et al. Quantifying the response of cotton production in eastern Australia to climate change. **Climatic Change**, v. 129, n. 1–2, p. 183–196, 2015.
- YANG, Y. et al. Prediction of cotton yield and water demand under climate change and future adaptation measures. **Agricultural Water Management**, v. 144, p. 42–53, 2014.
- ZONTA, J. H. et al. Cotton response to water deficits at different growth stages. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 4, p. 980–990, 2017.

2. TOLERÂNCIA DE CULTIVARES BRASILEIRAS DE ALGODÃO À SECA, SIMULADA POR MEIO DE UM MODELO AGROMETEOROLÓGICO

RESUMO

A cultura do algodoeiro apresenta certo nível de tolerância à seca, no entanto, o déficit hídrico quando excessivo pode causar perdas expressivas de produtividade. Uma alternativa de manejo para minimizar essas perdas é o uso de cultivares tolerantes à seca. Sendo assim, este estudo teve como objetivo calibrar e validar um modelo agrometeorológico simples para estimativa da produtividade de 26 cultivares brasileiras de algodão e, por meio do índice de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky), identificar grupos homogêneos de cultivares com diferentes níveis de tolerância à seca. Os dados de produtividade das cultivares de algodoeiro utilizados na calibração e validação do modelo foram obtidos junto aos ensaios de competição de cultivares conduzidos pela empresa Tropical Melhoramento & Genética (TMG), em cinco localidades do estado do Mato Grosso e uma localidade no estado da Bahia, entre as safras de 2011/2012 e 2018/2019, e em três diferentes épocas de semeadura, todas conduzidas em ótimas condições de manejo da cultura. Os dados meteorológicos dos ensaios foram obtidos por estações automáticas instaladas nas áreas experimentais. O modelo Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO) foi utilizado para estimar as produtividades potencial e atingível do algodoeiro, com valores de Ky calibrados para cada uma das 26 cultivares. Os valores de Ky obtidos nas fases reprodutivas da cultura foram submetidos à análise de agrupamentos. O desempenho do modelo após a calibração foi ótimo com erro médio de $-159,40 \text{ kg ha}^{-1}$ e erro absoluto médio de $344,39 \text{ kg ha}^{-1}$, correspondendo a 8,0% em relação às produtividades observadas. Os valores de Ky nas fases fenológicas mais críticas da cultura (florescimento e formação dos frutos) permitiram identificar a existência de cinco grupos de cultivares com diferentes tolerâncias à seca: muito baixa (MB); baixa (B); média (M); alta (A); e muito alta (MA). Esses grupos apresentaram os seguintes valores de Ky: florescimento (MB de 0,50 a 0,65; B de 0,45 a 0,65; M de 0,42 a 0,65; A de 0,42 a 0,57; e MA de 0,49 a 0,51); e formação dos frutos (MB de 0,90 a 0,98; B de 0,83 a 0,85; M de 0,75 a 0,79; A de 0,71 a 0,72; e MA de 0,61 a 0,65). Com base nos valores de Ky calibrados, conclui-se que o modelo empregado foi capaz de identificar as diferenças de tolerância à seca entre 26 cultivares brasileiras de algodão, informação essa de grande importância para subsidiar a seleção das melhores delas para cada ambiente de produção e data de semeadura.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L., Índice de sensibilidade ao déficit hídrico, Modelo Zona Agroecológica-FAO, Balanço hídrico

TOLERANCE OF BRAZILIAN COTTON CULTIVARS TO DROUGHT, SIMULATED BY AN AGROMETEOROLOGICAL MODEL

ABSTRACT

Cotton crop presents a certain level of tolerance to drought; however, the water deficit when excessive can cause expressive yield losses. An alternative management to minimize such losses is the use of drought-tolerant cultivars. Therefore, this study aimed to calibrate and evaluate a simple agrometeorological model for yield estimation of 26 Brazilian cotton cultivars and, using the water deficit sensitivity index (Ky), to identify homogeneous groups of cultivars with different levels of drought tolerance. Cotton yield data from the cultivars used in the calibration and evaluation of the crop model were obtained from the cultivar competition trials conducted by *Tropical Melhoramento & Genética* (TMG) company, in five locations in the state of Mato Grosso and one in the state of Bahia, between the 2011/2012 and 2018/2019 growing seasons, and in three different sowing dates, all of them conducted under optimum crop management conditions. The meteorological data over the trials were obtained by automatic weather stations installed in the experimental areas. The FAO Agroecological

Zone model (AZM-FAO) was used to estimate the cotton potential and attainable yields, with K_y values calibrated for each one of the 26 cultivars. K_y values obtained in the reproductive phases of the crop were analyzed using cluster analysis. The model's performance after calibration was excellent with a mean error of $-159.40 \text{ kg ha}^{-1}$ and an average absolute error of $344.39 \text{ kg ha}^{-1}$, corresponding to 8.0% in relation to the observed yield. The K_y values in the most critical phenological phases of the crop (flowering and fruit formation) allowed to identify the existence of five groups of cultivars with different drought tolerances: very low (VL); low (L); medium (M); high (H); and very high (VH). These groups presented the following range of K_y values: flowering (VL from 0.50 to 0.65; L from 0.45 to 0.65; M from 0.42 to 0.65; H from 0.42 at 0.57; and VH from 0.49 at 0.51) and fruit formation (VL from 0.90 to 0.98; L from 0.83 to 0.85; M from 0.75 to 0.79; H from 0.71 to 0.72; and VH from 0.61 to 0.65). Based on the particularly good performance of the calibrated AZM-FAO to estimate cotton yield based on K_y values, we conclude that the referred model was able to identify drought-tolerance differences between 26 Brazilian cotton cultivars, which is an important information to subsidize the choice of the best ones for each production environment and sowing date.

Keywords: *Gossypium hirsutum* L., Water deficit sensitivity index, FAO Agroecological Zone Model, Water balance

2.1. Introdução

A cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) é responsável pela produção de 90% do algodão no mundo, e representa importante fonte de fibras, alimentos e de matéria-prima para a produção de biodiesel (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; THORP et al., 2014). Atualmente, o Brasil é o quarto maior produtor de algodão em caroço (pluma e caroço) do mundo e o segundo maior exportador de fibras de algodão (ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 2020; FAO, 2020). Nos últimos anos, o Brasil vem se destacando devido ao aumento da produção, a qual foi decorrente do incremento da área plantada, da ordem de 262% entre 1997 e 2019, assim como da produtividade do algodão em caroço, que passou de 1323 kg ha^{-1} , em 1997, para 4236 kg ha^{-1} , em 2019, ou seja, com aproximadamente 320% de aumento (IBGE, 2020). Esse promissor cenário foi impulsionado pelo aumento do consumo e melhoria nos preços de venda, especialmente, no mercado internacional (ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 2019).

Aproximadamente 97% do algodão brasileiro é produzido nos estados do Mato Grosso, Bahia, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, sendo que apenas o estado de Mato Grosso é responsável por 67% da produção nacional. Na safra 2018/19, o Brasil produziu, em média, 6.893 mil t de algodão em caroço em uma área de 1.627 mil ha (IBGE, 2020). O cultivo do algodoeiro no Brasil se dá, predominantemente, como cultura de segunda safra (safrinha), sendo semeada logo após a colheita da soja, entre janeiro e fevereiro. Sendo assim, a parte inicial do ciclo se dá nos meses chuvosos, com boa disponibilidade de água no solo, porém boa parte do ciclo, que envolve as fases reprodutivas, se dá durante meses com redução das chuvas e baixa disponibilidade hídrica no solo, submetendo a cultura do algodoeiro a períodos de deficiências hídricas expressivas (ALVES; LIMA; FERREIRA FILHO, 2014).

Mesmo o algodoeiro apresentando certo nível de tolerância à seca quando comparado a outras culturas, dependendo da intensidade, da duração e da fase fenológica em que o déficit hídrico ocorra, este irá afetar o crescimento, o desenvolvimento, a produtividade e a qualidade das fibras (LOKA; OOSTERHUIS, 2012; ROSOLEM, 2001; ZONTA et al., 2017). Além disso, o algodoeiro também é sensível às temperaturas baixas ou muito elevadas (ROSOLEM, 2001; SILVA et al., 2009a; SOARES, 2015), o que compromete a taxa de fotossíntese líquida, levando a perdas de produtividade. Uma alternativa de manejo para minimizar essas perdas é o uso de cultivares mais bem adaptadas às regiões de cultivo, especialmente aquelas com maior tolerância à seca e às altas temperaturas, condições comuns nas regiões produtoras do Centro-Oeste e Nordeste do Brasil.

O índice de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y) tem-se mostrado eficiente como um indicador de tolerância à seca em cultivares de culturas agrícolas, como observado para a cultura do milho (ANDRIOLI; SENTELHAS, 2009) e da soja (BATTISTI; SENTELHAS, 2015). Esse índice é obtido por meio de um modelo simples de produtividade agrícola, denominado modelo Zona Agroecológica-FAO (KASSAM, 1977), que estima a produtividade potencial (PP) das culturas e, posteriormente, penaliza esta pelo déficit hídrico de cada fase de desenvolvimento da cultura, obtendo-se a produtividade atingível (PA) (DOORENBOS; KASSAM, 1979; RAO; SARMA; CHANDER, 1988). Sendo assim, o K_y expressa a relação entre a quebra relativa de produtividade ($1 - PA/PP$) e a deficiência hídrica relativa ($1 - E_{Tr}/E_{Tc}$), sendo a E_{Tr} a evapotranspiração real e a E_{Tc} a evapotranspiração máxima da cultura.

Em pesquisas realizadas no Brasil, Andrioli e Sentelhas (2009) identificaram dois grupos de sensibilidade à seca em cultivares de milho, segmentados em tolerância normal e alta tolerância. Já Battisti e Sentelhas (2015) determinaram quatro grupos de tolerância à seca para cultivares de soja (baixa, média-baixa, média-alta e alta). Em ambos os estudos foram considerados como fator de definição dos agrupamentos, os valores de K_y nas fases fenológicas mais sensíveis ao déficit hídrico, que ocorre na fase reprodutiva, já que esses valores eram mais elevados em relação às demais fases fenológicas, com os valores de K_y sendo inversamente proporcionais à tolerância à seca.

Considerando-se que o K_y é um importante indicador de sensibilidade das culturas agrícolas ao déficit hídrico, especialmente nas fases reprodutivas, e que este pode ser empregado para identificar cultivares com maior tolerância à seca, o objetivo deste estudo foi calibrar e validar o modelo Zona Agroecológica-FAO (MZA-FAO) para 26 cultivares brasileiras de algodão, empregando-se dados de seis safras e três épocas de semeadura, e por meio deste identificar grupos homogêneos de cultivares para a tolerância à seca, visando, assim, gerar informações que sejam relevantes para os produtores na seleção das melhores cultivares para cada ambiente de produção

e época de semeadura, de modo a reduzir as quebras de produtividade (*yield gaps*) provocadas pela deficiência hídrica, especialmente, nas fases de florescimento e formação dos frutos.

2.2. Material e métodos

2.2.1. Dados de produtividade da cultura do algodoeiro

Os dados de produtividade do algodoeiro herbáceo (em caroço) foram obtidos junto aos ensaios de competição de cultivares conduzidos pela empresa Tropical Melhoramento & Genética (TMG), em cinco localidades do estado do Mato Grosso: Campo Novo do Parecis ($14^{\circ}15'55''$ S; $58^{\circ}00'17''$ W; altitude: 664 m); Campo Verde ($15^{\circ}26'15''$ S; $54^{\circ}25'26''$ W; altitude: 625 m); Pedra Preta ($16^{\circ}50'23''$ S; $54^{\circ}02'39''$ W; altitude: 740 m); Sapezal ($13^{\circ}28'58''$ S; $58^{\circ}54'34''$ W; altitude: 570 m); e Sorriso ($12^{\circ}26'33''$ S; $55^{\circ}39'20''$ W; altitude: 414 m); e Luís Eduardo Magalhães ($13^{\circ}24'31''$ S; $46^{\circ}5'51''$ W; altitude: 927 m) (Figura 2.1), na Bahia, durante as safras de 2011/2012 a 2018/2019, em três épocas de semeadura, entre dezembro e fevereiro, considerando-se 26 cultivares brasileiras de algodão (Tabela 2.1).

Figura 2.1. Localidades dos estados do Mato Grosso e da Bahia empregadas no presente estudo.

Tabela 2.1. Cultivares de algodoeiro utilizadas no presente estudo, com seus respectivos ciclos, empresa detentora e tecnologias de resistência a herbicidas e lagartas.

Cultivar	Classificação do Ciclo	Empresa	Resistência a herbicidas	Resistência a lagartas
DP1240B2RF ⁽¹⁾	Precoce	Deltapine	RF	Bt2
DP1243B2RF ⁽¹⁾	Médio	TMG	RF	Bt2
DP1536B2RF ⁽¹⁾	Médio-precoces	Deltapine	RF	Bt2
DP1648B2RF ⁽¹⁾	Médio	Deltapine	RF	Bt2
DP1746B2RF ⁽¹⁾	Tardio	Deltapine	RF	Bt2
FM940GLT ⁽¹⁾	Médio	BASF	GL	Bt
FM944GL ⁽¹⁾	Médio	BASF	GL	-
FM951LL ⁽¹⁾	Médio	Bayer	LL	-
FM954GLT ⁽¹⁾	Médio	BASF	GL	Bt
FM975WS ⁽¹⁾	Tardio	BASF	LL	WS
FM980GLT ⁽¹⁾	Tardio	Bayer	GL	Bt
FM983GLT ⁽¹⁾	Tardio	BASF	GL	Bt
FMT701 ⁽²⁾	Tardio	FMT	-	-
FMT705 ⁽²⁾	Médio	FMT	-	-
FMT707 ⁽²⁾	Médio	FMT	-	-
FMT709 ⁽²⁾	Tardio	FMT	-	-
IMA8405GLT ⁽¹⁾	Tardio	IMA	GL	Bt
TMG41WS ⁽¹⁾	Médio	TMG	LL	WS
TMG42WS ⁽¹⁾	Médio-precoces	TMG	LL	WS
TMG43WS ⁽¹⁾	Médio-precoces	TMG	LL	WS
TMG44B2RF ⁽¹⁾	Médio-precoces	TMG	RF	Bt2
TMG45B2RF ⁽¹⁾	Médio	TMG	RF	Bt2
TMG46B2RF ⁽¹⁾	Médio	TMG	RF	Bt2
TMG47B2RF ⁽¹⁾	Médio-tardio	TMG	RF	Bt2
TMG81WS ⁽¹⁾	Tardio	TMG	LL	WS
TMG82WS ⁽¹⁾	Médio-tardio	TMG	LL	WS

⁽¹⁾ Cultivar geneticamente modificada; ⁽²⁾ Cultivar convencional. FMT = Fundação Mato Grosso; IMA = Instituto Mato-Grossense do Algodão; TMG = Tropical Melhoramento & Genética. Tecnologia de transgenia aplicadas na cultura do algodoeiro: GLT = Glytol® Twinlink® Libertylink® (tolerância aos herbicidas Liberty® e Glifosato); GL = Glytol® (resistência ao Glifosato); LL = Libertylink® (manejo de plantas daninhas); WS = WideStrike® (resistência às lagartas); B2RF = Bollgard II Roundup Ready Flex® (resistência às lagartas e ao Roundup).

Fonte: BASF (2020); BAYER (2019); DELTAPINE (2020); FMT (2019); IMAMT (2019); TMG (2020).

2.2.2. Informações dos solos das áreas experimentais

As informações dos solos das áreas experimentais foram disponibilizadas pela empresa TMG. Os solos foram classificados como Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) conforme Santos et al. (2018). As características granulométricas desses solos são apresentadas na Tabela 2.2. A capacidade de água disponível (CAD) dos solos foi obtida por meio de funções de pedotransferência, devidamente calibradas para os locais de estudo (CAMPELO JUNIOR et al., 2014). A profundidade efetiva do sistema radicular foi considerada como sendo de 0,40 m (ANDRADE JÚNIOR et al., 2010; SANTOS et al., 2016; SILVA et al., 2009b). A densidade global

do solo foi estimada conforme sua textura, sendo o mesmo valor para todos os locais, igual a $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ (LIBARDI, 2012).

Tabela 2.2. Características granulométricas (areia, silte e argila), texturais e físico-hídricas (CC, PMP e CAD) dos solos das diferentes áreas experimentais, nos estados do Mato Grosso e da Bahia.

Local	Areia	Silte	Argila	Textura	CC	PMP	CAD
		%				%	mm
Campo Novo do Parecis, MT	25,5	9,6	64,9	Argilosa	25,8	17,1	42
Campo Verde, MT	22,8	10,1	67,1	Argilosa	26,6	17,9	42
Luís Eduardo Magalhães, BA	27,5	8,9	63,6	Argilosa	25,1	16,4	42
Pedra Preta, MT	27,5	8,9	63,6	Argilosa	25,1	16,4	42
Sapezal, MT	27,5	8,9	63,6	Argilosa	25,1	16,4	42
Sorriso, MT	34,3	6,8	58,8	Argilosa	23,1	14,4	42

CC = conteúdo de água na capacidade de campo; PMP = conteúdo de água no ponto de murcha permanente; CAD = capacidade de água disponível no solo; MT = Mato Grosso; BA = Bahia.

Fonte: TMG.

Os dados de solos foram fornecidos apenas para as localidades de Campo Novo do Parecis, Campo Verde e Sorriso. Para as demais localidades, foi utilizado o valor médio das características granulométricas desses solos (Tabela 2.2). Este procedimento foi adotado devido os solos dessas localidades serem semelhantes entre si e classificados como Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho Escuro e Latossolo Vermelho Amarelo, para Luís Eduardo Magalhães, Pedra Preta e Sapezal, respectivamente (SANTOS et al., 2011).

2.2.3. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos das localidades empregadas neste estudo foram obtidos por estações meteorológicas automáticas, modelo HOBO U-30-NRC, instaladas nas áreas experimentais da empresa TMG. Por meio dessas estações, foram obtidos os dados diários das seguintes variáveis meteorológicas: chuva (P); temperatura máxima (T_{max}); temperatura mínima (T_{min}); umidade relativa (UR); e radiação fotossinteticamente ativa (RFA). Esta última variável foi empregada na estimação da radiação solar global (Q_g), por meio da Eq. 2.1. Posteriormente, a Q_g foi empregada na estimação da insolação (n), por meio da equação de Angström-Prescott (Eq. 2.2) (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

$$Q_g = 0,037584 \times RFA \quad (2.1)$$

em que: Q_g é dada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e RFA em $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

$$n = \frac{\left(\frac{Qg}{Qo} - 0,25\right)}{0,5} \times N \quad (2.2)$$

em que: Q_o é a radiação solar extraterrestre, dada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; e n e o fotoperíodo (N) em horas. Tanto Q_o quanto N foram estimados por meio de equações astronômicas (ALLEN et al., 1998), as quais empregam como dados de entrada a latitude do local e o dia do ano, de 1 a 365.

A chuva foi obtida por meio de pluviômetros de báscula, as T_{max} e T_{min} e a UR foram registradas por uma sonda instalada no interior de um abrigo multiplacas a 2 m de altura, enquanto a RFA foi obtida por um sensor quântico de fotodiodo de silício. Para o preenchimento de falhas na série de dados, assim como para a estimação dos dados de velocidade do vento, foi utilizado o banco de dados meteorológicos em grade ($0,25 \times 0,25^\circ$), disponibilizado por Xavier et al. (2016).

2.2.4. Modelo Zona Agroecológica-FAO – descrição, calibração e validação

O modelo Zona Agroecológica-FAO (MZA-FAO) foi desenvolvido por Kassam (1977) para estimar a produtividade potencial (PP) e a partir desta a produtividade atingível (PA), por meio da penalização da PP pela deficiência hídrica relativa em cada fase de desenvolvimento da cultura, de acordo com a sensibilidade delas ao estresse causado pela falta de água (DOORENBOS; KASSAM, 1979; RAO; SARMA; CHANDER, 1988). Essa sensibilidade à falta de água para as plantas é denominada de índice de sensibilidade à deficiência hídrica ou fator de resposta à água (K_y), o qual varia de acordo com a espécie, a cultivar e as fases fenológicas. A PP para cada cultivar da cultura do algodoeiro, dada em kg ha^{-1} , foi obtida pela interação entre genótipo, radiação solar, fotoperíodo e temperatura do ar (Eq. 2.3):

$$PP = \sum_{i=1}^m [PPBp_i \times C_{IAFi} \times C_{Ri} \times C_C \times (1 - C_{Um})^{-1}] \quad (2.3)$$

em que: $PPBp$ é a fotossíntese bruta ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$); C_{IAF} é o coeficiente de correção para índice de área foliar (IAF) (adimensional); C_R é o coeficiente de correção para a respiração de manutenção, função da temperatura do ar (adimensional); C_C é o índice de colheita da cultura do algodoeiro (adimensional); C_{Um} é o teor de água na parte colhida da planta (adimensional); i é um dado dia do ciclo da cultura; m é o número total de dias do ciclo da cultura, da semeadura até a colheita.; e MS é a matéria seca (kg).

A fotossíntese bruta foi estimada pela soma da fotossíntese para a fração do dia com céu claro ($PPBc$) (Eq. 2.4) e nublado ($PPBn$) (Eq. 2.5), ambas dadas em $\text{kg de MS ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$:

$$PPBc = (107,2 + 8,612 \times Qo) \times cTc \times n/N \quad (2.4)$$

$$PPBn = (31,7 + 5,239 \times Qo) \times cTn \times (1 - n/N) \quad (2.5)$$

em que: cTc e cTn representam coeficientes adimensionais relacionados à eficiência do processo fotossintético, em função do tipo de cultura e metabolismo de fixação de CO_2 , na fração do dia com céu claro (cTc) e nublado (cTn). Esses coeficientes são dependentes da temperatura média do ar (T) e obtidos pelas funções apresentadas a seguir para plantas C3 de verão, classificação na qual se inclui a cultura do algodoeiro (Eq. 2.6 e 2.7), correspondente ao intervalo de 16,5 a 37 °C (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002):

$$cTc = -0,0425 + 0,035 \times T + 0,00325 \times T^2 - 0,0000925 \times T^3 \quad (2.6)$$

$$cTn = 0,583 + 0,014 \times T + 0,0013 \times T^2 - 0,000037 \times T^3 \quad (2.7)$$

O coeficiente de correção para o IAF (C_{IAF}) está associado à taxa máxima de crescimento, a qual varia ao longo do desenvolvimento da cultura e, conseqüentemente, da área foliar (KASSAM, 1977). Quando o IAF em dado dia “i” for igual ou maior do que 5, o C_{IAF} será igual a 1,0 (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Quando o IAF de dado dia “i” for menor do que 5, a correção deverá ser aplicada, de acordo com a seguinte equação (KASSAM, 1977):

$$C_{IAFi} = (0,0186 + 0,37 \times IAF_i - 0,035 \times IAF_i^2) \quad (2.8)$$

em que: IAF_i é o índice de área foliar da cultura em dado dia “i” de seu ciclo. O IAF_i do algodoeiro foi adaptado de Silva et al. (1998), obtido para cada decêndio do ciclo da cultura, com os respectivos valores do 1º ao 17º decêndio do ciclo: 0,00; 0,01; 0,10; 0,42; 1,03; 1,81; 2,54; 3,03; 3,21; 3,09; 2,76; 2,31; 1,84; 1,40; 1,03; 0,73; e 0,50. Esses valores de IAF foram denominados de IAF original.

O coeficiente de respiração de manutenção em função da temperatura do ar (C_R) foi considerado como sendo 0,6 para os dias em que a temperatura média do ar foi inferior a 20 °C e de 0,5 para aqueles em que a temperatura média do ar foi igual ou superior a 20 °C (DOORENBOS; KASSAM, 1979). O índice de colheita da cultura do algodoeiro (C_C) foi considerado como sendo 0,55 (caroço), de acordo com Kerby, Cassman e Keeley (1990), o que representa adequadamente a densidade de plantas utilizada neste estudo (10,39 plantas m^{-2}), com espaçamento entre linhas de plantas de 96 cm e sistema de cultivo convencional. O teor de água

na parte colhida da planta (C_{Um}) foi de 7%, teor de água predominante entre as amostras de algodão herbáceo (em caroço) colhidas na área experimental do presente estudo.

Após estimação da PP, a produtividade atingível (PA) foi obtida pela penalização da primeira pelo déficit hídrico em cada fase fenológica da cultura do algodoeiro. A PA para cada cultivar da cultura do algodoeiro, dada em kg ha^{-1} , foi estimada conforme equação proposta por Doorenbos e Kassam (1979) e Rao, Sarma e Chander (1988) (Eq. 2.9):

$$PA = PP \times \prod_{i=1}^n \left[1 - Ky_i \times \left(1 - \frac{ETr_i}{ETc_i} \right) \right] \quad (2.9)$$

em que: Ky_i é o índice de sensibilidade ao déficit hídrico de cada fase fenológica da cultura do algodoeiro (Tabela 2.3); ETr_i é a evapotranspiração real da cultura obtida pelo balanço hídrico da cultura, conforme o método de Thornthwaite e Mather (1955); ETc_i é a evapotranspiração máxima da cultura; i é a fase fenológica considerada; e n é o total de fases fenológicas da cultura do algodoeiro.

Tabela 2.3. Fases fenológicas da cultura do algodoeiro e suas respectivas durações.

Fase fenológica	Duração (dias)
Estabelecimento	20
Vegetativa	30
Florescimento	60
Formação dos frutos	40
Maturação	20

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1979).

A evapotranspiração máxima da cultura foi obtida pelo produto entre a evapotranspiração de referência, estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO (ALLEN et al., 1998), e o coeficiente de cultura (Kc) do algodoeiro adaptado de Bezerra et al. (2012), obtido para cada decêndio do ciclo da cultura, com os respectivos valores do 1º ao 17º decêndio do ciclo: 0,50; 0,51; 0,53; 0,61; 0,75; 0,89; 0,99; 1,04; 1,05; 1,04; 1,02; 0,97; 0,90; 0,82; 0,75; 0,69; e 0,63, e denominado como Kc original.

A PA foi estimada primeiramente com os valores de Ky recomendados pela FAO (estabelecimento: 0,00; vegetativo: 0,20; florescimento: 0,50; formação das maçãs (formação dos frutos): 0,75; maturação: 0,25) (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Posteriormente, os valores de Ky foram calibrados para cada uma das 26 cultivares analisadas. A calibração do Ky objetivou minimizar o erro absoluto médio (EAM) entre a produtividade observada para cada cultivar nas diferentes localidades e a PA estimada pelo MZA-FAO.

O modelo de estimação da produtividade do algodoeiro foi calibrado e validado de acordo com nove diferentes cenários: a) Cenário I: IAF original e Kc original; b) Cenário II: IAF com aumento em 10% e Kc original; c) Cenário III: IAF com aumento em 20% e Kc original; d) Cenário IV: IAF original e Kc com aumento em 10%; e) Cenário V: IAF e Kc, ambos com aumento em 10%; f) Cenário VI: IAF com aumento em 20% e Kc com aumento em 10%; g) Cenário VII: IAF original e Kc com aumento em 20%; h) Cenário VIII: IAF com aumento em 10% e Kc com aumento em 20%; e i) Cenário IX: IAF e Kc, ambos com aumento em 20%.

Os dados experimentais de produtividade foram divididos em duas partes, sendo uma destinada ao processo de calibração (75% do total de dados) e outra ao processo de validação com dados independentes (25% do total de dados). As safras 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017 foram utilizadas na calibração do modelo, enquanto as safras 2017/2018 e 2018/2019 foram utilizadas na validação do modelo calibrado.

2.2.5. Desempenho do modelo Zona Agroecológica-FAO

O desempenho do MZA-FAO para a estimação da produtividade do algodoeiro foi realizada por meio dos seguintes indicadores estatísticos e erros: coeficiente de correlação de Pearson (r); coeficiente de determinação (R^2); índice de concordância (d) (WILLMOTT et al., 1985); índice de confiança (C) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997); erro médio (EM); erro absoluto médio (EAM) e sua porcentagem ($EAMP$); raiz quadrada do erro médio ($RMSE$); e o índice de eficiência do modelo (E) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), como segue:

$$R^2 = r^2 \quad (2.10)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Est_i - Obs_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|Est_i - Obs_m| + |Obs_i - Obs_m|)^2} \quad (2.11)$$

$$C = r \times d \quad (2.12)$$

$$EM = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (Est_i - Obs_i) \quad (2.13)$$

$$EAM = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (|Est_i - Obs_i|) \quad (2.14)$$

$$EAMP = \left[\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Est_i - Obs_i|}{Obs_i} \right) \right] \times 100 \quad (2.15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (Est_i - Obs_i)^2} \quad (2.16)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Est_i - Obs_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Obs_i - Obs_m)^2} \quad (2.17)$$

em que: Est_i e Obs_i são as produtividades estimadas e observadas de algodão em caroço, em $kg\ ha^{-1}$, respectivamente; Obs_m é a produtividade média observada de algodão em caroço, em $kg\ ha^{-1}$; e n é o número de observações.

Apesar de todos esses índices e erros terem sido considerados na validação das diferentes calibrações do MZA-FAO, a seleção da melhor calibração foi feita empregando-se o índice de confiança (C) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997) e o erro absoluto médio em porcentagem (EAMP), os quais englobam boa parte dos demais. O índice de confiança (C) representa uma medida combinada de precisão (r) e acurácia (d). Esse índice pode ser classificado como ótimo ($> 0,85$); muito bom ($0,76-0,85$); bom ($0,66-0,75$); mediano ($0,61-0,65$); sofrível ($0,51-0,60$); ruim ($0,41-0,50$) e péssimo ($\leq 0,40$). O erro absoluto médio em porcentagem (EAMP) fornece a magnitude do erro em termos relativos, ou seja, quanto menor for o EAMP, melhor é o desempenho do modelo.

2.2.6. Análise de agrupamento para a sensibilidade de cultivares brasileiras de algodão ao déficit hídrico

A tolerância das cultivares da cultura do algodoeiro ao déficit hídrico foi determinada pela magnitude dos valores de K_y na fase reprodutiva. Valores de K_y altos indicam baixa tolerância à seca enquanto valores de K_y baixos indicam alta tolerância à seca. O K_y foi calibrado para todas as fases fenológicas da cultura do algodoeiro para cada uma das 26 cultivares, obtendo-se uma matriz que possibilitou o agrupamento de cultivares em relação à sua tolerância à seca. Para agrupar as cultivares foi utilizada a técnica de análise multivariada, denominada análise de agrupamentos (*cluster analysis*), para a qual foram empregadas a medida de similaridade da distância euclidiana e o método de Ward, o qual é um procedimento de agrupamento hierárquico no qual a medida de similaridade usada para juntar agrupamentos é calculada como a soma dos quadrados entre os dois agrupamentos feita sobre todas as variáveis (HAIR et al., 2009). Os resultados foram representados graficamente por meio de dendrogramas. As análises foram realizadas no software R 3.5.1 (R CORE TEAM, 2018).

Os grupos das cultivares tolerantes à seca foram definidos pelos valores de K_y obtidos na fase reprodutiva do algodoeiro, representada pelos subperíodos do florescimento e da formação dos frutos, os quais são os mais sensíveis ao déficit hídrico (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; LIMA; AQUINO; BERGER, 2014; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002; ZONTA et al., 2017). Os agrupamentos consideraram as seguintes situações: valores de K_y apenas do florescimento; valores de K_y apenas da formação dos frutos; e valores de

Ky do florescimento e da formação dos frutos. Desse modo, as cultivares da cultura do algodoeiro foram classificadas em cinco grupos de tolerância ao déficit hídrico, como segue: muito baixa (Grupo I), baixa (Grupo II), média (Grupo III), alta (Grupo IV) e muito alta (Grupo V).

2.3. Resultados e discussão

2.3.1. Calibração e validação do modelo Zona Agroecológica-FAO para estimação da produtividade do algodoeiro

O MZA-FAO mostrou-se sensível às alterações no índice de área foliar (IAF) e no coeficiente de cultura (K_c) por meio da simulação com os diferentes cenários de calibração (I a IX), apresentados na Tabela 2.4, assim como com os ajustes nos valores de K_y para cada cultivar. Na calibração, o modelo foi considerado ótimo, com índice de concordância (C) que variou de 0,94 a 0,97, e baixos valores do erro absoluto médio percentual (EAMP), que variaram entre 2,23 e 3,21%, representando erros absolutos médios (EAM) que variaram de 104,43 a 150,08 kg ha⁻¹. A performance desse modelo, na fase de validação, em todos os cenários considerados variou de ótimo a muito bom, com índice de concordância (C) entre 0,86 e 0,89, e baixos valores do EAMP, que variou de 8,03 a 8,85%, representando EAMs entre 344,39 a 379,34 kg ha⁻¹. O cenário de IAF e K_c que apresentou o melhor desempenho na fase de calibração e de validação do modelo foi o Cenário II, como se observa em negrito na Tabela 2.4 (Calibração – C = 0,97; EAMP = 2,23%; EAM = 104,43 kg ha⁻¹; Validação – C = 0,89; EAMP = 8,03%; EAM = 344,39 kg ha⁻¹). Esses resultados evidenciam que esse modelo apresentou boa precisão e acurácia, e baixo erro para estimar a produtividade do algodoeiro, como também pode ser observado na Figura 2.2, que apresenta a relação entre as produtividades observadas e estimadas nas fases de calibração (Figura 2.2A) e de validação (Figura 2.2B). Na calibração, as produtividades observadas (PO) oscilaram entre 3014,39 e 5954,28 kg ha⁻¹ (média de 4681,78 kg ha⁻¹) e as produtividades estimadas (PE) variaram de 2844,06 a 5858,19 kg ha⁻¹ (média de 4674,03 kg ha⁻¹). Na validação, as POs oscilaram entre 2819,44 e 6325,00 kg ha⁻¹ (média de 4287,72 kg ha⁻¹) e as PEs variaram de 2824,86 a 6079,39 kg ha⁻¹ (média de 4128,32 kg ha⁻¹). As figuras com a relação entre as produtividades observadas e estimadas para os demais cenários de calibração podem ser encontradas no APÊNDICE A2.

Tabela 2.4. Desempenho estatístico do modelo Zona Agroecológica-FAO nas fases de calibração e validação para a cultura do algodoeiro, considerando-se nove cenários de alteração do índice de área foliar (IAF) e coeficiente de cultura (Kc). O cenário em destaque (negrito) é o que foi selecionado como base para o presente estudo, em função de seu desempenho superior na fase de validação.

Índice	Cenários								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Calibração (n = 81)									
r	0,97	0,98	0,98	0,97	0,98	0,98	0,96	0,98	0,98
R ²	0,94	0,96	0,96	0,94	0,96	0,96	0,93	0,95	0,96
d	0,98	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99
C	0,96	0,97	0,97	0,95	0,97	0,97	0,94	0,96	0,97
EM (kg ha ⁻¹)	-8,30	-7,75	-6,44	-8,39	-8,96	-4,97	-9,12	-9,22	-9,73
EAM (kg ha ⁻¹)	125,91	104,43	125,13	135,47	108,50	116,02	150,08	113,06	116,06
EAMP (%)	2,69	2,23	2,67	2,89	2,32	2,48	3,21	2,41	2,48
RMSE (kg ha ⁻¹)	160,31	131,80	160,77	170,71	135,42	146,15	182,65	143,19	144,24
E	0,94	0,96	0,94	0,93	0,96	0,95	0,92	0,95	0,95
Validação (n = 27)									
r	0,92	0,93	0,93	0,91	0,93	0,93	0,92	0,92	0,93
R ²	0,84	0,87	0,86	0,84	0,87	0,87	0,84	0,85	0,87
d	0,95	0,96	0,95	0,94	0,96	0,96	0,94	0,95	0,96
C	0,87	0,89	0,88	0,86	0,89	0,89	0,87	0,88	0,89
EM (kg ha ⁻¹)	-179,21	-159,40	-172,15	-222,81	-170,86	-173,75	-236,13	-198,57	-182,24
EAM (kg ha ⁻¹)	348,52	344,39	369,94	377,09	348,63	366,44	372,04	379,34	346,32
EAMP (%)	8,13	8,03	8,63	8,79	8,13	8,55	8,68	8,85	8,08
RMSE (kg ha ⁻¹)	435,04	409,18	449,06	469,91	413,68	434,46	470,19	449,45	433,31
E	0,81	0,83	0,80	0,78	0,83	0,81	0,78	0,80	0,81

n = número de dados empregados nas fases de calibração e validação do modelo; r = coeficiente de correlação de Pearson; R² = coeficiente de determinação; d = índice de concordância (WILLMOTT et al., 1985); C = índice de confiança (CAMARGO; SENTELHAS, 1997); EM = erro médio; EAM = erro absoluto médio; EAMP = erro absoluto médio em porcentagem; RMSE = raiz quadrada do erro médio; E = índice de eficiência de modelagem (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

Figura 2.2. Relação entre as produtividades observadas (PO) e estimadas (PE) pelo modelo Zona Agroecológica-FAO, nas fases de calibração (A) e validação (B), considerando-se o cenário de calibração II (IAF com aumento em 10% e Kc original).

A performance do modelo de produtividade do algodoeiro utilizado neste estudo não é comparável a outros estudos nesse sentido para a cultura, uma vez que esse tipo de análise, até o momento, ainda é inexistente. No entanto, ao comparar a performance do MZA-FAO calibrado para a cultura do algodoeiro em relação à sua performance quando calibrado para outras culturas nas condições brasileiras, seu desempenho foi superior aos resultados obtidos por Andrioli e Sentelhas (2009), para a cultura do milho, que encontraram EAMP de 11,14%, por Battisti e Sentelhas (2015), que encontraram um EAMP de 8,48% para a cultura da soja, e por Monteiro e Sentelhas (2017), que obtiveram um EAMP de 12,5% para a cultura da cana-de-açúcar. Esses resultados evidenciam que o MZA-FAO apresenta desempenho aceitável, sendo este superior ao encontrado para outras culturas.

Ao comparar o MZA-FAO com outros modelos de simulação da cultura do algodoeiro, este mostrou ter um nível de acurácia semelhante, representado pelo índice *d* (WILLMOTT et al., 1985), em relação ao modelo AquaCrop (GARCÍA-VILA et al., 2009; HUSSEIN; JANAT; YAKOUB, 2011; TAN et al., 2018) e ainda melhor do que o CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) (ADHIKARI et al., 2016). Além disso, MZA-FAO teve desempenho semelhante, representado pelo RMSE, ao encontrado na literatura para a produção de algodão usando AquaCrop (FARAHANI; IZZI; OWEIS, 2009; HUSSEIN; JANAT; YAKOUB, 2011), CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) (CAMMARANO et al., 2012; RAHMAN et al., 2018) e OzCot (APSIM) (GAYDON et al., 2017), mesmo considerando-se sua abordagem mais simples.

Os modelos de simulação de cultura apresentam diferentes níveis de complexidade, desde os empíricos, que estabelecem relações matemáticas entre a produtividade e uma ou mais variáveis ambientais, passando pelos modelos fisiológicos-matemáticos, como o MZA-FAO (DOORENBOS; KASSAM, 1979; KASSAM, 1977), que combina a simulação de processos ecofisiológicos com relações empíricas, aos modelos mecanicistas, baseados exclusivamente em processos fisiológicos e biofísicos, como o AquaCrop (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009), CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) (JONES et al., 2003; PATHAK et al., 2007) e OzCot (APSIM) (HEARN, 1994; KEATING et al., 2003), que já foram amplamente testados em todo o mundo (ABBAS et al., 2020). De todos esses modelos, aqueles que incluem qualquer tipo de abordagem mecanicista são mais recomendados para estudos sob diferentes condições de solo, clima e manejo da cultura. A partir de nossos resultados, comprovou-se que o MZA-FAO, quando devidamente calibrado e validado, simulou muito bem a produtividade da cultura do algodoeiro, sendo capaz de identificar as diferenças entre as cultivares avaliadas em relação à tolerância à seca e adequado para avaliar o desempenho destas cultivares sob condições ambientais distintas.

Portanto, o MZA-FAO se destaca como uma alternativa aos modelos de simulação de cultura mais complexos, pois possui menos coeficientes para calibrar e é relativamente simples de usar. Este modelo, como os mais complexos, processa as simulações em um intervalo de tempo diário, considera os processos fisiológicos básicos da cultura, como fotossíntese bruta e respiração de manutenção, tem poucos coeficientes relacionados à genética da cultura, como área foliar e índices de colheita, considera as propriedades físicas do solo para determinar a capacidade de retenção de água do solo, simula práticas básicas de manejo da cultura, como datas de semeadura e irrigação, mas não considera as limitações impostas pela fertilidade do solo e pragas e doenças. No entanto, o MZA-FAO só pode ser usado para estudos relacionados às mudanças climáticas se funções para descrever a relação entre as concentrações de CO₂ atmosférico e a fotossíntese bruta ou produtividade pudessem ser adicionadas, conforme proposto por Verhage et al. (2017).

2.3.2. Agrupamento de cultivares brasileiras de algodão para a tolerância à seca

A partir do conjunto de dados obtidos por meio do Cenário II foi realizada a análise de agrupamentos dos índices de sensibilidade à deficiência hídrica (Ky) das cultivares de algodoeiro. O valor do Ky é inversamente proporcional à tolerância ao déficit hídrico. De modo geral, foram identificados cinco grupos de cultivares de algodão, agrupados conforme os diferentes níveis de tolerância ao déficit hídrico: muito baixa (Grupo I); baixa (Grupo II); média (Grupo III); alta (Grupo IV); e muito alta (Grupo V), considerando-se os três critérios (Ky apenas do florescimento, Ky apenas da formação dos frutos e Ky de ambas as fases) (Figura 2.3). Os agrupamentos foram feitos conforme os valores de Ky apenas da formação dos frutos, pois essa fase fenológica foi aquela que apresentou melhor distinção entre os grupos de cultivares.

De acordo com a análise de agrupamentos usando como critério o Ky apenas da formação dos frutos, as cultivares com a menor tolerância ao déficit hídrico foram: DP1746B2RF; FM983GLT; FMT707; TMG41WS; e TMG82WS, ao passo que aquelas com a maior tolerância foram: FM944GL; FMT705; e TMG43WS (Figura 2.3B, Tabela 2.5).

Figura 2.3. Agrupamentos do índice de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y) para 26 cultivares brasileiras de algodão. Os agrupamentos foram definidos de acordo com: A) K_y apenas do florescimento; B) K_y apenas da formação dos frutos; e C) K_y do florescimento e da formação dos frutos.

Tabela 2.5. Índice de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y) para diferentes fases fenológicas da cultura do algodoeiro, considerando-se a classificação dos grupos de tolerância à seca para 26 cultivares brasileiras de algodão, de acordo com a análise de agrupamentos usando como critério o K_y apenas da formação dos frutos. Destaque em negrito é dado para as fases fenológicas com maior sensibilidade ao déficit hídrico.

Grupo	Cultivares	K_y				
		EST	VEG	FLO	FOR	MAT
I	DP1746B2RF; FM983GLT; FMT707; TMG41WS; TMG82WS	0,75	0,18 a 0,22	0,50 a 0,65	0,90 a 0,98	0,25 a 0,28
II	DP1240B2RF; IMA8405GLT; TMG42WS; TMG46B2RF	0,75	0,18 a 0,22	0,45 a 0,65	0,83 a 0,85	0,25
III	DP1243B2RF; DP1536B2RF; DP1648B2RF; FM940GLT; FM975WS; FMT701; FMT709; TMG44B2RF; TMG45B2RF; TMG81WS	0,75	0,18 a 0,22	0,42 a 0,65	0,75 a 0,79	0,23 a 0,25
IV	FM951LL; FM954GLT; FM980GLT; TMG47B2RF	0,75	0,18 a 0,22	0,42 a 0,57	0,71 a 0,72	0,25
V	FM944GL; FMT705; TMG43WS	0,75	0,18 a 0,20	0,49 a 0,51	0,61 a 0,65	0,25

Grupo I = Muito baixa; Grupo II = Baixa; Grupo III = Média; Grupo IV = Alta; Grupo V = Muito alta; EST = Estabelecimento; VEG = Vegetativa; FLO = Florescimento; FOR = Formação dos frutos; MAT = Maturação.

Os valores de K_y encontrados nas fases de florescimento e formação dos frutos evidenciaram que elas apresentam maior sensibilidade ao déficit hídrico. A ocorrência de deficiência hídrica durante essas fases pode levar a perdas expressivas de produtividade e de qualidade das fibras (HIMANSHU et al., 2019; ROSOLEM, 2001; SNOWDEN et al., 2014; ZONTA et al., 2017). Sob condições de déficit hídrico, o algodoeiro reduz sua evapotranspiração em até 50%, o que pode acarretar quedas de produtividade entre 28 e 45% (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Caso a deficiência hídrica ocorra em diferentes fases fenológicas, a redução na produtividade pode ser da ordem de 12% se ocorrer na fase de emergência e da ordem de 61% caso ocorra no enchimento das maçãs, quando, pelo menos 10% das plantas estão frutificando e as primeiras maçãs estão completamente cheias (ZONTA et al., 2017).

As fases vegetativa e de maturação do algodoeiro mostraram-se como as de menor sensibilidade ao déficit hídrico. Portanto, caso haja deficiência hídrica durante essas fases, as perdas de produtividade serão menores quando comparadas às perdas decorrentes do estresse hídrico nas fases de florescimento e formação dos frutos (LOKA; OOSTERHUIS, 2012; ROSOLEM, 2001; ZONTA et al., 2017).

Os valores de K_y nas fases de florescimento e formação dos frutos foram diferentes entre os grupos de tolerância à seca, ao contrário do que foi observado na fase de estabelecimento, na qual todas as cultivares apresentaram $K_y = 0,75$ (Tabela 2.5). Na fase vegetativa, o K_y variou de 0,18 a 0,22, enquanto nas fases de florescimento e formação dos frutos, o K_y oscilou entre 0,42 e 0,65, para as cultivares mais tolerantes e entre 0,61 e 0,98 para as menos tolerantes ao déficit hídrico. Na fase de maturação, o K_y variou de 0,23 a 0,28, porém sem grandes variações entre as diferentes cultivares analisadas.

Os valores de K_y para cultivares de algodão brasileiro obtidos nesse estudo são inéditos, não havendo na literatura estudos que definam esses valores por fase fenológica. O que já foi feito para o algodão sob tal perspectiva foi o estudo de Costa et al. (2019), que definiu o K_y médio para todo o ciclo da cultura para três cultivares brasileiras de algodão (FMX701, FMX910 e FMX993), considerando apenas um local e duas safras. Esses autores relataram K_y variando entre 0,0 e 0,9, com média de 0,6; entretanto, sem realizar calibração do modelo para outros parâmetros que não o K_y , como IAF e K_c , como feito no presente estudo. A falta de calibração é uma preocupação quando se trabalha com modelos de cultura, pois alguns resultados podem não fazer sentido, como $K_y = 0$, o que significa que a cultura não é sensível ao déficit hídrico, o que, provavelmente, não representa a realidade. Os valores médios de K_y para uma cultivar turca de algodão foram relatados por Dağdelen et al. (2006). Esses autores encontraram valores de K_y variando entre 0,89 e 0,96, enquanto Ertek e Kanber (2001), usando uma cultivar por duas safras, também na Turquia,

encontraram $K_y = 0,7$. No presente estudo, apesar das informações de K_y serem apresentadas por grupos de cultivares tolerantes à seca (Tabela 2.5), os valores específicos de K_y por cultivar e fase da cultura também são apresentados no APÊNDICE B2. Os resultados apresentados no presente estudo mostram que o MZA-FAO tem potencial para identificar cultivares de algodão tolerantes à seca, tomando-se por base os valores de K_y , o que também já foi realizado para as culturas do milho (ANDRIOLI; SENTELHAS, 2009) e da soja (BATTISTI; SENTELHAS, 2015). Essa abordagem também poderá ser aplicada a outras culturas, desde que o modelo seja devidamente calibrado e validado para elas.

As cultivares de algodão que possuem ciclo tardio (acima de 170 dias) (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; MARUR; RUANO, 2001), passam mais tempo no campo e, desse modo, ficam mais expostas às intempéries do tempo na região. Devido a isso, essas cultivares têm sua semeadura recomendada para a abertura da janela de plantio (BÉLOT; VILELA, 2020), ou seja, nas primeiras datas de semeadura autorizadas pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para a cultura nos estados produtores. Em seguida, são semeadas as cultivares de ciclo médio-tardio, médio e médio-precoce, nessa ordem, as quais apresentam características intermediárias entre as cultivares de ciclo tardio e precoce. As cultivares que possuem ciclo precoce (120 a 130 dias) (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; MARUR; RUANO, 2001), são recomendadas para semeaduras mais tardias, no fechamento da janela de plantio (BÉLOT; VILELA, 2020), ou seja, nas últimas datas de semeadura autorizadas pelo ZARC para a cultura nos estados produtores.

As diferenças relacionadas aos grupos que concordam totalmente, concordam/discordam parcialmente, e discordam totalmente com a classificação das cultivares brasileiras de algodão em relação aos valores de K_y obtidos neste estudo podem estar relacionadas ao conjunto de dados utilizados, que devido à interação genótipo x ambiente, podem ter expressado seu potencial genético de produção de forma semelhante ou distinta daquela desenvolvida durante o seu melhoramento genético (CONATY; CONSTABLE, 2020; CONATY et al., 2018; FARIAS et al., 2016; RIAZ et al., 2019).

Essas informações são especialmente importantes para os produtores de algodão, pois os auxiliam na escolha das melhores cultivares para cada ambiente de produção e época de semeadura, o que, em síntese, minimiza os riscos climáticos para a produção de algodão no Brasil. Esse tipo de abordagem pode ser facilmente adotado para outras regiões do mundo, produzindo resultados confiáveis para classificação de cultivares de algodão de acordo com sua tolerância ao déficit hídrico, tornando a escolha da cultivar a mais precisa possível.

2.4. Conclusões

O modelo Zona Agroecológica-FAO devidamente calibrado e validado para a cultura do algodoeiro demonstrou ser uma ferramenta eficiente para identificar a tolerância à seca em cultivares de algodão herbáceo. De acordo com o modelo, as cultivares brasileiras de algodão foram classificadas em cinco grupos de tolerância à seca, considerando-se os valores de K_y durante a fase de formação dos frutos como critério para esse agrupamento. Essas informações são de suma importância para os produtores de algodão, pois os auxiliam na seleção das melhores cultivares para cada ambiente de produção e época de semeadura, minimizando, assim, os riscos climáticos para a cultura do algodoeiro.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, G. et al. Applications of crop modeling in cotton production. In: AHMAD, S.; HASANUZZAMAN, M. (Eds.). **Cotton Production and Uses**. Singapore: Springer Singapore, 2020. p. 429–445.
- ADHIKARI, P. et al. Simulating future climate change impacts on seed cotton yield in the Texas High Plains using the CSM-CROPGRO-Cotton model. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 317–330, 2016.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998.
- ALVES, L. R. A.; LIMA, F. F.; FERREIRA FILHO, J. B. DE S. Aspectos econômicos. In: BORÉM, A.; FREIRE, E. C. (Eds.). **Algodão: Do plantio a colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2014. p. 9–30.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. DE et al. **Zoneamento de risco climático para as culturas de algodão e feijão-caupi consorciadas no estado do Piauí**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2010.
- ANDRIOLI, K. G.; SENTELHAS, P. C. Brazilian maize genotypes sensitivity to water deficit estimated through a simple crop yield model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 7, p. 653–660, 2009.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2019.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2020.
- BASF. **Cultivares de algodão – Guia de variedades**. Disponível em: < <https://agriculture.basf.com/br/> >. Acesso em: 30 dez. 2020.

- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Drought tolerance of Brazilian soybean cultivars simulated by a simple agrometeorological yield model. **Experimental Agriculture**, v. 51, n. 2, p. 285–298, 2015.
- BAYER. **Cultivares de algodão**. Disponível em: <<https://www.bayer.com.br/>>. Acesso em: 31 jan. 2019.
- BÉLOT, J. L.; VILELA, P. M. C. A. **Manual de boas práticas de manejo do algodoeiro em Mato Grosso**. 4a ed. Cuiabá: Instituto Mato-Grossense do Algodão; Associação Mato-Grossense dos Produtores de Algodão, 2020.
- BEZERRA, B. G. et al. Evapotranspiration and crop coefficient for sprinkler-irrigated cotton crop in Apodi Plateau semiarid lands of Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 86–93, 2012.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial do Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.
- CAMMARANO, D. et al. Agronomic and economic evaluation of irrigation strategies on cotton lint yield in Australia. **Crop and Pasture Science**, v. 63, n. 7, p. 647, 2012.
- CAMPELO JUNIOR, J. H. et al. Estimativa da retenção de água em Latossolos do Cerrado mato-grossense cultivados com algodão. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 8, n. 3, p. 318–326, 2014.
- CHIAVEGATO, E. J.; SALVATIERRA, D. K. DE; GOTTARDO, L. C. B. Algodão. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Ed.). **Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. 1a ed. Brasília: INMET, 2009. p. 33–49.
- CONATY, W. C.; CONSTABLE, G. A. Factors responsible for yield improvement in new *Gossypium hirsutum* L. cotton cultivars. **Field Crops Research**, v. 250, p. 107780, 2020.
- CONATY, W. C. et al. Use of a managed stress environment in breeding cotton for a variable rainfall environment. **Field Crops Research**, v. 221, p. 265–276, 2018.
- COSTA, P. M. C. et al. Yield response factor to water (Ky) of FMX 993, FMT 701 and FMX 910 cotton varieties in Campo Verde, MT. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 39, n. 4, p. 1–8, 2019.
- DAĞDELEN, N. et al. Water-yield relation and water use efficiency of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and second crop corn (*Zea mays* L.) in western Turkey. **Agricultural Water Management**, v. 82, n. 1–2, p. 63–85, 2006.
- DELTAPINE. **Cultivares de algodão**. Disponível em: <<https://www.bayer.com.br/>>. Acesso em: 5 mar. 2020.

- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper No. 33**. Roma, Italy: FAO, 1979.
- ERTEK, A.; KANBER, R. Damla sulama yöntemiyle sulanan pamukta su kullanım randımanı (WUE) ve verim-tepki etmeninin (Ky) değişimi. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 25, p. 111–118, 2001.
- FAO. **FAOSTAT**. 2020. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat>>. Acesso em: 5 fev. 2021.
- 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, F. J. C. et al. Correlations and path analysis among agronomic and technological traits of upland cotton. **Genetics and Molecular Research**, v. 15, n. 3, p. gmr.15038239, 2016.
- FMT. **Cultivares de algodão**. Disponível em: <<https://www.fundacaomt.com.br/>>. Acesso em: 31 jan. 2019.
- GARCÍA-VILA, M. et al. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 477–487, 2009.
- GAYDON, D. S. et al. Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. **Field Crops Research**, v. 204, p. 52–75, 2017.
- HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- HEARN, A. B. OZCOT: A simulation model for cotton crop management. **Agricultural Systems**, v. 44, n. 3, p. 257–299, 1994.
- HIMANSHU, S. K. et al. Evaluation of crop-growth-stage-based deficit irrigation strategies for cotton production in the Southern High Plains. **Agricultural Water Management**, v. 225, p. 105782, 2019.
- HUSSEIN, F.; JANAT, M.; YAKOUB, A. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 4, p. 1319–1330, 2011.
- IBGE. **Produção Agrícola Municipal 2019**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.
- IMAMT. **Cultivares de algodão**. Disponível em: <<https://imamt.org.br/>>. Acesso em: 31 jan. 2019.
- JONES, J. W. et al. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 235–263, 2003.
- KASSAM, A. H. **Net biomass production and yield crops**. Roma, Italy: FAO, 1977.
- KEATING, B. A. et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 267–288, 2003.

- KERBY, A. T.; CASSMAN, K. G.; KEELEY, M. Genotypes and plant densities for narrow-row cotton systems. II. Leaf area and dry-matter partitioning. **Crop Science**, v. 30, n. 3, p. 649–653, 1990.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Libardi, P ed. São Paulo: Editora USP, 2012.
- LIMA, T. C.; AQUINO, L. Â. DE; BERGER, P. G. Botânica. In: BORÉM, A.; FREIRE, E. C. (Eds.). **Algodão: Do plantio a colheita**. 1a ed. Viçosa: UFV, 2014. p. 49–66.
- LOKA, D. A.; OOSTERHUIS, D. M. Water stress and reproductive development in cotton. In: OOSTERHUIS, D. M.; COTHREN, J. T. (Eds.). **Flowering and fruiting in cotton**. Candova: The Cotton Foundation, 2012. p. 51–58.
- MARUR, C. J.; RUANO, O. A reference system for determination of developmental stages of upland cotton. **Revista de Oleaginosas e Fibrosas**, v. 5, n. 2, p. 313–317, 2001.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap: Can it be determined at national level with a simple agrometeorological model? **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 3, p. 272–284, 2017.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: Part I – A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282–290, 1970.
- PATHAK, T. B. et al. Use of global sensitivity analysis for CROPGRO Cotton model development. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 6, p. 2295–2302, 2007.
- PEREIRA, A.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing** (R Foundation for Statistical Computing, Ed.). Vienna, Austria, 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>.
- RAES, D. et al. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 438–447, 2009.
- RAHMAN, M. H. UR et al. Multi-model projections of future climate and climate change impacts uncertainty assessment for cotton production in Pakistan. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 253–254, p. 94–113, 2018.
- RAO, N. H.; SARMA, P. B. S.; CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 13, p. 25–32, 1988.
- RIAZ, M. et al. Stability analysis of different cotton genotypes under normal and water-deficit conditions. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, n. 6, p. 1257–1265, 2019.
- ROSOLEM, C. A. Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro. **Informações Agrônomicas**, n. 95, p. 1–9, 2001.

- SANTOS, H. G. et al. **O Novo Mapa de Solos do Brasil: Legenda Atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.
- SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., re ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018.
- SANTOS, S. R. et al. Crescimento e produção do algodoeiro fertirrigado com água residuária sanitária no semiárido de Minas Gerais. **Irriga**, v. 21, n. 1, p. 40–57, 2016.
- SILVA, B. B. et al. Efeitos do déficit hídrico sobre a fenometria e a tecnologia de fibra do algodão herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 42–46, 1998.
- SILVA, L. L. et al. Influência das precipitações na produtividade agrícola no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 454–461, 2009a.
- SILVA, P. S. L. et al. Weed control via intercropping with gliricidia. I. Cotton crop. **Planta Daninha**, v. 27, n. 1, p. 97–104, 2009b.
- SNOWDEN, M. C. et al. Timing of episodic drought can be critical in cotton. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 452–458, 2014.
- SOARES, L. C. DA S. **Efeito da temperatura e chuva sobre a qualidade da fibra e produtividade de algodão no estado de Mato Grosso**. [s.l.] Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2015.
- STEDUTO, P. et al. 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.
- TAN, S. et al. Performance of AquaCrop model for cotton growth simulation under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang, China. **Agricultural Water Management**, v. 196, p. 99–113, 2018.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955.
- THORP, K. R. et al. Development and application of process-based simulation models for cotton production: A review of past, present, and future directions. **The Journal of Cotton Science**, v. 18, p. 10–47, 2014.
- TMG. **Cultivares de algodão**. Disponível em: <<http://www.tmg.agr.br/>>. Acesso em: 31 jan. 2020.
- VERHAGE, F. Y. F.; ANTEN, N. P. R.; SENTELHAS, P. C. Carbon dioxide fertilization offsets negative impacts of climate change on Arabica coffee yield in Brazil. **Climatic Change**, v. 144, n. 4, p. 671–685, 2017.

- WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.
- XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.
- ZONTA, J. H. et al. Cotton response to water deficits at different growth stages. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 4, p. 980–990, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A2. CENÁRIOS FAO

Figura A2.1. Relação entre as produtividades observadas (PO) e estimadas (PE) pelo modelo Zona Agroecológica-FAO, nas fases de calibração (A) e validação (B), considerando-se o cenário de calibração I (IAF original e Kc original).

Figura A2.2. Relação entre as produtividades observadas (PO) e estimadas (PE) pelo modelo Zona Agroecológica-FAO, nas fases de calibração (A) e validação (B), considerando-se o cenário de calibração III (IAF com aumento em 20% e Kc original).

Figura A2.3. Relação entre as produtividades observadas (PO) e estimadas (PE) pelo modelo Zona Agroecológica-FAO, nas fases de calibração (A) e validação (B), considerando-se o cenário de calibração IV (IAF original e Kc com aumento em 10%).

Figura A2.4. Relação entre as produtividades observadas (PO) e estimadas (PE) pelo modelo Zona Agroecológica-FAO, nas fases de calibração (A) e validação (B), considerando-se o cenário de calibração V (IAF com aumento em 10% e Kc com aumento em 10%).

Figura A2.5. Relação entre as produtividades observadas (PO) e estimadas (PE) pelo modelo Zona Agroecológica-FAO, nas fases de calibração (A) e validação (B), considerando-se o cenário de calibração VI (IAF com aumento em 20% e Kc com aumento em 10%).

Figura A2.6. Relação entre as produtividades observadas (PO) e estimadas (PE) pelo modelo Zona Agroecológica-FAO, nas fases de calibração (A) e validação (B), considerando-se o cenário de calibração VII (IAF original e Kc com aumento em 20%).

Figura A2.7. Relação entre as produtividades observadas (PO) e estimadas (PE) pelo modelo Zona Agroecológica-FAO, nas fases de calibração (A) e validação (B), considerando-se o cenário de calibração VIII (IAF com aumento em 10% e Kc com aumento em 20%).

Figura A2.8. Relação entre as produtividades observadas (PO) e estimadas (PE) pelo modelo Zona Agroecológica-FAO, nas fases de calibração (A) e validação (B), considerando-se o cenário de calibração IX (IAF com aumento em 20% e Kc com aumento em 20%).

APÊNDICE B2. VALORES DE KY

Tabela B2.1. Índice de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky) para diferentes fases fenológicas da cultura do algodoeiro, considerando-se a classificação dos grupos de tolerância à seca para 26 cultivares brasileiras de algodão, de acordo com a análise de agrupamentos usando como critério o Ky apenas da formação dos frutos.

Cultivares	Ky				
	EST	VEG	FLO	FOR	MAT
Grupo I					
DP1746B2RF	0,75	0,20	0,60	0,91	0,25
FM983GLT	0,75	0,20	0,65	0,98	0,27
FMT707	0,75	0,18	0,49	0,93	0,25
TMG41WS	0,75	0,18	0,49	0,89	0,25
TMG82WS	0,75	0,18	0,40	0,88	0,25
Grupo II					
DP1240B2RF	0,75	0,18	0,35	0,84	0,25
IMA8405GLT	0,75	0,18	0,52	0,81	0,25
TMG42WS	0,75	0,18	0,55	0,82	0,25
TMG46B2RF	0,75	0,18	0,35	0,83	0,25
Grupo III					
DP1243B2RF	0,75	0,22	0,45	0,74	0,25
DP1536B2RF	0,75	0,18	0,45	0,78	0,25
DP1648B2RF	0,75	0,20	0,52	0,72	0,25
FM940GLT	0,75	0,18	0,47	0,75	0,25
FM975WS	0,75	0,20	0,58	0,74	0,25
FMT701	0,75	0,18	0,47	0,75	0,25
FMT709	0,75	0,22	0,51	0,76	0,25
TMG44B2RF	0,75	0,22	0,46	0,77	0,25
TMG45B2RF	0,75	0,18	0,52	0,74	0,25
TMG81WS	0,75	0,22	0,49	0,78	0,25
Grupo IV					
FM951LL	0,75	0,18	0,52	0,69	0,25
FM954GLT	0,75	0,20	0,51	0,67	0,25
FM980GLT	0,75	0,22	0,35	0,65	0,25
TMG47B2RF	0,75	0,18	0,49	0,70	0,25
Grupo V					
FM944GL	0,75	0,18	0,51	0,57	0,25
FMT705	0,75	0,20	0,50	0,61	0,25
TMG43WS	0,75	0,18	0,52	0,62	0,25

Grupo I = Muito baixa; Grupo II = Baixa; Grupo III = Média; Grupo IV = Alta; Grupo V = Muito alta; EST = Estabelecimento; VEG = Vegetativa; FLO = Florescimento; FOR = Formação dos frutos; MAT = Maturação.

3. INTERCOMPARAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO ALGODOEIRO – UMA ABORDAGEM MULTI-MODELOS

RESUMO

Os modelos de simulação de culturas podem ser uma importante ferramenta para avaliação da produtividade de culturas, quando devidamente calibrados e validados. Esses modelos têm sido utilizados de forma individualizada, mas as diferentes estruturas e parâmetros dos modelos de simulação de culturas têm gerado resultados muitas vezes discrepantes. Para melhorar a precisão e reduzir as incertezas do uso desses modelos recomenda-se o uso da abordagem multi-modelos para simulação da produtividade de culturas, o que consiste na combinação (*ensemble*) das saídas dos diversos modelos. Sendo assim, os objetivos deste estudo foram realizar a análise de sensibilidade, calibrar e validar quatro modelos de simulação da produtividade da cultura do algodoeiro no Brasil, considerando-se seus desempenhos em abordagem individual e multi-modelos (*ensemble*). Os dados de produtividade das cultivares de algodoeiro empregadas na calibração e validação dos modelos de simulação foram obtidos junto aos ensaios de competição de cultivares conduzidos pela empresa Tropical Melhoramento & Genética (TMG), em cinco localidades do estado do Mato Grosso e uma no estado da Bahia, entre as safras 2011/2012 e 2018/2019, e em três épocas distintas de semeadura. Os dados meteorológicos ao longo dos períodos dos ensaios foram obtidos junto às estações da TMG instaladas nas áreas experimentais. Os modelos foram calibrados para 12 cultivares de algodão, as quais representam cinco grupos de tolerância ao déficit hídrico (muito baixa, baixa, média, alta e muito alta). Foram avaliados os seguintes modelos de simulação de produtividade da cultura do algodoeiro: Zona Agroecológica – FAO (MZA-FAO); AquaCrop; CROPGRO-*Cotton* (DSSAT); e OzCot (APSIM), considerando-se tanto a abordagem individual como a multi-modelos. A análise de sensibilidade selecionou os parâmetros mais relacionados às variações de produtividade, o que reduziu o número de parâmetros a serem utilizados na calibração de cada um dos modelos. Os modelos de simulação avaliados neste estudo apresentaram desempenho bom a ótimo. A produtividade estimada teve raiz quadrada do erro médio (RMSE) de 366,00 kg ha⁻¹, 483,87 kg ha⁻¹, 619,97 kg ha⁻¹ e 667,97 kg ha⁻¹, respectivamente, para os modelos MZA-FAO, AquaCrop, CROPGRO-*Cotton* e OzCot, com índices d sempre maior ou igual a 0,80. O melhor desempenho foi obtido quando foi considerada a abordagem multi-modelos reduzindo o RMSE para 230,65 kg ha⁻¹, como índice d = 0,98. Os modelos de simulação avaliados neste estudo foram capazes de estimar a produtividade do algodoeiro quando devidamente calibrados. Conclui-se que a abordagem multi-modelos melhorou as estimativas de produtividade da cultura do algodoeiro, minimizando as incertezas das estimativas quando comparadas com o emprego individual dos modelos.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L., Calibração e validação de modelos, Zona Agroecológica-FAO, AquaCrop, DSSAT, APSIM.

INTERCOMPARATION OF COTTON CROP SIMULATION MODELS – A MULTI-MODEL APPROACH

ABSTRACT

Crop simulation models can be an important tool for evaluating crop yield, when properly calibrated and validated. These models have been used individually, but the different structures and parameters of the crop simulation models have generated results that are often different. To improve the accuracy and reduce the uncertainties in the use of these models it is recommended the use of the multi-model approach to simulate crop yield, which consists in the ensemble of the outputs of the different models. Therefore, the objectives of this study were to perform the sensitivity analysis, calibrate and validate four cotton crop simulation models in Brazil, considering their performances in an

individual and multi-model approach (ensemble). The cotton yield data, from different cultivars, used in the calibration and evaluation of the models were obtained from the cultivar competition tests conducted by Tropical Melhoramento & Genética (TMG), in five locations in the state of Mato Grosso and one in the state from Bahia, between the 2011/2012 and 2018/2019 growing seasons, and in three different sowing dates. Meteorological data over the growing seasons were obtained from TMG stations installed in the experimental areas. The models were calibrated for 12 cotton cultivars, which represent five water deficit tolerance groups (very low, low, medium, high and very high). The following cotton crop simulation models were evaluated: Agroecological Zone – FAO (AZM-FAO); AquaCrop; CROPGRO-Cotton (DSSAT); and OzCot (APSIM), considering both the individual and multi-model approaches. The sensitivity analysis selected the parameters most related to yield changes, which reduced the number of parameters to be used in the calibration of each model. The simulation models evaluated in this study showed good to excellent performance. The estimated yields presented root mean square error (RMSE) of 366.00 kg ha⁻¹, 483.87 kg ha⁻¹, 619.97 kg ha⁻¹ and 667.97 kg ha⁻¹, respectively, for the AZM-FAO, AquaCrop, CROPGRO-Cotton and OzCot, with d index always greater than or equal to 0.80. The best performance was obtained when the multi-model approach was considered, reducing the RMSE to 230.65 kg ha⁻¹ and improving d index to 0.98. The simulation models evaluated in this study were able to estimate cotton yield when properly calibrated, mainly when using the multi-model approach, which minimized the estimation uncertainties when compared with the individual use of these models.

Key words: *Gossypium hirsutum* L.; Model's calibration and validation; Agroecological Zone model – FAO; AquaCrop, DSSAT, APSIM.

3.1. Introdução

A cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) é responsável pela produção de 90% do algodão no mundo, e representa importante fonte de fibras, alimentos e de matéria-prima para a produção de biodiesel (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; THORP et al., 2014). No cenário internacional, o Brasil é o quarto maior produtor de algodão em caroço (pluma e caroço) do mundo e o segundo maior exportador de fibras de algodão (ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 2020; FAO, 2020). Nos últimos anos, a área colhida com algodão no Brasil aumentou 262% entre 1997 e 2019, enquanto a produtividade do algodão em caroço, no mesmo período, passou de 1323 kg ha⁻¹ em 1997 para 4236 kg ha⁻¹ em 2019, representando um aumento de cerca de 320% (IBGE, 2020).

No Brasil, o algodoeiro é, normalmente, cultivado como cultura de segunda safra, sendo semeada logo após a colheita da soja. Ao longo do ciclo, que em média dura de 120 a 170 dias, a disponibilidade de água no solo vai diminuindo, fazendo com que a cultura fique sujeita à deficiência hídrica, o que compromete a sua produtividade. Mesmo o algodoeiro sendo uma cultura que apresenta certa tolerância à seca quando comparado com os cereais, o déficit hídrico, dependendo de sua duração, intensidade e da fase fenológica em que ocorre, afeta o crescimento, o desenvolvimento, a produtividade e a qualidade das fibras (LOKA; OOSTERHUIS, 2012; ROSOLEM, 2001; ZONTA et al., 2017). Esses fatores levam a uma considerável variabilidade na produtividade do algodoeiro e os modelos de simulação podem ser uma importante ferramenta para avaliação do desempenho dessa cultura sob diferentes condições de clima, solo e manejo.

Os modelos de simulação de produtividade são representações matemáticas da interação do genótipo com o ambiente de produção, sob a influência de diferentes práticas de manejo. Assim, os modelos simulam os processos biofísicos relacionados à assimilação de carbono, as fases fenológicas e a partição de carboidratos, assim como a resposta das culturas aos fatores ambientais (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; VAN ITTERSUM et al., 2013). Em razão disso, os modelos de simulação podem ser utilizados na avaliação dos impactos da variabilidade e das mudanças climáticas nas culturas agrícolas, assim como avaliar possíveis variações da produtividade das culturas em função de ações de manejo (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009), como o uso da irrigação, de diferentes tipos e quantidades de cobertura do solo, alteração de datas de semeadura e duração do ciclo da cultura. Portanto, os modelos de simulação são ferramentas imprescindíveis em estudos agroclimáticos, definindo o potencial produtivo de uma região, os riscos climáticos para a atividade agrícola e as principais causas das perdas de produtividade (*yield gap*).

Os modelos de simulação de culturas apresentam diferentes níveis de complexidade, desde os modelos empíricos, que estabelecem relações matemáticas entre a produtividade e as variáveis ambientais, passando pelos modelos fisiológicos-matemáticos, como o modelo Zona Agroecológica (MZA-FAO) (DOORENBOS; KASSAM, 1979; KASSAM, 1977), que combina a simulação dos processos ecofisiológicos com relações empíricas, até os modelos baseados exclusivamente em processos, como aqueles pertencentes às plataformas AquaCrop (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009), Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer* – DSSAT) (HOOGENBOOM et al., 2012; JONES et al., 2003) e Sistema para Simulação de Produção Agrícola (*Agricultural Production Systems Simulator* – APSIM) (HOLZWORTH et al., 2014; KEATING et al., 2003). Para a cultura do algodoeiro, os modelos mais utilizados são: MZA-FAO (COSTA et al., 2019; SILVA et al., 2019); CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) (PATHAK et al., 2007); AquaCrop (FARAHANI; IZZI; OWEIS, 2009); e OzCot (APSIM) (HEARN, 1994). Apesar disso, são poucos os estudos para cultivares brasileiras de algodão disponíveis na literatura e para um número limitado de cultivares calibradas e apenas para os modelos CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) (FAVA et al., 2019) e MZA-FAO (COSTA et al., 2019).

As simulações de produtividade das culturas têm sido feitas, basicamente, por meio do uso de modelos de forma individualizada (ANDREA et al., 2018; BATTISTI et al., 2020; BOSI et al., 2020; MEIRELES et al., 2003; MONTEIRO; SENTELHAS, 2017; SENTELHAS et al., 2015; VISSES; SENTELHAS; PEREIRA, 2018). Entretanto, as diferentes estruturas e parâmetros dos modelos de simulação de culturas têm gerado resultados muitas vezes discrepantes. Para melhorar a precisão e reduzir as incertezas do uso desses modelos, estudos recentes tem sugerido o emprego da abordagem multi-modelos para a simulação da produtividade de culturas (ASSENG et al., 2013).

A abordagem multi-modelos foi utilizada na estimação da produtividade de algumas culturas no Brasil, como da cana-de-açúcar (DIAS; SENTELHAS, 2017), do eucalipto (ELLI et al., 2019), e da soja (BATTISTI; SENTELHAS; BOOTE, 2017). Para a cultura do algodoeiro, tal abordagem, até o momento, é inexistente no Brasil, assim como em outros países produtores da cultura.

Diante do exposto, os objetivos deste estudo foram: realizar a análise de sensibilidade e calibrar quatro modelos de simulação da produtividade da cultura do algodoeiro no Brasil; e avaliar o desempenho desses modelos quando empregados individualmente e por meio da sua combinação (*ensemble*), pela abordagem multi-modelos.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Dados de produtividade da cultura do algodoeiro

Os dados de produtividade do algodoeiro herbáceo, em caroço, foram obtidos junto aos ensaios de competição de cultivares conduzidos pela empresa Tropical Melhoramento & Genética (TMG), em cinco localidades do estado do Mato Grosso: Campo Novo do Parecis (14°15'55" S; 58°00'17" W; altitude: 664 m); Campo Verde (15°26'15" S; 54°25'26" W; altitude: 625 m); Pedra Preta (16°50'23" S; 54°02'39" W; altitude: 740 m); Sapezal (13°28'58" S; 58°54'34" W; altitude: 570 m); e Sorriso (12°26'33" S; 55°39'20" W; altitude: 414 m), e em Luís Eduardo Magalhães (13°24'31" S; 46°5'51" W; altitude: 927 m), na Bahia (Figura 3.1), durante as safras de 2011/2012 a 2018/2019, em três épocas de semeadura, entre dezembro e fevereiro, e considerando-se 12 cultivares brasileiras de algodão (Tabela 3.1).

Figura 3.1. Localidades nas quais foram conduzidos os ensaios de competição de cultivares da cultura do algodoeiro da empresa Tropical Melhoramento & Genética (TMG) e de onde foram obtidos os dados de produtividade para o presente estudo.

Tabela 3.1. Cultivares de algodoeiro utilizadas neste estudo, suas classificações quanto ao ciclo, ciclo médio, nível de tolerância ao déficit hídrico e empresa detentora.

Cultivar	Classificação do ciclo	Ciclo médio (dias)	Nível de tolerância ao déficit hídrico	Empresa
DP1746B2RF	Tardio	>170	Muito baixa	Deltapine
TMG82WS	Médio-tardio	160 a 170	Muito baixa	TMG
IMA8405GLT	Tardio	>170	Baixa	IMA
TMG42WS	Médio-precoce	130 a 140	Baixa	TMG
DP1536B2RF	Médio-precoce	130 a 140	Média	Deltapine
FM975WS	Tardio	160 a 190	Média	BASF
TMG44B2RF	Médio-precoce	130 a 140	Média	TMG
TMG81WS	Tardio	>170	Média	TMG
FM954GLT	Médio	160 a 190	Alta	BASF
TMG47B2RF	Médio-tardio	160 a 170	Alta	TMG
FM944GL	Médio	160 a 180	Muito alta	BASF
TMG43WS	Médio-precoce	130 a 140	Muito alta	TMG

IMA = Instituto Mato-Grossense do Algodão; TMG = Tropical Melhoramento & Genética.

Fonte: Chiavegato, Salvatierra e Gottardo (2009); BASF (2020); DELTAPINE (2020); IMAMT (2019); TMG (2020).

3.2.2. Modelos de simulação de produtividade

A produtividade do algodoeiro foi simulada por quatro modelos: FAO – Zona Agroecológica (DOORENBOS; KASSAM, 1979; KASSAM, 1977; RAO; SARMA; CHANDER, 1988), denominado como MZA-FAO; FAO – AquaCrop v. 6.1 (EVETT et al., 2012; RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009), denominado como AquaCrop; CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) v. 4.7 (HOOGENBOOM et al., 2012; JONES et al., 2003; PATHAK et al., 2007), denominado como DSSAT; e OzCot (APSIM) v. 7.10 (HEARN, 1994; HOLZWORTH et al., 2014; KEATING et al., 2003), denominado como APSIM, os quais foram empregados tanto individualmente como pela combinação deles (*ensemble*), de acordo com a abordagem multi-modelos. As principais características e abordagens desses modelos são brevemente descritas a seguir.

O MZA-FAO foi desenvolvido por Kassam (1977), baseado na proposição de De Wit (1965), sendo adaptado por Barbieri e Tuon (1992) para uso computacional. Esse modelo estima a produtividade potencial (PP) por meio da simulação da fotossíntese, considerando-se os dados de radiação solar, temperatura e fotoperíodo, e da aplicação de coeficientes de correção relativos ao índice de área foliar (C_{IAF}), à respiração de manutenção (Cr), ao índice de colheita (Cc) e ao índice de umidade da parte colhida (C_{Um}). Uma vez estimada a PP, a produtividade atingível (PA) é obtida pela penalização dessa pela deficiência hídrica que ocorre nas diferentes fases do ciclo, as quais apresentam sensibilidades distintas à falta de água (DOORENBOS; KASSAM, 1979; RAO; SARMA; CHANDER, 1988). A deficiência hídrica ao longo do ciclo da cultura é estimada por meio do balanço hídrico de cultura, o qual emprega o método de Thornthwaite e Mather (1955), que tem como dados de entrada a capacidade de água disponível do solo (CAD); a chuva e a evapotranspiração máxima da cultura (ET_c). Essa última é obtida pelo produto entre a evapotranspiração de referência, estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO (ALLEN et al., 1998), e o coeficiente de cultura (Kc), específico para o algodoeiro. A CAD foi estimada com base nos dados físico-hídricos do solo e na profundidade efetiva do sistema radicular (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). A penalização da PP pela deficiência hídrica leva em consideração cada uma das fases fenológicas por meio do coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico da cultura (K_y), o qual expressa a relação entre a quebra relativa de produtividade ($1 - PA/PP$) e a deficiência hídrica relativa ($1 - E_{Tr}/ET_c$) (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

O modelo AquaCrop, desenvolvido pela FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), teve o módulo para a cultura do algodoeiro inserido apenas na sua versão 4.0. Esse modelo foi elaborado para simular a produção de biomassa e a produtividade das culturas em função da água disponível (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009). O AquaCrop foi desenvolvido a partir da evolução da abordagem de Doorenbos e Kassam (1979), porém

empregando a eficiência do uso da radiação (EUR). Além disso, o modelo considera os seguintes aspectos: (I) trata a evapotranspiração da cultura dividida em transpiração e evaporação de água do solo; (II) modelo simples de crescimento e senescência do dossel baseado nas variáveis ambientais; (III) a produtividade final é obtida em função da biomassa total e do índice de colheita; e (IV) separa os efeitos do estresse hídrico nos seguintes processos – crescimento e senescência do dossel, transpiração da cultura e índice de colheita. O balanço hídrico do AquaCrop se baseia na capacidade de armazenamento de água em cada camada do solo, descrita nos modelos BUDGET (RAES, 1982; RAES et al., 2006) e CROPWAT (SMITH, 1992) (FARAHANI; IZZI; OWEIS, 2009; RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009). As simulações são realizadas em escala diária (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009).

O CROPGRO-*Cotton* foi incorporado à plataforma DSSAT em sua versão 4.5. O modelo simula o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade do algodoeiro, considerando como dados de entrada as condições meteorológicas, características das cultivares, informações do solo e do manejo da cultura (HOOGENBOOM et al., 2012; JONES et al., 2003; PATHAK et al., 2007). Esse modelo foi desenvolvido por Pathak et al. (2007), baseado no modelo CROPGRO-*Soybean*. Esse modelo simula os processos de crescimento e desenvolvimento da cultura do algodoeiro (THORP et al., 2014). Além disso, esse modelo simula o efeito da concentração de CO₂ na fotossíntese e na transpiração, estima a evapotranspiração de referência por meio de dois métodos (Priestley e Taylor (1972) e Penman-Monteith-FAO (ALLEN et al., 1998)), calcula o balanço de água no solo baseado na abordagem do “balde basculante” (*tipping bucket approach*) para um perfil de solo unidirecional (RITCHIE et al., 1998, 2009), além de considerar outros aspectos, como o balanço de nitrogênio (GIJSMAN et al., 2002; GODWIN; SINGH, 1998) e de fósforo no solo e os efeitos do encharcamento e inundação no solo (THORP et al., 2014).

O OzCot faz parte da plataforma APSIM e simula o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade do algodoeiro, considerando dados meteorológicos diários, características das cultivares, assim como informações do solo e manejo da cultura (HEARN, 1994; HEARN; ROZA, 1985; HOLZWORTH et al., 2014; KEATING et al., 2003; THORP et al., 2014). Esse modelo simula processos de crescimento e desenvolvimento da cultura do algodoeiro, como fenologia, assimilação potencial do carbono, respiração, particionamento de carboidratos, componentes de produção e estresses hídricos, por nitrogênio e térmicos (THORP et al., 2014). Além disso, esse modelo simula processos atmosféricos e do solo, como evapotranspiração e balanço de água no solo baseado na abordagem de Ritchie (RITCHIE, 1972), com abordagem estática e empírica que prediz o potencial de absorção de nitrogênio e os efeitos negativos do encharcamento no solo (THORP et al., 2014). Os principais resultados gerados pelo modelo OzCot incluem as estimativas

de produtividade de fibras e do algodão (em caroço), datas do início da ocorrência de distintos estádios fenológicos, IAF máximo, uso do nitrogênio e métricas do balanço hídrico, como eficiência do uso da água pela cultura (THORP et al., 2014).

Esses modelos de simulação da produtividade do algodoeiro foram selecionados devido à sua importância internacional e por atender aos atributos desejados para seus usos, como a simulação em escala diária, simulação com diversos tipos de práticas de manejo, simulação de processos fisiológicos fundamentais, uso mínimo de coeficientes relacionados à genética da cultura, proximidade dos resultados simulados em relação aos dados reais, e facilidade de uso e acesso ao modelo (VAN ITTERSUM et al., 2013). Para a realização das simulações com esses modelos, o teor de água inicial foi definido com base no balanço hídrico iniciado dois anos antes da primeira semeadura, considerando-se a estação de cultivo anterior como de pousio.

3.2.3. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos das localidades empregadas neste estudo foram obtidos das estações meteorológicas automáticas, modelo HOBO U-30-NRC, instaladas nas áreas experimentais da empresa TMG. Por meio dessas estações, foram obtidos os dados diários das seguintes variáveis: chuva (P); temperatura máxima (T_{max}); temperatura mínima (T_{min}); umidade relativa (UR); e radiação fotossinteticamente ativa (RFA). A chuva foi obtida por meio de pluviômetros de báscula, as temperaturas e a umidade relativa foram registradas por uma sonda instalada no interior de um abrigo multiplacas a 2 m de altura, enquanto a radiação fotossinteticamente ativa foi obtida por um sensor quântico de fotodiodo de silício. A RFA foi empregada na estimativa da radiação solar global (Q_g), por meio da Eq. 3.1. Posteriormente, a Q_g foi empregada na estimativa da insolação (n), por meio da equação de Angström-Preseott (Eq. 3.2), a qual emprega os dados de radiação solar no topo da atmosfera (Q_o) e fotoperíodo (N) (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002):

$$Q_g = 0,037584 \times RFA \quad (3.1)$$

em que: Q_g é dada em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ e RFA em $mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$.

$$n = \frac{\left(\frac{Q_g}{Q_o}\right)^{0,25}}{0,5} \times N \quad (3.2)$$

em que: Q_g e Q_o são dadas em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$; e n e N em horas. Tanto Q_o quanto N foram estimados por meio de equações astronômicas (ALLEN et al., 1998), as quais empregam como dados de entrada a latitude do local e o dia do ano, de 1 a 365. Para o preenchimento de possíveis falhas nas séries de dados, assim como para a estimação dos dados de velocidade do vento, foi utilizado o banco de dados meteorológicos em grade ($0,25 \times 0,25^\circ$), disponibilizado por Xavier et al. (2016).

3.2.4. Dados de solo

Os dados de solo das áreas experimentais foram disponibilizados pela empresa TMG. Os solos foram classificados como Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) conforme Santos et al. (2018). As características físico-químicas e hídricas desses solos são apresentadas na Tabela 3.2. Os dados de solo requeridos pelos modelos utilizados neste estudo foram: profundidade; porcentagens de areia, silte e argila; textura; porcentagem de carbono orgânico (Corg); pH em água (pH); conteúdo de água na capacidade de campo (CC), no ponto de murcha permanente (PMP), e no ponto de saturação do solo; densidade do solo; e capacidade de troca catiônica (CTC). Além desses dados, cada modelo possuía suas especificidades no uso de outras variáveis de solo.

Tabela 3.2. Características dos solos das áreas experimentais da empresa Tropical Melhoramento & Genética (TMG), onde os ensaios de competição de cultivares foram realizados nos estados do Mato Grosso e da Bahia.

Local	Areia	Silte (%)	Argila	Textura	Corg (%)	pH	CC (%)	PMP	CTC (cmolc kg^{-1})
CNP, MT	25,5	9,6	64,9	Argilosa	1,5	5,9	25,8	17,1	7,8
CVE, MT	22,8	10,1	67,1	Argilosa	1,7	5,5	26,6	17,9	9,1
LEM, BA	27,5	8,9	63,6	Argilosa	1,6	5,7	25,1	16,4	8,2
PPR, MT	27,5	8,9	63,6	Argilosa	1,6	5,7	25,1	16,4	8,2
SAP, MT	27,5	8,9	63,6	Argilosa	1,6	5,7	25,1	16,4	8,2
SOR, MT	34,3	6,8	58,8	Argilosa	1,4	5,8	23,1	14,4	7,6

CNP = Campo Novo do Parecis; CVE = Campo Verde; LEM = Luís Eduardo Magalhães; PPR = Pedra Preta; SAP = Sapezal; SOR = Sorriso; MT = Mato Grosso; BA = Bahia; Corg = carbono orgânico; pH = pH em água; CC = conteúdo de água na capacidade de campo; PMP = conteúdo de água no ponto de murcha permanente; CTC = capacidade de troca catiônica.

Os dados de solos foram fornecidos apenas para as localidades de Campo Novo do Parecis, Campo Verde e Sorriso; para as demais localidades foi utilizado o valor médio das características granulométricas desses solos (Tabela 3.2). Este procedimento foi adotado devido os solos dessas localidades se assemelharem entre si e serem classificados como Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho Escuro e Latossolo Vermelho Amarelo, para Luís Eduardo Magalhães, Pedra Preta e Sapezal, respectivamente (SANTOS et al., 2011).

Para o MZA-FAO, a capacidade de água disponível (CAD) do solo das áreas experimentais foi de 42 mm, conforme as características predominantes apresentadas na Tabela

3.2. Para o modelo CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) foi criado um perfil de solo para cada área experimental baseado em um perfil pré-estabelecido na plataforma considerando-se as texturas apresentadas na Tabela 3.2. Nesse perfil foram inseridas as seguintes informações, além daquelas citadas acima: classificação do solo; condutividade hidráulica em solo saturado (cm h^{-1}); e fator de crescimento de raiz. Já no modelo OzCot (APSIM), foram inseridas as seguintes informações de solo, além daquelas citadas acima: cálcio (cmolc kg^{-1}); magnésio (cmolc kg^{-1}); potássio (cmolc kg^{-1}); alumínio (cmolc kg^{-1}); boro (mg kg^{-1}); e manganês (mg kg^{-1}). Mais detalhes sobre o perfil dos solos obtidos junto a TMG podem ser encontrados no APÊNDICE A3.

Em todos os modelos utilizados, os dados de CC e do PMP foram obtidos por meio de funções de pedotransferência devidamente calibradas para os locais de estudo (CAMPELO JUNIOR et al., 2014), considerando a profundidade efetiva do sistema radicular de 0,40 m (ANDRADE JÚNIOR et al., 2010; SANTOS et al., 2016; SILVA et al., 2009). A densidade global do solo foi estimada conforme sua textura, sendo a mesma com valor igual ($1,2 \text{ g cm}^{-3}$) para todas as localidades (LIBARDI, 2012).

3.2.5. Etapas da calibração dos modelos de simulação da cultura do algodoeiro

3.2.5.1. Análise de sensibilidade dos modelos

O processo de calibração de modelos de simulação de produtividade de culturas envolve a modificação dos parâmetros a fim de se obter o melhor ajuste das variáveis estimadas pelo modelo com as condições reais. Por isso, é importante que a calibração utilize um número mínimo de parâmetros (VAN ITTERSUM et al., 2013), para facilitar esse processo. Uma técnica adequada para esse fim é a análise de sensibilidade.

Essa análise foi feita para todos os modelos de simulação de culturas utilizados neste estudo, exceto para o MZA-FAO. Nessa análise, os parâmetros padrões dos modelos para a cultura do algodoeiro presentes no AquaCrop, DSSAT e APSIM foram alterados nas seguintes proporções: +10%, +5%, -5%, -10%, para verificar a resposta da produtividade a essas variações. Para essa análise de sensibilidade foram selecionadas aleatoriamente nove condições que representaram a interação entre diferentes locais e datas de semeadura em distintas épocas (APÊNDICE B3). A proporção igual a zero representou os parâmetros padrões dos modelos analisados. Essas proporções de variação também foram utilizadas em análise de sensibilidade do modelo AquaCrop para a cultura do algodoeiro na China (LI; YU; ZHAO, 2019).

Os parâmetros analisados foram aqueles mais utilizados nas calibrações dos modelos AquaCrop (FARAHANI; IZZI; OWEIS, 2009; GARCÍA-VILA et al., 2009; HUSSEIN; JANAT; YAKOUB, 2011; LI; YU; ZHAO, 2019; TAN et al., 2018; TSAKMAKIS et al., 2019), DSSAT (ADHIKARI et al., 2016; AMIN et al., 2017; CAMMARANO et al., 2012; FAVA et al., 2019; LI et al., 2019; LOISON et al., 2017; PATHAK et al., 2007; RAHMAN et al., 2018), e APSIM (YANG et al., 2014) para a cultura do algodoeiro, encontrados na literatura. Os parâmetros selecionados para o processo de calibração dos modelos foram aqueles que mais influenciaram a produtividade, quando alterados em relação ao valor padrão.

3.2.5.2. Calibração dos modelos

Para a calibração dos modelos de simulação da cultura do algodoeiro foram utilizados dados de produtividade de seis safras (2011/2012 a 2016/2017), cinco locais (Campo Novo do Parecis, Campo Verde, Pedra Preta, Sapezal e Sorriso, MT – Figura 3.1), e três épocas de semeadura (dezembro a fevereiro), correspondendo a 75% dos dados. O processo de calibração foi realizado por cultivar. Foram selecionadas aleatoriamente 12 cultivares da cultura do algodoeiro representantes de cada grupo de nível de tolerância ao déficit hídrico (muito baixa (DP1746B2RF e TMG82WS), baixa (IMA8405GLT e TMG42WS), média (DP1536B2RF, FM975WS, TMG44B2RF e TMG81WS), alta (FM954GLT e TMG47B2RF) e muito alta (FM944GL e TMG43WS)), apresentados no Capítulo 2 desta tese. Todas as cultivares selecionadas eram geneticamente modificadas, pois representam a tecnologia predominante entre as cultivares brasileiras de algodão.

O MZA-FAO foi calibrado considerando um cenário de aumento de 10% no índice de área foliar (IAF) e no coeficiente da cultura (Kc) do algodoeiro adaptado de Bezerra et al. (2012). Diante deste cenário, os valores de Ky foram calibrados, considerando cada fase fenológica da cultura do algodoeiro (estabelecimento, vegetativa, florescimento, formação dos frutos e maturação), conforme Doorenbos e Kassam (1979). Mais detalhes sobre a calibração do MZA-FAO e os valores calibrados de Ky são apresentados no Capítulo 2 desta tese. Para os demais modelos, as calibrações se deram a partir das modificações dos parâmetros das cultivares padrão de cada modelo (DP555 para DSSAT e S71BR para APSIM), considerando o ciclo total da cultura. O AquaCrop não possui uma cultivar padrão, por isso, apenas os parâmetros gerais foram alterados para a calibração do modelo. Seguindo os resultados da análise de sensibilidade, os ajustes foram realizados apenas nos parâmetros selecionados para melhorar as saídas dos modelos. A calibração

seguiu a ordem decrescente de sensibilidade dos parâmetros selecionados. Para os demais parâmetros foram utilizados aqueles presentes nos modelos padrões da cultura.

As calibrações foram realizadas sem exceder os limites de cada parâmetro apresentado na literatura para os modelos AquaCrop (FARAHANI; IZZI; OWEIS, 2009; GARCÍA-VILA et al., 2009; HUSSEIN; JANAT; YAKOUB, 2011; LI; YU; ZHAO, 2019; TAN et al., 2018; TSAKMAKIS et al., 2019) e DSSAT (ADHIKARI et al., 2016; AMIN et al., 2017; CAMMARANO et al., 2012; FAVA et al., 2019; LI et al., 2019; LOISON et al., 2017; PATHAK et al., 2007; RAHMAN et al., 2018). Para o modelo APSIM, alguns parâmetros excederam os limites apresentados por Yang et al. (2014), porém, ainda dentro de uma certa margem de segurança. Para as calibrações dos modelos AquaCrop, DSSAT e APSIM, inicialmente foram ajustados os parâmetros do ciclo total da cultura e, em seguida, os da produtividade a fim de se obter a menor diferença entre os valores simulados e observados nos ensaios de competição de cultivares.

3.2.6. Validação dos modelos

Para validação dos modelos de simulação da cultura do algodoeiro foram utilizados dados independentes das safras 2015/2016, 2017/2018 e 2018/2019, dos cinco locais anteriormente citados, incluindo-se ainda os dados de Luís Eduardo Magalhães, BA (Figura 3.1), o que representou 25% do total de dados de produtividade do algodoeiro herbáceo (em caroço) dos ensaios de competição de cultivares.

3.2.7. Abordagem multi-modelos

Com todos os modelos calibrados e validados, uma análise multi-modelos foi realizada usando a média aritmética da produtividade estimada do algodão (em caroço) dos quatro modelos. Essa abordagem tem por objetivo melhorar a precisão e acurácia das estimativas, reduzindo, assim, as incertezas associadas ao uso desses modelos de forma individual (ASSENGET al., 2013).

3.2.8. Avaliação de desempenho dos modelos

A avaliação de desempenho estatístico dos modelos de simulação de produtividade do algodoeiro nas fases de calibração e validação nas abordagens individuais e multi-modelos foi realizada por meio dos seguintes índices e erros: coeficiente de correlação de Pearson (r); coeficiente de determinação (R^2); índice de concordância (d) (WILLMOTT et al., 1985); índice de

confiança (C) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997); erro médio (EM); erro absoluto médio (EAM) e sua porcentagem (EAMP); raiz quadrada do erro médio (RMSE); e o índice de eficiência (E) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), como seguem:

$$R^2 = r^2 \quad (3.3)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Est_i - Obs_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|Est_i - Obs_m| + |Obs_i - Obs_m|)^2} \quad (3.4)$$

$$C = r \times d \quad (3.5)$$

$$EM = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (Est_i - Obs_i) \quad (3.6)$$

$$EAM = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (|Est_i - Obs_i|) \quad (3.7)$$

$$EAMP = \left[\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Est_i - Obs_i|}{Obs_i} \right) \right] \times 100 \quad (3.8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (Est_i - Obs_i)^2} \quad (3.9)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Est_i - Obs_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Obs_i - Obs_m)^2} \quad (3.10)$$

em que: Est_i e Obs_i são as produtividades estimadas e observadas de algodão em caroço, em kg ha⁻¹, respectivamente; Obs_m é a produtividade média observada de algodão em caroço, em kg ha⁻¹; i é representa o enésimo dado do banco; e n é o número total de dados avaliados.

3.3. Resultados e discussão

3.3.1. Análise de sensibilidade dos modelos

Para o modelo AquaCrop foram testados 26 parâmetros (APÊNDICE C3), sendo selecionados apenas 13 deles, em ordem decrescente de sensibilidade: SE-MA; HIO; WP*; $K_{cTr\ x}$; %WP*; CGC; CCx; SE-SN; SE-FL; SE-EM; TB; PEmaxR; e $p-sto_{upper}$ (Tabela 3.3), já que cada um deles apresentou algum nível de variação da produtividade, em porcentagem, em função de sua variação. O parâmetro que mais teve efeito sobre a produtividade entre os 13 selecionados foi o SE-MA, que representa o número de dias da semeadura à maturidade (duração do ciclo da cultura). Além desse, o $K_{cTr\ x}$, que representa o coeficiente de cultura quando o dossel está completo, antes da senescência; o WP*, que é produtividade da água normalizada para a ETo e a concentração de CO₂ na atmosfera, e o HIO, que é índice de colheita de referência, também se mostraram efetivos na determinação da produtividade do algodoeiro por esse modelo (Tabela 3.3).

Tabela 3.3. Sensibilidade dos modelos AquaCrop e DSSAT para a estimação da produtividade do algodoeiro em relação à variação percentual ($\pm 5\%$ e $\pm 10\%$) dos parâmetros selecionados para cada um deles. Os valores apresentados para cada parâmetro representam a variação percentual da produtividade estimada em relação ao valor considerado como padrão (variação 0).

Parâmetros	Descrição dos parâmetros	10%	5%	0	-5%	-10%
AquaCrop						
TB	Temperatura basal superior (°C)	0	0	0	0	-3
p-Sto _{upper}	Fator de depleção de água no solo para controle estomático	0	0	0	0	-1
K _{c,Tr x}	Coefficiente de cultura quando o dossel está completo, antes da senescência	9	5	0	-5	-10
SE-EM	Número de dias da semeadura à emergência	-1	-1	0	1	1
SE-SN	Número de dias da semeadura ao início da senescência	3	1	0	-1	-3
SE-MA	Número de dias da semeadura à maturidade (duração do ciclo da cultura)	8	5	0	-11	-24
SE-FL	Número de dias da semeadura à floração	0	1	0	-1	-2
HIo	Índice de colheita de referência (%)	11	6	0	-6	-9
PEMaxR	Profundidade efetiva máxima de raízes (m)	0	0	0	0	-1
CGC	Coefficiente de crescimento do dossel: Aumento da cobertura do dossel (em fração da cobertura de solo por dia)	4	2	0	-2	-5
CCx	Cobertura máxima do dossel (em fração de cobertura do solo)	-1	1	0	-2	-5
WP*	Produtividade da água normalizada para a ETo e CO ₂ (kg m ⁻²)	10	5	0	-5	-10
%WP*	Produtividade da água normalizada para a ETo e CO ₂ durante a formação da produção da cultura	7	4	0	-3	-8
DSSAT						
EM-FL	Tempo entre a emergência e o início do florescimento (dias fototérmicos)	-2	0	0	0	0
FL-SH	Tempo entre o florescimento e o início da frutificação (dias fototérmicos)	2	1	0	0	0
FL-SD	Tempo entre o florescimento e a abertura do primeiro capulho (dias fototérmicos)	1	0	0	1	2
SD-PM	Tempo entre a abertura do primeiro capulho e a maturidade fisiológica (dias fototérmicos)	2	1	0	-1	-3
LFMAX	Taxa máxima de fotossíntese foliar (mg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	9	5	0	-5	-11
SLAVR	Área foliar específica (cm ² g ⁻¹)	1	1	0	-1	-1
SIZLF	Tamanho máximo das folhas (cm ²)	2	1	0	-1	-3
XFRT	Fração máxima do crescimento diário particionado em sementes + casca (g)	3	2	0	-2	-4
PODUR	Tempo para atingir a carga máxima dos capulhos (dias fototérmicos)	0	0	0	0	-1
THRSH	Índice de colheita	5	3	0	-3	-7
SDLIP	Fração de óleo nas sementes (g óleo g semente ⁻¹)	-1	0	0	0	1

Os valores de referência (intervalos citados na literatura) e os calibrados (para as diferentes cultivares brasileiras do algodoeiro) cada um dos parâmetros listados para o modelo AquaCrop são apresentados na Tabela 3.4, estando todos eles dentro dos limites apresentados na literatura. Esses parâmetros também foram utilizados para calibração do modelo AquaCrop em outros estudos (FARAHANI; IZZI; OWEIS, 2009; GARCÍA-VILA et al., 2009; HUSSEIN; JANAT; YAKOUB,

2011; LI; YU; ZHAO, 2019; TAN et al., 2018; TSAKMAKIS et al., 2019). Os parâmetros calibrados individualmente para cada cultivar pelo modelo AquaCrop, em abordagem individual e multi-modelos podem ser encontrados no APÊNDICE D3.

Tabela 3.4. Parâmetros dos modelos Aquacrop, DSSAT e APSIM com seus respectivos valores de referência e calibrados para as diferentes cultivares brasileiras de algodoeiro.

Parâmetros	Referência	Calibrado
AquaCrop ⁽¹⁾		
SE-MA (dias)	147 a 174	170
H _{lo} (%)	25 a 53	32 a 51
WP* (g m ⁻²)	15 a 20	15
K _{cTr x}	1,1	1,1
%WP*	70 a 72	70
CGC	0,06712 a 0,10500	0,06712
CCx	0,90 a 0,98	0,90
SE-SN (dias)	109 a 144	150
SE-FL (dias)	55 a 72	60
SE-EM (dias)	7 a 14	8
TB (°C)	35	35
PEMaxR (m)	0,80 a 2,00	0,80 a 1,05
p-Sto _{upper}	0,35 a 0,75	0,75
DSSAT ⁽²⁾		
LFMAX (mg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	0,74 a 3,00	1,38 a 2,76
THRSH	40,0 a 85,0	70,0 a 80,0
XFRT (g)	0,60 a 1,30	0,86 a 1,05
SD-PM (dias fototérmicos)	27,68 a 84,00	58,00 a 72,00
SIZLF (cm ²)	180,0 a 350,0	300,5 a 310,0
FL-SD (dias fototérmicos)	11,7 a 23,0	11,7 a 16,5
SLAVR (cm ² g ⁻¹)	136 a 470	170 a 178
FL-SH (dias fototérmicos)	6,0 a 14,0	10,0 a 12,5
EM-FL (dias fototérmicos)	27,9 a 54,2	36,5 a 38,0
PODUR (dias fototérmicos)	2,9 a 14,7	10,0 a 14,7
SDLIP (g óleo g semente ⁻¹)	0,120	0,120
APSIM ⁽³⁾		
FRUDD8 (°C dia)	1080 a 1190	1059 a 1079
DDISQ (°C dia)	200 a 400	402
SCBOLL (g sementes g capulho ⁻¹)	5,4 a 6,2	5,10 a 9,70
FLAI	0,67 a 0,90	0,89 a 1,68
FRUDD3 (°C dia)	329 a 390	305 a 307
FRUDD2 (°C dia)	169 a 190	164 a 279

Fonte: ⁽¹⁾Farahani; Izzi; Oweis (2009); ⁽¹⁾García-Vila et al. (2009); ⁽¹⁾Hussein; Janat; Yakoub (2011); ⁽¹⁾Li; Yu; Zhao (2019); ⁽¹⁾Tan et al. (2018); ⁽¹⁾Tsakmakis et al. (2019); ⁽²⁾Adhikari et al. (2016); ⁽²⁾Amin et al. (2017); ⁽²⁾Amouzou et al. (2018); ⁽²⁾Cammarano et al. (2012); ⁽²⁾Fava et al. (2019); ⁽²⁾Li et al. (2019); ⁽²⁾Loison et al. (2017); ⁽²⁾Pathak et al. (2007); ⁽²⁾Rahman et al. (2018); ⁽³⁾Yang et al. (2014)

Para o modelo DSSAT foram testados 16 parâmetros (APÊNDICE C3), sendo selecionados 11 deles, de acordo com a ordem decrescente de sensibilidade: LFMAX; THRSH; XFRT; SD-PM; SIZLF; FL-SD; SLAVR; FL-SH; EM-FL; PODUR; e SDLIP (Tabela 3.3). Para esse modelo, os parâmetros que mais afetaram a produtividade do algodoeiro ao serem alterados foram o LFMAX, que representa a taxa máxima de fotossíntese foliar, e o THRSH, que é o índice de colheita da cultura. Os valores de referência e os calibrados, para as cultivares brasileiras de algodão, dos 11 parâmetros do modelo DSSAT são apresentados na Tabela 3.4, estando todos eles dentro dos limites apresentados em outros estudos com a cultura. Esses parâmetros também foram utilizados para calibração do modelo DSSAT em outros estudos (ADHIKARI et al., 2016; AMIN et al., 2017; CAMMARANO et al., 2012; FAVA et al., 2019; LI et al., 2019; LOISON et al., 2017; PATHAK et al., 2007; RAHMAN et al., 2018).

No modelo APSIM foram testados 12 parâmetros (APÊNDICE C3), sendo selecionados apenas seis deles, considerando a ordem decrescente de sensibilidade: FRUDD8; DDISQ; SCBOLL; FLAI; FRUDD3; e FRUDD2 (Tabela 3.5). Os dois parâmetros de maior influência na produtividade do algodoeiro pelo modelo APSIM foram o tempo térmico acumulado para a fase 8 de crescimento e desenvolvimento do fruto (FRUDD8) e o tempo térmico entre a emergência e o aparecimento da primeira flor (DDISQ). Os valores de referência e os calibrados dos principais parâmetros utilizados pelo modelo APSIM são apresentados na Tabela 3.4. Esses parâmetros também foram utilizados para calibração do modelo APSIM por Yang et al. (2014). Ao contrário do observado para os demais modelos, neste caso, alguns parâmetros excederam os valores reportado por Yang et al. (2014), como foi o caso do DDISQ, SCBOLL, FLAI e FRUDD2, o que se deve, provavelmente, aos poucos estudos feitos com o OzCot (APSIM) para cultivares brasileiras. O modelo OzCot (APSIM) divide o período de crescimento e desenvolvimento do fruto em 8 fases e essas são contabilizadas pelo tempo térmico acumulado nos parâmetros FRUDD (FRUDD1 a FRUDD8).

Tabela 3.5. Sensibilidade do modelo APSIM para a estimação da produtividade do algodoeiro em relação à variação percentual ($\pm 5\%$ e $\pm 10\%$) dos parâmetros selecionados para cada um deles. Os valores apresentados para cada parâmetro representam a variação percentual da produtividade estimada em relação ao valor considerado como padrão (variação 0).

Parâmetros	Descrição dos parâmetros	10%	5%	0	-5%	-10%
APSIM						
SCBOLL	Massa de sementes de algodão por capulho (g sementes g capulho ⁻¹)	2	6	0	-1	-2
FLAI	Razão modificadora da área foliar	1	1	0	-1	-1
DDISQ	Tempo térmico entre a emergência e o aparecimento da primeira flor (°C dia)	-4	-3	0	2	3
FRUDD2	Tempo térmico acumulado para a fase 2 de crescimento e desenvolvimento do fruto (°C dia)	1	0	0	-1	-1
FRUDD3	Tempo térmico acumulado para a fase 3 de crescimento e desenvolvimento do fruto (°C dia)	1	2	0	0	0
FRUDD8	Tempo térmico acumulado para a fase 8 de crescimento e desenvolvimento do fruto (°C dia)	-3	-2	0	4	4

3.3.2. Desempenho de modelos individuais de simulação da produtividade do algodoeiro – Fase de calibração

O desempenho dos modelos de simulação da cultura do algodoeiro para a estimação da produtividade, na fase de calibração, foi bastante satisfatório. O MZA-FAO apresentou desempenho ótimo, com boa precisão ($R^2 = 0,95$) e exatidão ($d = 0,99$), apresentando ainda um alto nível de confiança ($C = 0,96$) (Tabela 3.6). O modelo DSSAT apresentou desempenho muito bom, com boa precisão ($R^2 = 0,77$) e alta exatidão ($d = 0,90$), demonstrando, ainda, uma confiança elevada ($C = 0,79$), o segundo maior valor quando avaliados os modelos individualmente. Já os modelos AquaCrop e APSIM apresentaram desempenho bom, com precisão regular ($R^2 = 0,69$ e $0,67$, respectivamente) e elevada exatidão ($d = 0,91$ e $0,89$, respectivamente), resultando em um índice de confiança (C) razoável, de $0,75$ e $0,73$, respectivamente (Tabela 3.6).

Os erros apresentados pelos modelos foram baixos, considerando-se a magnitude das produtividades. Os EAMs foram de $129,14 \text{ kg ha}^{-1}$, $312,13 \text{ kg ha}^{-1}$, $376,07 \text{ kg ha}^{-1}$, e $376,70 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente para os modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e APSIM, correspondendo a EAMPs de $2,76\%$, $6,67\%$, $8,03\%$, e $8,05\%$ (Tabela 3.6). A tendência dos modelos MZA-FAO e APSIM foi de gerar leves subestimativas, com o EM de $-10,88 \text{ kg ha}^{-1}$ e de $-62,18 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente. Por outro lado, os modelos AquaCrop e DSSAT mostraram uma leve tendência de superestimar a produtividade do algodoeiro, com EM de $76,84 \text{ kg ha}^{-1}$ e $14,96 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente. As produtividades médias estimadas foram $4670,90 \text{ kg ha}^{-1}$, $4758,63 \text{ kg ha}^{-1}$, $4696,75 \text{ kg ha}^{-1}$ e $4619,61 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente para os modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e APSIM, enquanto as produtividades observadas resultaram em uma média de $4681,79 \text{ kg ha}^{-1}$. As eficiências dos modelos em estimar a produtividade do algodoeiro seguiu a seguinte

ordem decrescente: MZA-FAO ($E = 0,95$); AquaCrop ($E = 0,64$); APSIM ($E = 0,52$); e DSSAT ($E = 0,42$).

Tabela 3.6. Performance estatística dos modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT, APSIM e a combinação dos anteriores, na abordagem multi-modelos, nas fases de calibração e validação para a cultura do algodoeiro.

Índices	Modelos				
	MZA-FAO	AquaCrop	DSSAT	APSIM	Multi-modelos
Calibração (n = 24)					
r	0,97	0,83	0,88	0,82	0,96
R ²	0,95	0,69	0,77	0,67	0,92
d	0,99	0,91	0,90	0,89	0,98
C	0,96	0,75	0,79	0,73	0,94
EM (kg ha ⁻¹)	-10,88	76,84	14,96	-62,18	-4,69
EAM (kg ha ⁻¹)	129,14	312,13	376,07	376,70	158,89
EAMP (%)	2,76	6,67	8,03	8,05	3,39
RMSE (kg ha ⁻¹)	147,13	382,43	488,87	445,34	193,88
E	0,95	0,64	0,42	0,52	0,91
Validação (n = 8)					
r	0,97	0,96	0,93	0,86	0,97
R ²	0,95	0,92	0,86	0,75	0,94
d	0,94	0,94	0,92	0,80	0,98
C	0,92	0,90	0,85	0,69	0,95
EM (kg ha ⁻¹)	-226,35	-368,54	-57,29	427,88	56,08
EAM (kg ha ⁻¹)	295,99	368,55	488,59	544,06	215,61
EAMP (%)	7,29	9,07	12,03	13,39	5,31
RMSE (kg ha ⁻¹)	366,00	483,87	619,97	667,97	230,65
E	0,83	0,70	0,51	0,43	0,93

n = número de dados; r = coeficiente de correlação de Pearson; R² = coeficiente de determinação; d = índice de concordância (WILLMOTT et al., 1985); C = índice de confiança (CAMARGO; SENTELHAS, 1997); EM = erro médio; EAM = erro absoluto médio; EAMP = erro absoluto médio em porcentagem; RMSE = raiz quadrada do erro médio; E = índice de eficiência de modelagem (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

A Figura 3.2 apresenta a relação entre as produtividades observadas e estimadas pelos modelos MZA-FAO (Figura 3.2A), AquaCrop (Figura 3.2B), DSSAT (Figura 3.2C) e APSIM (Figura 3.2D), na fase de calibração. Os resultados mostraram que os modelos tiveram desempenho satisfatório, captando a variabilidade da produtividade do algodoeiro observada a campo. Assim, esses modelos podem ser utilizados em estudos para avaliação dos efeitos da variabilidade e das mudanças climáticas na produtividade da cultura do algodoeiro no Brasil.

Figura 3.2. Relação entre as produtividades observadas (PO) e estimadas (PE) pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), DSSAT (C), APSIM (D) e pela abordagem multi-modelos (E) para a cultura do algodoeiro, na fase de calibração.

3.3.3. Desempenho de modelos individuais de simulação de produtividade do algodoeiro – Fase de validação

Os resultados do processo de validação dos modelos mostraram que o MZA-FAO e o AquaCrop apresentaram desempenho ótimo, com boa precisão ($R^2 = 0,95$ e $0,92$, respectivamente) e exatidão ($d = 0,94$ e $0,94$, respectivamente) (Tabela 3.6). O modelo DSSAT teve desempenho muito bom, com boa precisão ($R^2 = 0,86$) e alta exatidão ($d = 0,92$), enquanto o modelo APSIM

apresentou o pior desempenho em comparação aos demais, porém, ainda com razoável precisão ($R^2 = 0,75$) e boa exatidão ($d = 0,80$). A Figura 3.3 apresenta a relação entre as produtividades observadas e estimadas pelos modelos MZA-FAO (Figura 3.3A), AquaCrop (Figura 3.3B), DSSAT (Figura 3.3C) e APSIM (Figura 3.3D), na fase de validação.

Figura 3.3. Relação entre as produtividades observadas (PO) e estimadas (PE) pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), DSSAT (C), APSIM (D) e pela abordagem multi-modelos (E) para a cultura do algodoeiro, na fase de validação.

Os resultados mostraram que os modelos foram bem calibrados para simular a produtividade do algodoeiro no Brasil, apesar de algumas variações nos índices estatísticos. Na fase

de validação, os modelos apresentaram EAM de 295,99 kg ha⁻¹, 368,55 kg ha⁻¹, 488,59 kg ha⁻¹, e 544,06 kg ha⁻¹, correspondendo a EAMP de 7,29%, 9,07%, 12,03%, e 13,39%, respectivamente para os modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e APSIM (Tabela 3.6). Além disso, houve uma tendência de subestimativas para os modelos MZA-FAO, AquaCrop e DSSAT, com o EM de -226,35 kg ha⁻¹, -368,54 kg ha⁻¹ e -57,29 kg ha⁻¹. Já o modelo APSIM apresentou superestimativas, com EM da ordem de 427,88 kg ha⁻¹. As eficiências dos modelos em estimar a produtividade do algodoeiro seguiu basicamente a mesma ordem da fase de calibração, com exceção para a inversão entre os modelos APSIM que passou a ter uma menor eficiência do que o modelo DSSAT.

Os desempenhos dos modelos obtidos no presente estudo foram semelhantes aos encontrados na literatura. Para o modelo AquaCrop, García-Vila et al. (2009) obtiveram desempenho ótimo ($R^2 = 0,96$; $d = 0,97$), para estimativa da produtividade do algodoeiro, cultivar Coker-310, em cultivos irrigados e de sequeiro na Espanha. Tan et al. (2018) obtiveram desempenho bom ($R^2 = 0,69$; $d = 0,82$), em cultivo irrigado na China. Farahani, Izzi e Oweis (2009) encontraram EAMP de 9%, com boa precisão do modelo ($R^2 = 0,98$), para a cultivar Aleppo-118, em cultivo com irrigação plena e déficit de irrigação na Síria.

Para o DSSAT, Pathak et al. (2012) calibraram o modelo para simulação da produtividade do algodoeiro e obtiveram RMSE variando entre 497 kg ha⁻¹ e 1842 kg ha⁻¹, e exatidão (d) de 0,53 a 0,98, para a cultivar DeltaPine 555 (DP555), em cultivo irrigado nos Estados Unidos. Li et al. (2019b) encontraram EAMP entre de 0,08 a 2,87% para a cultivar Xinluzhong 55, em cultivo irrigado, na China. Fava et al. (2019) ao calibrarem o modelo para número de capulhos obtiveram desempenho muito bom ($R^2 = 0,81$; $d = 0,88$) para a cultivar CNPA ITA 90, em cultivo de sequeiro no Brasil. Já Gaydon et al. (2017) encontraram RMSE de 303 kg ha⁻¹ em doze países da Ásia quando empregaram o modelo APSIM para estimação das produtividades. Para MZA-FAO não foram encontrados resultados sobre o desempenho desse modelo para estimar a produtividade do algodoeiro, porém, ele já vem sendo aplicado no Brasil, demonstrando ser uma ferramenta com potencial para aplicações práticas (COSTA et al., 2019; SILVA et al., 2019).

3.3.4. Desempenho da abordagem multi-modelos

As estimativas de produtividade do algodão em caroço foram melhoradas quando se utilizou o conjunto de modelos, ou seja, a abordagem multi-modelos. Essa abordagem resultou em melhor desempenho estatístico do que qualquer um dos modelos de simulação de produtividade do algodoeiro empregados individualmente, especialmente na fase de validação (Tabela 3.6). A relação entre as produtividades observadas e estimadas com a abordagem multi-modelos é

apresentada na Figura 3.2E, para a fase de calibração, e na Figura 3.3E, para a fase de validação. O EAM obtido com essa abordagem na fase de validação foi de 215,61 kg ha⁻¹, correspondendo a EAMP de 5,31%, os menores entre todas as estimativas. A abordagem multi-modelos resultou em uma leve tendência de superestimação, com EM de 56,08 kg ha⁻¹. Assim, observa-se que a abordagem multi-modelos melhorou o desempenho geral das estimativas, reduzindo as discrepâncias decorrentes das diferenças nas estruturas e parâmetros dos modelos. Essa abordagem vem se mostrando satisfatória em muitos casos, já que possibilita reduzir as incertezas associadas a cada modelo (ASSENG et al., 2013), semelhante com o que se faz com modelos climáticos, empregados na previsão de tempo e clima.

Estudos com o uso da abordagem multi-modelos vem sendo utilizada em todo o mundo. No Brasil, essa abordagem foi empregada inicialmente por Battisti, Sentelhas e Boote (2017) para a cultura da soja. Esses autores observaram melhor desempenho nas simulações para um conjunto de cinco modelos de produtividade de soja (MZA-FAO, DSSAT, APSIM, AquaCrop e MONICA), com EAM de 218 kg ha⁻¹, enquanto esses erros para os modelos individuais variaram de 429 kg ha⁻¹ a 526 kg ha⁻¹. Resultados semelhantes também foram observados por Dias e Sentelhas (2017) para a cultura da cana-de-açúcar. Esses autores avaliaram o desempenho de três modelos de simulação da produtividade de cana-de-açúcar (MZA-FAO, DSSAT e APSIM) em diferentes regiões brasileiras e encontraram um EAM de 11,67 t ha⁻¹ pela abordagem multi-modelos, ao passo que os modelos individualmente geraram erros entre 12,42 t ha⁻¹ e 12,82 t ha⁻¹. Similarmente, Elli et al. (2019) avaliaram o desempenho de três modelos de simulação para a cultura do eucalipto (MZA-FAO, APSIM e 3PG) em diferentes regiões brasileiras e observaram que as produtividades estimadas médias dos modelos geraram erros menores do que quando foram consideradas as estimativas obtidas pelos modelos individualmente. Enquanto a abordagem multi-modelos resultou em um EAM de 26,41 m³ ha⁻¹, esse erro oscilou entre 27,56 m³ ha⁻¹ e 33,93 m³ ha⁻¹ para as estimativas com um único modelo.

De modo geral, os modelos conseguiram captar a variabilidade oriunda dos diferentes locais, anos/safras e datas de semeadura, o que possibilitou um desempenho muito bom dos modelos individualizados. No entanto, tal desempenho foi ainda melhor quando considerada a abordagem multi-modelos. Apesar disso, mais análises deverão ser realizadas para se avaliar mais modelos, outras fontes de incertezas, assim como aumentar a série de dados e o número de locais analisados (ASSENG et al., 2013).

3.4. Conclusões

Os modelos de simulação avaliados neste estudo (MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e APSIM) são capazes de estimar a produtividade do algodoeiro quando devidamente calibrados e validados, de acordo com os ajustes de seus parâmetros de maior influência no crescimento e desenvolvimento da cultura. Os modelos MZA-FAO e AquaCrop são os que apresentam melhor desempenho na estimação da produtividade do algodoeiro, o que se deve à menor complexidade desses, sendo mais fácil suas calibrações. Apesar do desempenho muito satisfatório dos modelos analisados, a abordagem multi-modelos possibilita obter estimativas de produtividade da cultura do algodoeiro com menores erros, reduzindo, assim, as incertezas decorrentes das estruturas distintas de cada modelo e melhorando a capacidade preditiva em estudos agroclimáticos e de previsão de safra.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, P. et al. Simulating future climate change impacts on seed cotton yield in the Texas High Plains using the CSM-CROPGRO-Cotton model. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 317–330, 2016.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998.
- AMIN, A. et al. Optimizing the phosphorus use in cotton by using CSM-CROPGRO-Cotton model for semi-arid climate of Vehari-Punjab, Pakistan. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 5811–5823, 2017.
- AMOUZOU, K. A. et al. CROPGRO-Cotton model for determining climate change impacts on yield, water- and N- use efficiencies of cotton in the Dry Savanna of West Africa. **Agricultural Systems**, v. 165, p. 85–96, 2018.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. DE et al. **Zoneamento de risco climático para as culturas de algodão e feijão-caupi consorciadas no estado do Piauí**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2010.
- ANDREA, M. C. S. et al. Variability and limitations of maize production in Brazil: Potential yield, water-limited yield and yield gaps. **Agricultural Systems**, v. 165, p. 264–273, 2018.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2020.
- ASSENG, S. et al. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 827–832, 2013.

- BARBIERI, V.; TUON, R. L. **Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas culturas**. Piracicaba: DFM/ESALQ/USP, 1992.
- BASF. **Cultivares de algodão – Guia de variedades**. Disponível em: <<https://agriculture.basf.com/br/>>. Acesso em: 30 dez. 2020.
- BATTISTI, R. et al. Rules for grown soybean-maize cropping system in Midwestern Brazil: Food production and economic profits. **Agricultural Systems**, v. 182, p. 102850, 2020.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 200, p. 28–37, 2017.
- BEZERRA, B. G. et al. Evapotranspiration and crop coefficient for sprinkler-irrigated cotton crop in Apodi Plateau semiarid lands of Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 86–93, 2012.
- BOSI, C. et al. CROPGRO-Perennial Forage model parameterization for simulating Piatã palisade grass growth in monoculture and in a silvopastoral system. **Agricultural Systems**, v. 177, p. 102724, 2020.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial do estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.
- CAMMARANO, D. et al. Agronomic and economic evaluation of irrigation strategies on cotton lint yield in Australia. **Crop and Pasture Science**, v. 63, n. 7, p. 647, 2012.
- CAMPELO JUNIOR, J. H. et al. Estimativa da retenção de água em Latossolos do Cerrado mato-grossense cultivados com algodão. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 8, n. 3, p. 318–326, 2014.
- CHIAVEGATO, E. J.; SALVATIERRA, D. K. DE; GOTTARDO, L. C. B. Algodão. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Ed.). **Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. 1a ed. Brasília: INMET, 2009. p. 33–49.
- COSTA, P. M. C. et al. Yield response factor to water (Ky) of FMX 993, FMT 701 and FMX 910 cotton varieties in Campo Verde, MT. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 39, n. 4, p. 1–8, 2019.
- DELTAPINE. **Cultivares de algodão**. Disponível em: <<https://www.bayer.com.br/>>. Acesso em: 5 mar. 2020.
- DE WIT, C. T. Photosynthesis of leaf canopies. **Agriculture Research Report No. 663**. Wageningen: Wageningen University, 1965.

- DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Evaluation of three sugarcane simulation models and their ensemble for yield estimation in commercially managed fields. **Field Crops Research**, v. 213, p. 174–185, 2017.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper No. 33**. Roma, Italy: FAO, 1979.
- ELLI, E. F. et al. Intercomparison of structural features and performance of *Eucalyptus* simulation models and their ensemble for yield estimations. **Forest Ecology and Management**, v. 450, p. 117493, 2019.
- EVETT, S. R. et al. Cotton. In: STEDUTO, P. et al. (Eds.). Crop yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper No 66**. Roma, Italy: FAO, 2012. p. 150–161.
- FAO. **FAOSTAT**. 2020. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat>>. Acesso em: 5 fev. 2021.
- 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.
- FAVA, S. A. Q. et al. Simulação de cenários agrícolas futuros para algodoeiro com base em projeções de mudanças climáticas. **Agrometeoros**, v. 27, n. 1, p. 19–26, 2019.
- GARCÍA-VILA, M. et al. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 477–487, 2009.
- GAYDON, D. S. et al. Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. **Field Crops Research**, v. 204, p. 52–75, 2017.
- GIJSMAN, A. J. et al. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter–residue module from CENTURY. **Agronomy Journal**, v. 94, n. 3, p. 462, 2002.
- GODWIN, D. C.; SINGH, U. Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems. In: TSUJI, G. Y. (Ed.). **Understanding Options for Agricultural Production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 55–77.
- HEARN, A. B. OZCOT: A simulation model for cotton crop management. **Agricultural Systems**, v. 44, n. 3, p. 257–299, 1994.
- HEARN, A. B.; ROZA, G. D. DA. A simple model for crop management applications for cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Field Crops Research**, v. 12, p. 49–69, 1985.
- HOLZWORTH, D. P. et al. APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 327–350, 2014.
- HOOGENBOOM, G. et al. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]**. Honolulu: University of Hawaii, 2012.

- HUSSEIN, F.; JANAT, M.; YAKOUB, A. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 4, p. 1319–1330, 2011.
- IBGE. **Produção Agrícola Municipal 2019**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.
- IMAMT. **Cultivares de algodão**. Disponível em: <<https://imamt.org.br/>>. Acesso em: 31 jan. 2019.
- JONES, J. W. et al. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 235–263, 2003.
- KASSAM, A. H. **Net biomass production and yield crops**. Roma, Italy: FAO, 1977.
- KEATING, B. A. et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 267–288, 2003.
- LI, F.; YU, D.; ZHAO, Y. Irrigation scheduling optimization for cotton based on the AquaCrop model. **Water Resources Management**, v. 33, p. 39–55, 2019.
- LI, M. et al. Simulation of cotton growth and soil water content under film-mulched drip irrigation using modified CSM-CROPGRO-Cotton model. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 124–138, 2019.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Libardi, P ed. São Paulo: Editora USP, 2012.
- LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, n. 1, p. 179–204, 2009.
- LOISON, R. et al. Designing cotton ideotypes for the future: Reducing risk of crop failure for low input rainfed conditions in Northern Cameroon. **European Journal of Agronomy**, v. 90, p. 162–173, 2017.
- LOKA, D. A.; OOSTERHUIS, D. M. Water stress and reproductive development in cotton. In: OOSTERHUIS, D. M.; COTHREN, J. T. (Eds.). **Flowering and fruiting in cotton**. Candova: The Cotton Foundation, 2012. p. 51–58.
- MEIRELES, E. J. L. et al. Risco climático de quebra de produtividade da cultura do feijoeiro em Santo Antônio de Goiás, GO. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 163–171, 2003.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap: Can it be determined at national level with a simple agrometeorological model? **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 3, p. 272–284, 2017.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: Part I – A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282–290, 1970.
- PATHAK, T. B. et al. Use of global sensitivity analysis for CROPGRO Cotton model development. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 6, p. 2295–2302, 2007.

- PATHAK, T. B. et al. Uncertainty analysis and parameter estimation for the CSM-CROPGRO-Cotton model. **Agronomy Journal**, v. 104, n. 5, p. 1363–1373, 2012.
- PEREIRA, A.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002.
- PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, n. 2, p. 81–92, 1972.
- RAES, D. **A summary simulation model of the water budget of a cropped soil**. [s.l.] K.U. Leuven University, 1982.
- RAES, D. et al. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. **Agricultural Water Management**, v. 81, p. 335–357, 2006.
- RAES, D. et al. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 438–447, 2009.
- RAHMAN, M. H. UR et al. Multi-model projections of future climate and climate change impacts uncertainty assessment for cotton production in Pakistan. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 253–254, p. 94–113, 2018.
- RAO, N. H.; SARMA, P. B. S.; CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 13, p. 25–32, 1988.
- RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, v. 8, n. 5, p. 1204–1213, 1972.
- RITCHIE, J. T. et al. Cereal growth, development and yield. In: TSUJI, G. Y. (Ed.). **Understanding Options for Agricultural Production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 79–98.
- RITCHIE, J. T. et al. Extension of an existing model for soil water evaporation and redistribution under high water content conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 3, p. 792, 2009.
- ROSOLEM, C. A. Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro. **Informações Agronômicas**, n. 95, p. 1–9, 2001.
- SANTOS, H. G. et al. **O Novo Mapa de Solos do Brasil: Legenda Atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.
- SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., re ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018.
- SANTOS, S. R. et al. Crescimento e produção do algodoeiro fertirrigado com água residuária sanitária no semiárido de Minas Gerais. **Irriga**, v. 21, n. 1, p. 40–57, 2016.

- SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil: Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, p. 1–18, 2015.
- SILVA, E. S. et al. Zoning of water deficiency risk for conventional cotton in Mato Grosso. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 35, n. 4, p. 1–12, 2019.
- SILVA, L. L. et al. Influência das precipitações na produtividade agrícola no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 454–461, 2009.
- SMITH, M. CROPWAT – A computer program for irrigation planning and management. **Irrigation and Drainage Paper No. 46**. Roma, Italy: FAO, 1992.
- STEDUTO, P. et al. 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.
- TAN, S. et al. Performance of AquaCrop model for cotton growth simulation under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang, China. **Agricultural Water Management**, v. 196, p. 99–113, 2018.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955.
- THORP, K. R. et al. Development and application of process-based simulation models for cotton production: A review of past, present, and future directions. **The Journal of Cotton Science**, v. 18, p. 10–47, 2014.
- TMG. **Cultivares de algodão**. Disponível em: <<http://www.tmg.agr.br/>>. Acesso em: 31 jan. 2020.
- TSAKMAKIS, I. D. et al. Evaluation of AquaCrop model simulations of cotton growth under deficit irrigation with an emphasis on root growth and water extraction patterns. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 419–432, 2019.
- VAN ITTERSUM, M. K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance: A review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013.
- VISSES, F. A.; SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. B. Yield gap of cassava crop as a measure of food security – An example for the main Brazilian producing regions. **Food Security**, v. 10, n. 5, p. 1191–1202, 2018.
- WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.
- XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.
- YANG, Y. et al. Prediction of cotton yield and water demand under climate change and future adaptation measures. **Agricultural Water Management**, v. 144, p. 42–53, 2014.

ZONTA, J. H. et al. Cotton response to water deficits at different growth stages. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 4, p. 980–990, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A3. Perfis dos solos utilizados nas simulações

Tabela A3.1. Características físico-hídricas dos solos nas áreas de estudo nos estados do Mato Grosso e da Bahia, usadas no modelo AquaCrop para a cultura do algodoeiro.

Local	Textura	Profundidade (m)	SAT	CC	PMP
			(%)		
Campo Novo do Parecis, MT	Argilosa	1,00	36,1	28,9	17,1
Campo Verde, MT	Argilosa	1,00	33,3	26,6	17,9
Luís Eduardo Magalhães, BA	Argilosa	1,00	31,4	25,1	16,4
Pedra Preta, MT	Argilosa	1,00	31,4	25,1	16,4
Sapezal, MT	Argilosa	1,00	31,4	25,1	16,4
Sorriso, MT	Argilosa	1,00	28,9	23,1	14,4

SAT = conteúdo de água no ponto de saturação; CC = conteúdo de água na capacidade de campo; PMP = conteúdo de água no ponto de murcha permanente; MT = Mato Grosso; BA = Bahia.

Tabela A3.2. Perfil de solo das áreas de estudo nos estados do Mato Grosso e da Bahia, utilizadas nas fases de calibração e validação do modelo DSSAT para a cultura do algodoeiro.

Camada	LL	DUL	SAT	RGF	SKS	BDM	LOC	LCL	LSI	LHW	CEC
	(cm ³ cm ⁻³)			(%)	(cm h ⁻¹)	(g cm ⁻³)	(%)				(cmolc kg ⁻¹)
Campo Novo do Parecis, MT											
10	0,17	0,26	0,29	1,0	0,06	1,2	1,83	65	10	6,4	8,2
20	0,17	0,26	0,29	0,8	0,06	1,2	1,65	65	10	5,9	8,3
30	0,17	0,26	0,29	0,6	0,06	1,2	1,56	65	10	5,7	8,1
40	0,17	0,26	0,29	0,4	0,06	1,2	1,15	65	10	5,5	6,4
Campo Verde, MT											
10	0,18	0,27	0,30	1,0	0,06	1,2	2,12	67	10	5,8	10,4
20	0,18	0,27	0,30	0,8	0,06	1,2	1,88	67	10	5,5	10,1
30	0,18	0,27	0,30	0,6	0,06	1,2	1,67	67	10	5,4	9,0
40	0,18	0,27	0,30	0,4	0,06	1,2	1,32	67	10	5,3	7,1
Luís Eduardo Magalhães, BA											
10	0,16	0,25	0,28	1,0	0,06	1,2	1,85	64	9	6,1	8,8
20	0,16	0,25	0,28	0,8	0,06	1,2	1,62	64	9	5,8	8,5
30	0,16	0,25	0,28	0,6	0,06	1,2	1,62	64	9	5,5	8,6
40	0,16	0,25	0,28	0,4	0,06	1,2	1,24	64	9	5,4	6,7
Pedra Preta, MT											
10	0,16	0,25	0,28	1,0	0,06	1,2	1,85	64	9	6,1	8,8
20	0,16	0,25	0,28	0,8	0,06	1,2	1,62	64	9	5,8	8,5
30	0,16	0,25	0,28	0,6	0,06	1,2	1,62	64	9	5,5	8,6
40	0,16	0,25	0,28	0,4	0,06	1,2	1,24	64	9	5,4	6,7
Sapezal, MT											
10	0,16	0,25	0,28	1,0	0,06	1,2	1,85	64	9	6,1	8,8
20	0,16	0,25	0,28	0,8	0,06	1,2	1,62	64	9	5,8	8,5
30	0,16	0,25	0,28	0,6	0,06	1,2	1,62	64	9	5,5	8,6
40	0,16	0,25	0,28	0,4	0,06	1,2	1,24	64	9	5,4	6,7
Sorriso, MT											
10	0,14	0,23	0,25	1,0	0,06	1,2	1,62	59	7	6,2	8,0
20	0,14	0,23	0,25	0,8	0,06	1,2	1,32	59	7	6,0	7,1
30	0,14	0,23	0,25	0,6	0,06	1,2	1,62	59	7	5,5	8,6
40	0,14	0,23	0,25	0,4	0,06	1,2	1,24	59	7	5,4	6,7

LL = conteúdo de água no ponto de murcha permanente; DUL = conteúdo de água na capacidade de campo; SAT = conteúdo de água no ponto de saturação; RGF = fator de crescimento radicular; SKS = condutividade hidráulica; BDM = densidade do solo; LOC = carbono orgânico; LCL = argila; LSI = silte; LHW = pH em água; CEC = capacidade de troca catiônica; MT = Mato Grosso; BA = Bahia.

Tabela A3.3. Características físico-hídricas do perfil de solo das áreas de estudo nos estados do Mato Grosso e da Bahia, utilizados nas fases de calibração e validação do modelo APSIM para a cultura do algodoeiro.

Prof.	BD	AirDry	LL15	DUL	SAT	<i>Cotton</i>			
						LL	PAWC (36,0)	KL	XF
(cm)	(g cm ⁻³)	(mm mm ⁻¹)				(mm mm ⁻¹)	(mm)		
Campo Novo do Parecis, MT									
0-10	1,2	0,085	0,170	0,260	0,286	0,170	9,0	0,10	1,0
10-20	1,2	0,128	0,170	0,260	0,286	0,170	9,0	0,10	1,0
20-30	1,2	0,170	0,170	0,260	0,286	0,170	9,0	0,10	1,0
30-40	1,2	0,170	0,170	0,260	0,286	0,170	9,0	0,10	1,0
Campo Verde, MT									
0-10	1,2	0,090	0,180	0,270	0,297	0,180	9,0	0,10	1,0
10-20	1,2	0,135	0,180	0,270	0,297	0,180	9,0	0,10	1,0
20-30	1,2	0,180	0,180	0,270	0,297	0,180	9,0	0,10	1,0
30-40	1,2	0,180	0,180	0,270	0,297	0,180	9,0	0,10	1,0
Luís Eduardo Magalhães, BA									
0-10	1,2	0,080	0,160	0,250	0,275	0,160	9,0	0,10	1,0
10-20	1,2	0,120	0,160	0,250	0,275	0,160	9,0	0,10	1,0
20-30	1,2	0,160	0,160	0,250	0,275	0,160	9,0	0,10	1,0
30-40	1,2	0,160	0,160	0,250	0,275	0,160	9,0	0,10	1,0
Pedra Preta, MT									
0-10	1,2	0,080	0,160	0,250	0,275	0,160	9,0	0,10	1,0
10-20	1,2	0,120	0,160	0,250	0,275	0,160	9,0	0,10	1,0
20-30	1,2	0,160	0,160	0,250	0,275	0,160	9,0	0,10	1,0
30-40	1,2	0,160	0,160	0,250	0,275	0,160	9,0	0,10	1,0
Sapezal, MT									
0-10	1,2	0,080	0,160	0,250	0,275	0,160	9,0	0,10	1,0
10-20	1,2	0,120	0,160	0,250	0,275	0,160	9,0	0,10	1,0
20-30	1,2	0,160	0,160	0,250	0,275	0,160	9,0	0,10	1,0
30-40	1,2	0,160	0,160	0,250	0,275	0,160	9,0	0,10	1,0
Sorriso, MT									
0-10	1,2	0,070	0,140	0,230	0,253	0,140	9,0	0,10	1,0
10-20	1,2	0,105	0,140	0,230	0,253	0,140	9,0	0,10	1,0
20-30	1,2	0,140	0,140	0,230	0,253	0,140	9,0	0,10	1,0
30-40	1,2	0,140	0,140	0,230	0,253	0,140	9,0	0,10	1,0

Prof. = profundidade; BD = densidade do solo; AirDry = volume de ar seco no solo; LL15 = conteúdo de água no ponto de murcha permanente; DUL = conteúdo de água na capacidade de campo; SAT = conteúdo de água no ponto de saturação; LL = conteúdo de água no ponto de murcha permanente; PAWC = água disponível para a cultura; 36,0 = total de água disponível para a cultura na profundidade estudada; KL = fração de água disponível no solo por dia; XF = fator de crescimento radicular (0-1); MT = Mato Grosso; BA = Bahia.

Tabela A3.4. Características físico-químicas do perfil de solo das áreas de estudo nos estados do Mato Grosso e da Bahia, utilizados nas fases de calibração e validação do modelo APSIM para a cultura do algodoeiro.

Prof. (cm)	Textura	pH	Corg (%)	CEC	Ca	Mg (cmolc kg ⁻¹)	K	Al	B (mg kg ⁻¹)	Mn	Areia	Silte (%)	Argila
Campo Novo do Parecis, MT													
0-10	Argilosa	6,4	1,83	8,2	3,69	1,33	84,27	0,00	0,53	26,52	26	10	65
10-20	Argilosa	5,9	1,65	8,3	2,93	0,79	57,97	0,00			26	10	65
20-30	Argilosa	5,7	1,56	8,1	2,54	0,63	49,65	0,00			26	10	65
30-40	Argilosa	5,5	1,15	6,4	1,15	0,38	40,57	0,01			26	10	65
Campo Verde, MT													
0-10	Argilosa	5,8	2,12	10,4	3,86	1,15	253,33	0,03	0,90	16,30	23	10	67
10-20	Argilosa	5,5	1,88	10,1	3,30	0,82	169,58	0,07			23	10	67
20-30	Argilosa	5,4	1,67	9,0	2,78	0,58	113,78	0,08			23	10	67
30-40	Argilosa	5,3	1,32	7,1	1,73	0,34	74,88	0,11			23	10	67
Luís Eduardo Magalhães, BA													
0-10	Argilosa	6,1	1,85	8,8	3,56	1,19	134,75	0,01	0,61	18,10	28	9	64
10-20	Argilosa	5,8	1,62	8,5	2,83	0,81	94,26	0,04			28	9	64
20-30	Argilosa	5,5	1,62	8,6	2,66	0,60	81,72	0,04			28	9	64
30-40	Argilosa	5,4	1,24	6,7	1,44	0,36	57,73	0,06			28	9	64
Pedra Preta, MT													
0-10	Argilosa	6,1	1,85	8,8	3,56	1,19	134,75	0,01	0,61	18,10	28	9	64
10-20	Argilosa	5,8	1,62	8,5	2,83	0,81	94,26	0,04			28	9	64
20-30	Argilosa	5,5	1,62	8,6	2,66	0,60	81,72	0,04			28	9	64
30-40	Argilosa	5,4	1,24	6,7	1,44	0,36	57,73	0,06			28	9	64
Sapezal, MT													
0-10	Argilosa	6,1	1,85	8,8	3,56	1,19	134,75	0,01	0,61	18,10	28	9	64
10-20	Argilosa	5,8	1,62	8,5	2,83	0,81	94,26	0,04			28	9	64
20-30	Argilosa	5,5	1,62	8,6	2,66	0,60	81,72	0,04			28	9	64
30-40	Argilosa	5,4	1,24	6,7	1,44	0,36	57,73	0,06			28	9	64
Sorriso, MT													
0-10	Argilosa	6,2	1,62	8,0	3,12	1,09	66,63	0,00	0,41	11,48	34	7	59
10-20	Argilosa	6,0	1,32	7,1	2,27	0,82	55,22	0,04			34	7	59
20-30	Argilosa	5,5	1,62	8,6	2,66	0,60	81,72	0,04			34	7	59
30-40	Argilosa	5,4	1,24	6,7	1,44	0,36	57,73	0,06			34	7	59

Prof. = profundidade; pH = pH em água; Corg = carbono orgânico; CEC = capacidade de troca catiônica; Ca = cálcio; Mg = magnésio; K = potássio; Al = alumínio; B = boro; Mn = manganês; MT = Mato Grosso; BA = Bahia.

APÊNDICE B3. Condições para a análise de sensibilidade dos parâmetros dos modelos

Tabela B3.1. Condições usadas na análise de sensibilidade dos parâmetros dos modelos AquaCrop, DSSAT e APSIM.

Condição	Época	Local	Data de semeadura
AquaCrop			
1	1 ^a	Sorriso, MT	17/12/2012
2	1 ^a	Sapezal, MT	22/12/2012
3	1 ^a	Sorriso, MT	26/12/2016
4	2 ^a	Pedra Preta, MT	21/12/2011
5	2 ^a	Pedra Preta, MT	03/01/2013
6	2 ^a	Sapezal, MT	06/01/2014
7	3 ^a	Campo Novo do Parecis, MT	21/01/2012
8	3 ^a	Campo Novo do Parecis, MT	05/02/2013
9	3 ^a	Campo Verde, MT	29/01/2014
DSSAT			
1	1 ^a	Sorriso, MT	17/12/2012
2	1 ^a	Sapezal, MT	14/12/2013
3	1 ^a	Pedra Preta, MT	24/12/2014
4	2 ^a	Pedra Preta, MT	03/01/2013
5	2 ^a	Campo Verde, MT	14/01/2015
6	2 ^a	Sorriso, MT	06/01/2017
7	3 ^a	Campo Novo do Parecis, MT	29/01/2014
8	3 ^a	Sapezal, MT	27/01/2015
9	3 ^a	Campo Verde, MT	01/02/2017
APSIM			
1	1 ^a	Pedra Preta, MT	24/12/2014
2	1 ^a	Campo Novo do Parecis, MT	28/12/2015
3	1 ^a	Pedra Preta, MT	27/12/2016
4	2 ^a	Campo Verde, MT	14/01/2015
5	2 ^a	Sapezal, MT	20/01/2016
6	2 ^a	Campo Novo do Parecis, MT	10/01/2017
7	3 ^a	Sorriso, MT	27/01/2014
8	3 ^a	Sorriso, MT	25/01/2016
9	3 ^a	Sapezal, MT	26/02/2016

APÊNDICE C3. Análise de sensibilidade dos parâmetros dos modelos

Tabela C3.1. Análise de sensibilidade do modelo AquaCrop para sua calibração para a cultura do algodoeiro.

Descrição dos parâmetros	10%	5%	0	-5%	-10%
<i>Conservador</i>					
Temperatura basal inferior (°C)	0	0	0	0	0
Temperatura basal superior (°C)	0	0	0	0	-3
Fator de depleção de água no solo para expansão do dossel (p-exp) - Limiar superior	0	0	0	0	0
Fator de depleção de água no solo para expansão do dossel (p-exp) - Limiar inferior	0	0	0	0	0
Fator de forma do coeficiente de estresse hídrico para expansão do dossel (0,0 = linha reta)	0	0	0	0	0
Fator de depleção de água no solo para controle estomático (p - sto) - Limiar superior	0	0	0	0	-1
Fator de forma do coeficiente de estresse hídrico para controle estomático (0,0 = linha reta)	0	0	0	0	0
Fator de depleção de água no solo para senescência do dossel (p - sen) - Limiar superior	0	0	0	0	0
Fator de forma do coeficiente de estresse hídrico para senescência do dossel (0,0 = linha reta)	0	0	0	0	0
Coeficiente de cultura quando o dossel está completo, antes da senescência ($K_{cTr\ x}$)	9	5	0	-5	-10
Número de dias da semeadura à emergência	-1	-1	0	1	1
Número de dias da semeadura à profundidade máxima das raízes	0	0	0	0	0
Número de dias da semeadura ao início da senescência	3	1	0	-1	-3
Número de dias da semeadura à maturidade (duração do ciclo da cultura)	8	5	0	-11	-24
Número de dias da semeadura à floração	0	1	0	-1	-2
Duração do estágio de floração (dias)	0	0	0	0	0
Índice de colheita de referência (HIo) (%)	11	6	0	-6	-9
<i>Não conservador</i>					
Profundidade efetiva mínima de raízes (m)	0	0	0	0	0
Profundidade efetiva máxima de raízes (m)	0	0	0	0	-1
Fator de forma que descreve a expansão da zona das raízes	0	0	0	0	0
Coeficiente de crescimento do dossel (CGC): Aumento da cobertura do dossel (em fração da cobertura de solo por dia)	4	2	0	-2	-5
Cobertura máxima do dossel (CCx) (em fração de cobertura do solo)	-1	1	0	-2	-5
Coeficiente de declínio do dossel (CDC): Diminuição da cobertura do dossel (em fração por dia)	0	0	0	0	0
Produtividade da água normalizada para a ET _o e CO ₂ (WP*) (g m ⁻²)	10	5	0	-5	-10
Produtividade da água normalizada para a ET _o e CO ₂ durante a formação da produção da cultura (%WP*)	7	4	0	-3	-8
Desempenho da cultura sob concentração atmosférica elevada (%)	0	0	0	0	0

Tabela C3.2. Análise de sensibilidade do modelo DSSAT para sua calibração para a cultura do algodoeiro.

Descrição dos parâmetros	10%	5%	0	-5%	-10%
Tempo entre a emergência e o início do florescimento (EM-FL) (dias fototérmicos)	-2	0	0	0	0
Tempo entre o florescimento e o início da frutificação (FL-SH) (dias fototérmicos)	2	1	0	0	0
Tempo entre o florescimento e a abertura do primeiro capulho (FL-SD) (dias fototérmicos)	1	0	0	1	2
Tempo entre a abertura do primeiro capulho e a maturidade fisiológica (SD-PM) (dias fototérmicos)	2	1	0	-1	-3
Tempo entre o florescimento e o fim da expansão foliar (FL-LF) (dias fototérmicos)	0	0	0	0	0
Taxa máxima de fotossíntese foliar (LFMAX) (mg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	9	5	0	-5	-11
Área foliar específica (SLAVR) (cm ² g ⁻¹)	1	1	0	-1	-1
Tamanho máximo das folhas (SIZLF) (cm ²)	2	1	0	-1	-3
Fração máxima do crescimento diário particionado em sementes + casca (XFRT) (g)	3	2	0	-2	-4
Peso máximo por semente (WTPSD) (g)	0	0	0	0	0
Tempo para o enchimento de capulhos (SFDUR) (dias fototérmicos)	0	0	0	0	0
Média de sementes por capulho (SDPDV) (n° sementes capulho ⁻¹)	0	0	0	0	0
Tempo para atingir a carga máxima dos capulhos (PODUR) (dias fototérmicos)	0	0	0	0	-1
Índice de colheita (THRSH)	5	3	0	-3	-7
Fração de proteína nas sementes (SDPRO) (g proteína g semente ⁻¹)	0	0	0	0	0
Fração de óleo nas sementes (SDLIP) (g óleo g semente ⁻¹)	-1	0	0	0	1

Tabela C3.3. Análise de sensibilidade do modelo APSIM para sua calibração para a cultura do algodoeiro.

Descrição dos parâmetros	10%	5%	0	-5%	-10%
Porcentagem de fibras (PERCENT_L) (%)	0	0	0	0	0
Massa de sementes de algodão por capulho (SCBOLL) (g sementes g capulho ⁻¹)	2	6	0	-1	-2
Razão modificadora da área foliar (FLAI)	1	1	0	-1	-1
Tempo térmico entre a emergência e o aparecimento da primeira flor (DDISQ) (GD)	-4	-3	0	2	3
Tempo térmico para mudança de categoria (FRUDD1) (florescimento) (GD)	0	0	0	0	0
Tempo térmico para mudança de categoria (FRUDD2) (GD)	1	0	0	-1	-1
Tempo térmico para mudança de categoria (FRUDD3) (GD)	1	2	0	0	0
Tempo térmico para mudança de categoria (FRUDD4) (GD)	0	0	0	0	0
Tempo térmico para mudança de categoria (FRUDD5) (GD)	0	0	0	0	0
Tempo térmico para mudança de categoria (FRUDD6) (capulhos) (GD)	0	0	0	0	0
Tempo térmico para mudança de categoria (FRUDD7) (GD)	0	0	0	0	0
Tempo térmico para mudança de categoria (FRUDD8) (GD)	-3	-2	0	4	4

APÊNDICE D3. Parâmetros calibrados para cada cultivar em cada modelo

Tabela D3.1. Valores dos principais parâmetros calibrados para simulação da produtividade da cultura do algodoeiro pelos modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e APSIM, para as seguintes cultivares: DP1536B2RF; DP1746B2RF; FM944GL; FM954GLT; FM975WS; e IMA8405GLT.

Parâmetros	Cultivares					
	DP1536B2RF	DP1746B2RF	FM944GL	FM954GLT	FM975WS	IMA8405GLT
MZA-FAO						
K _{yEST}	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
K _{yVEG}	0,18	0,20	0,18	0,20	0,20	0,18
K _{yFLO}	0,45	0,60	0,51	0,51	0,58	0,52
K _{yFOR}	0,78	0,91	0,57	0,67	0,74	0,81
K _{yMAT}	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
AquaCrop						
SE-MA	170	170	170	170	170	170
H _{Io}	32	34	40	39	34	32
WP*	70	70	70	70	70	70
K _{cTr x}	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
%WP*	70	70	70	70	70	70
CGC	0,06712	0,06712	0,06712	0,06712	0,06712	0,06712
CCx	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
SE-SN	150	150	150	150	150	150
SE-FL	60	60	60	60	60	60
SE-EM	8	8	8	8	8	8
TB	35	35	35	35	35	35
PEMaxR	0,80	0,80	0,80	0,82	0,80	0,80
p-sto _{upper}	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
DSSAT						
LFMAX	1,92	1,40	1,50	1,75	1,38	1,66
THRSH	70,5	72,7	80,0	70,0	76,7	76,0
XFRT	1,05	0,86	0,97	0,99	0,89	0,98
SD-PM	63,50	63,75	72,00	64,60	68,00	62,90
SIZLF	301,5	306,9	308,5	300,5	302,5	302,0
FL-SD	14,7	13,3	16,5	11,7	16,0	15,5
SLAVR	172	171	170	170	170	175
FL-SH	10,5	12,5	10,5	11,0	11,0	11,0
EM-FL	38,0	38,0	37,5	38,0	38,0	38,0
PODUR	12,0	12,6	14,7	12,0	13,2	12,0
SDLIP	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120
APSIM						
FRUDD8	1067	1075	1075	1071	1067	1059
DDISQ	402	402	402	402	402	402
SCBOLL	9,3	7,9	7,9	8,9	6,2	9,3
FLAI	1,30	1,06	1,09	1,31	0,98	1,44
FRUDD3	306	306	307	307	307	306
FRUDD2	232	197	201	215	173	242

Tabela D3.2. Valores dos principais parâmetros calibrados para simulação da produtividade da cultura do algodoeiro pelos modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e APSIM, para as seguintes cultivares: TMG42WS; TMG43WS; TMG44B2RF; TMG47B2RF; TMG81WS; e TMG82WS.

Parâmetros	Cultivares					
	TMG42WS	TMG43WS	TMG44B2RF	TMG47B2RF	TMG81WS	TMG82WS
MZA-FAO						
K _{yEST}	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
K _{yVEG}	0,18	0,18	0,22	0,18	0,22	0,18
K _{yFLO}	0,55	0,52	0,46	0,49	0,49	0,40
K _{yFOR}	0,82	0,62	0,77	0,70	0,78	0,88
K _{yMAT}	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
AquaCrop						
SE-MA	170	170	170	170	170	170
HI _o	45	37	33	33	51	42
WP*	70	70	70	70	70	70
K _{cTrx}	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
%WP*	70	70	70	70	70	70
CGC	0,06712	0,06712	0,06712	0,06712	0,06712	0,06712
CCx	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
SE-SN	150	150	150	150	150	150
SE-FL	60	60	60	60	60	60
SE-EM	8	8	8	8	8	8
TB	35	35	35	35	35	35
PEMaxR	0,80	0,80	0,80	0,80	1,05	0,80
p-sto _{upper}	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
DSSAT						
LFMAX	2,76	1,80	1,52	1,72	1,55	1,94
THRSH	76,5	73,5	74,5	71,0	76,2	78,5
XFRT	1,02	1,04	0,96	0,97	0,99	1,01
SD-PM	61,00	66,50	67,50	60,20	69,50	58,00
SIZLF	310,0	302,5	306,5	302,1	306,4	302,0
FL-SD	13,4	12,5	11,7	16,0	16,0	15,5
SLAVR	178	174	174	170	170	175
FL-SH	11,5	11,0	11,0	11,0	10,0	12,0
EM-FL	36,9	38,0	38,0	37,5	36,5	37,5
PODUR	12,5	12,5	12,5	12,0	12,8	10,0
SDLIP	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120
APSIM						
FRUDD8	1079	1067	1067	1071	1071	1067
DDISQ	402	402	402	402	402	402
SCBOLL	9,7	9,6	8,7	9,6	5,1	5,6
FLAI	1,55	1,35	1,14	1,68	0,89	0,93
FRUDD3	307	307	307	306	307	305
FRUDD2	189	190	186	279	164	167

4. YIELD GAP DA CULTURA DO ALGODOEIRO NO BRASIL – UMA ABORDAGEM MULTI-MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE SUAS MAGNITUDES E CAUSAS

RESUMO

O Brasil é um dos maiores produtores de algodão do mundo. A cultura é importante fonte de fibras, alimentos e de matéria-prima para a produção de biodiesel. Os níveis de produtividade da cultura do algodoeiro nas diferentes regiões de cultivo do país variam substancialmente, resultando em *yield gaps* de diferentes magnitudes. Portanto, é imprescindível quantificar as magnitudes e determinar as principais causas do *yield gap* da cultura do algodoeiro no Brasil, visando possibilitar o aumento da produtividade. Sendo assim, este estudo teve como objetivos estimar a produtividade potencial (PP) e a produtividade atingível (PA) da cultura do algodoeiro em diferentes regiões brasileiras por meio da abordagem multi-modelos; e avaliar o *yield gap* devido à deficiência hídrica e ao déficit de manejo agrícola para essas regiões. Três modelos de simulação de produtividade do algodoeiro, MZA-FAO, AquaCrop e CROPGRO-Cotton (DSSAT), devidamente calibrados e validados, foram utilizados para estimar a PP, a PA e o *yield gap* para 15 localidades nos estados da Bahia, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e São Paulo. A produtividade real (PR) de cada localidade analisada foi obtida junto ao banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o período de 1990 a 2019, totalizando 30 anos de dados. Para analisar a magnitude e as causas do *yield gap* da cultura do algodoeiro foram avaliadas as seguintes variáveis: PP; PA; PR; *yield gap* por deficiência hídrica (YG_{DH}); *yield gap* por déficit de manejo agrícola (YG_{MA}); *yield gap* total (YG_T); eficiência climática (EC); e eficiência agrícola (EA). A PP e a PA variaram entre as localidades, sendo, em média, de 8793 kg ha⁻¹ e de 5789 kg ha⁻¹, respectivamente. A média do YG_T para as localidades avaliadas foi de 4551 kg ha⁻¹, sendo a maior parte causada pela deficiência hídrica (3004 kg ha⁻¹), enquanto o déficit de manejo agrícola teve uma menor magnitude (1735 kg ha⁻¹). O maior YG_{DH} ocorreu em Correntina, BA, enquanto o menor YG_{DH} ocorreu em Paranapanema, SP. O maior YG_{MA} ocorreu em Sidrolândia, MS, ao passo que o menor YG_{DH} ocorreu em Sorriso, MT. Com base nesses resultados, conclui-se que os modelos de simulação de produtividade, com a abordagem multi-modelos, permitem estimar a PP e a PA, e a partir dessas avaliar o *yield gap* da cultura do algodoeiro em diferentes regiões brasileiras, tanto devido à deficiência hídrica quanto ao déficit de manejo agrícola. A principal causa do *yield gap* do algodoeiro no Brasil se deve a deficiência hídrica, a qual é responsável por 66% do YG_T .

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L., Modelos de simulação de culturas, Deficiência hídrica, Manejo agrícola sub-ótimo, Perdas de produtividade

YIELD GAP OF COTTON CROP IN BRAZIL – A MULTI-MODEL APPROACH FOR DETERMINING ITS MAGNITUDES AND CAUSES

ABSTRACT

Brazil is one of the largest cotton producers in the world. This crop is an important source of fiber, food, and raw material to produce biodiesel. The cotton yield levels in the different growing regions of the country vary substantially, resulting in yield gaps of different magnitudes. Therefore, it is essential to quantify the magnitudes and determine the main causes of the yield gap of the cotton crop in Brazil, to promote yield increase. Thus, this study aimed to estimate the potential (Yp) and the attainable (Ya) yields of the cotton crop in different Brazilian regions through the multi-model approach and to evaluate the causes of yield gap, due to water deficit and sub-optimal crop management for these regions. For this purpose, three cotton crop simulation models, AZM-FAO, AquaCrop, and CROPGRO-Cotton (DSSAT), duly calibrated and evaluated, were used to estimate the Yp, Ya and yield gap for 15 locations in the states of Bahia, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas

Gerais, and São Paulo. The actual yield (Y_r) of each analyzed location was obtained from the database of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) for the period from 1990 to 2019, totaling 30 years of data. To analyze the magnitude and causes of the yield gap of the cotton crop, the following variables were evaluated: Y_p ; Y_a ; Y_r ; yield gap caused by water deficit (YG_{WD}); yield gap caused by sub-optimal crop management (YG_{CM}); total yield gap (YG_T); climatic efficiency (CE); and agricultural efficiency (AE). Y_p and Y_a varied between locations, being, on average, 8793 kg ha⁻¹ and 5789 kg ha⁻¹, respectively. The mean YG_T for the assessed locations was 4551 kg ha⁻¹, which was mainly caused by water deficit (3004 kg ha⁻¹), while YG_{CM} had a smaller magnitude (1735 kg ha⁻¹). The highest YG_{WD} occurred in Correntina, BA, while the lowest one was observed in Paranapanema, SP. The largest YG_{CM} occurred in Sidrolândia, MS, while the smallest one was in Sorriso, MT. Based on these results, it is concluded that the crop simulation models, in a multi-model approach, allow to estimate the Y_p and Y_a , and from these data to evaluate the yield gap of the cotton crop in different Brazilian regions, both due to the water deficit and sub-optimal crop management. The main cause of cotton yield gap in Brazil is due to water deficit, which is responsible for 66% of the YG_T .

Keywords: *Gossypium hirsutum* L., Crop simulation models, Water deficit, Sub-optimal crop management, Yield losses

4.1. Introdução

A cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) é uma importante *commodity* a nível mundial, sendo responsável pela produção de 90% do algodão no mundo, e representa importante fonte de fibras, alimentos e de matéria-prima para a produção de biodiesel (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; THORP et al., 2014). Atualmente, o Brasil é o quarto maior produtor de algodão em caroço (pluma e caroço) do mundo e o segundo maior exportador de fibras de algodão (ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 2020; FAO, 2020). Nos últimos anos, o Brasil vem se destacando devido ao aumento da produção, a qual foi decorrente do incremento na quantidade produzida que passou de 821 mil t, em 1997, para 6.893 mil t, em 2019, representando incremento de 840%, em uma área colhida que passou de 620 mil ha, em 1997, para 1.627 mil ha, em 2019, representando incremento de 262% (IBGE, 2020), o que foi impulsionado pelo aumento do consumo e melhoria nos preços de venda, especialmente, no mercado internacional (ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 2019). Na safra 2018/19, a produtividade média do algodão em caroço foi de 4236 kg ha⁻¹ ou 282,4 @ ha⁻¹ (IBGE, 2020).

A cultura do algodoeiro no Brasil é cultivada como de segunda safra (safrinha), sendo semeada logo após a colheita da soja, entre janeiro e fevereiro. Desse modo, a parte inicial do ciclo se dá nos meses chuvosos, com boa disponibilidade de água no solo, porém do meio para o final do ciclo, que envolve as fases reprodutivas, há redução das chuvas e da disponibilidade hídrica no solo (ALVES; LIMA; FERREIRA FILHO, 2014), o que impacta as produtividades. Assim, dependendo da época de semeadura e da duração do ciclo, a intensidade e a duração do período com déficit hídrico variam, levando a diferentes impactos na produtividade (LOKA; OOSTERHUIS, 2012; ROSOLEM, 2001; ZONTA et al., 2017).

Além das perdas de produtividade causadas pelas condições meteorológicas adversas, especialmente, pelo déficit hídrico, a cultura do algodoeiro ainda sofre perdas decorrentes dos diversos aspectos do manejo agrícola sub-ótimo, ou seja, com a ocorrência de pragas, doenças, plantas daninhas, correção e fertilização inadequadas do solo, entre outros. Essas perdas de produtividade, também conhecidas como *yield gap*, podem ser dimensionadas por meio do uso de modelos de simulação de culturas, para a estimativa da produtividade potencial (PP) e atingível (PA), e de dados de produtividade observados a campo, produtividade real (PR), auxiliando na definição das melhores estratégias para sua mitigação, proporcionando o aumento da produtividade da cultura (SENTELHAS et al., 2016; VAN ITTERSUM et al., 2013).

A PP é obtida quando a cultura é conduzida em um ambiente sem restrições hídricas, nutricionais e fitossanitárias, sendo obtida pela interação do genótipo com os fatores determinantes, como a radiação solar, a temperatura do ar, o fotoperíodo e a concentração de dióxido de carbono na atmosfera, além de fatores de manejo, como a população de plantas (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; VAN ITTERSUM et al., 2013; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997). Esse tipo de produtividade é um valor teórico e representa a produtividade máxima que uma cultura pode obter nas condições ambientais às quais ela fica sujeita durante seu ciclo, sem deficiência hídrica e com manejo agrícola ótimo (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; VAN ITTERSUM et al., 2013). A PA, por sua vez, é aquela obtida sob a influência dos fatores determinantes e dos fatores limitantes, sendo esses associados ao déficit hídrico e ao déficit nutricional decorrente dele. Nessa condição os níveis de produtividade tendem a ser inferiores ao da PP (HOCHMAN et al., 2012; VAN ITTERSUM et al., 2013). A PA, portanto, representa um valor teórico, sendo a máxima produtividade que os produtores podem atingir em condições de sequeiro e com manejo agrícola ótimo (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; SENTELHAS et al., 2016; VAN ITTERSUM et al., 2013).

O *yield gap* pode ser estimado por meio de modelos de simulação de produtividade, os quais empregam dados relativos ao genótipo, ao clima, ao solo e ao manejo agrícola (data de semeadura, população de plantas, sistema de produção, entre outros). Assim, o *yield gap* pode ser: total ($PP - PR$); devido ao déficit hídrico ($PP - PA$); e devido ao déficit de manejo agrícola ($PA - PR$). Além disso, com base nos dados de produtividade simuladas e observadas ainda é possível se determinar as eficiências climática (PA/PP) e agrícola (PR/PA) (SENTELHAS et al., 2016).

Estudos de *yield gap* foram realizados com diferentes culturas no Brasil, como a cana-de-açúcar (DIAS; SENTELHAS, 2018; MONTEIRO; SENTELHAS, 2017), o feijão (MEIRELES et al., 2003), a mandioca (VISSÉS; SENTELHAS; PEREIRA, 2018), o milho (ANDREA et al., 2018; MONTEIRO et al., 2017), a soja (SENTELHAS et al., 2015) e para a sucessão soja-milho (NÓIA

JÚNIOR; SENTELHAS, 2020). Apesar de existirem estudos de simulação da produtividade do algodoeiro (ADHIKARI et al., 2016; CONSTABLE; BANGE, 2015) e de determinação do *yield gap* da cultura (AGGARWAL et al., 2008; NACHIMUTHU; WEBB, 2017) em outros países, no Brasil esse tipo de abordagem ainda é pouco explorada.

As simulações da produtividade das culturas têm sido feitas, basicamente, por meio de modelos de forma individualizada, sendo os mais comuns o modelo Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO), o Aquacrop da FAO, o APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*) e os modelos da linha CSM-CROPGRO do DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) (ANDREA et al., 2018; BATTISTI et al., 2020; BOSI et al., 2020; ELLI et al., 2019b; MEIRELES et al., 2003; MONTEIRO; SENTELHAS, 2017; SENTELHAS et al., 2015; VISSÉS; SENTELHAS; PEREIRA, 2018). Entretanto, as diferentes estruturas e parâmetros dos modelos de simulação de culturas têm gerado resultados muitas vezes discrepantes. Para melhorar a precisão e reduzir as incertezas do uso desses modelos, estudos recentes tem sugerido o emprego da abordagem multi-modelos para simulação de produtividade das culturas (ASSENGET al., 2013). A abordagem multi-modelos foi utilizada na estimativa do *yield gap* de algumas culturas no Brasil, como da cana-de-açúcar (DIAS; SENTELHAS, 2018), do milho (DUARTE, 2018), e para a sucessão soja-milho (NÓIA JÚNIOR; SENTELHAS, 2020). Para a cultura do algodoeiro, tal abordagem ainda é inexistente no Brasil, assim como em outros países produtores da cultura.

Considerando-se que a ocorrência do *yield gap* traz grandes perdas para a cultura do algodoeiro no Brasil e que a determinação de sua magnitude, causas e estratégias de mitigação pode ser feita por meio de modelos de simulação de cultura utilizando a abordagem multi-modelos, os objetivos desse estudo foram: estimar a produtividade potencial e a produtividade atingível da cultura do algodoeiro em diferentes regiões brasileiras por meio da abordagem multi-modelos; e avaliar o *yield gap* da cultura do algodoeiro devido à deficiência hídrica e ao déficit de manejo agrícola para essas regiões, levando-se em consideração os dados de produtividade real.

4.2. Material e métodos

4.2.1. Dados de produtividade da cultura do algodoeiro

Para este estudo foram utilizadas 15 localidades representativas das principais áreas de produção da cultura do algodoeiro no Brasil, em diferentes condições climáticas (Tabela 4.1). Os dados de produtividade real (PR) foram obtidos junto à base de dados do sistema Produtividade Agrícola Municipal (PAM) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)

(<https://sidra.ibge.gov.br/>), para o período de 1990 a 2019, correspondendo às safras 1989/1990 a 2018/2019, totalizando 30 anos de dados, o que de acordo com van Ittersum et al. (2013), representa um período ideal, porém devendo-se atentar para o fato de que nessas séries mais longas podem ser observadas tendências tecnológicas, as quais devem ser corrigidas.

Tabela 4.1. Localidades brasileiras utilizadas na determinação do *yield gap* da cultura do algodoeiro, com suas respectivas coordenadas geográficas, altitude e condições meteorológicas e de balanço hídrico: radiação solar global diária média anual (Qg); temperatura média anual do ar (T); chuva anual média (P); evapotranspiração de referência anual média (ET_o); déficit hídrico anual médio (DEF); e excedente hídrico anual médio (EXC), do período de 1990 a 2019.

Localidades	Lat	Long	Altitude	Qg	T	P	ET _o	DEF ^a	EXC ^a
	(graus)		(m)	(MJ m ⁻² d ⁻¹)	(°C)		(mm ano ⁻¹)		
Alcinópolis, MS	-18,31	-53,70	443	18,04	24,86	1493	1383	231	342
Balsas, MA	-7,53	-46,04	283	19,14	27,34	1186	1748	698	137
Campo Verde, MT	-15,55	-55,17	736	17,85	25,86	1689	1524	331	495
Correntina, BA	-13,33	-44,64	575	20,58	25,17	913	1411	540	42
Luís Eduardo Magalhães, BA	-12,08	-45,78	720	19,98	25,37	1157	1436	505	226
Panamá, GO	-18,21	-49,41	733	18,76	24,67	1370	1359	338	349
Paranapanema, SP	-23,38	-48,72	610	16,25	21,14	1421	1010	3	414
Paraúna, GO	-16,95	-50,45	745	18,21	24,90	1415	1376	385	425
Patrocínio, MG	-18,93	-46,99	972	18,65	22,44	1475	1098	197	573
Pedra Preta, MT	-16,62	-54,48	248	18,65	26,11	1486	1554	386	319
Rio Verde, GO	-17,78	-50,92	748	17,98	24,11	1462	1276	274	460
Sapezal, MT	-13,55	-58,82	370	17,71	25,81	1929	1513	300	715
Sidrolândia, MS	-20,93	-54,97	484	17,98	24,31	1423	1331	42	134
Sorriso, MT	-12,53	-55,72	365	17,83	26,45	1822	1610	447	659
Unaí, MG	-16,36	-46,90	640	19,01	24,73	1265	1362	402	304

^a Para fins de caracterização agroclimática das diferentes regiões, o déficit hídrico anual médio (DEF) e o excedente hídrico anual médio (EXC) foram obtidos pelo balanço hídrico decenal de Thornthwaite e Mather (1955), empregando-se a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Thornthwaite (1948) e a capacidade de água disponível (CAD) no solo de 66 mm, pois foi a capacidade de água disponível (CAD) no solo média utilizada neste estudo.

A produtividade do algodoeiro de cada ano representou a média da região geográfica imediata onde a localidade está inserida. As regiões geográficas imediatas foram estabelecidas e definidas pelo IBGE e representam a menor escala da Divisão Regional do Brasil em Regiões Geográficas, uma atualização do quadro regional anterior (Mesorregiões e Microrregiões Geográficas) produzido na década de 1980 (IBGE, 2017). A abordagem por meio de regiões geográficas imediatas ocorreu devido ao fato de vários municípios terem sido divididos ou unidos durante o período estudado, fato que impossibilitou o uso da produção histórica municipal do algodoeiro. Esse procedimento também foi adotado visando minimizar as discrepâncias e gerar séries históricas de dados de produtividade real >10 anos. Outras pesquisas também adotaram esse procedimento (DIAS; SENTELHAS, 2017; HEINEMANN; SENTELHAS, 2011). As localidades avaliadas, assim como os municípios abrangidos, podem ser encontradas no APÊNDICE A4. Todas as regiões apresentaram produtividades do algodoeiro crescentes ao longo dos anos (Figura

4.1A), evidenciando sua tendência tecnológica, a qual foi removida conforme procedimento utilizado por Heinemann e Sentelhas (2011), gerando a série de dados apresentada na Figura 4.1B.

Figura 4.1. Variação interanual da produtividade do algodoeiro, entre os anos de 1990 a 2019, nas regiões de Alcinópolis, MS; Balsas, MA; Campo Verde, MT; Correntina, BA; Luís Eduardo Magalhães, BA; Panamá, GO; Paranapanema, SP; Paraúna, GO; Patrocínio, MG; Pedra Preta, MT; Rio Verde, GO; Sapezal, MT; Sidrolândia, MS; Sorriso, MT; Unai, MG; e a média anual das localidades. (A) Com a tendência tecnológica e, (B) com a remoção da tendência tecnológica.

4.2.2. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos de 1987 a 2015, para chuva, e de 1987 a 2017, para radiação solar global (Qg), temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa e velocidade do

vento, usados para estimar a produtividade potencial e a produtividade atingível foram obtidos junto ao banco de dados meteorológicos em grade (0,25 x 0,25°), disponibilizado por Xavier et al. (2016). Esta base de dados meteorológicos apresenta bom desempenho para fins de modelagem de culturas (BATTISTI; BENDER; SENTELHAS, 2019). Os dados referentes ao período de 2018 a 2019 foram compilados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Nacional de Águas (ANA) e CPFL Energia. A Q_g foi empregada na estimação da insolação (n) por meio da equação de Angström-Prescott (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002) (Eq. 4.1):

$$n = \frac{\left(\frac{Q_g}{Q_o} - 0,25\right)}{0,5} \times N \quad (4.1)$$

em que: Q_o é a radiação solar extraterrestre e N é o fotoperíodo, ambos estimados por meio de equações astronômicas, as quais empregam como dados de entrada a latitude do local e o dia do ano (de 1 a 365), conforme procedimentos apresentados por Allen et al. (1998).

Para o preenchimento de falhas na série de dados, foram utilizadas as fontes citadas anteriormente e os dados do sistema *National Aeronautics and Space Administration – Prediction Of Worldwide Energy Resources* (NASAPOWER) (<http://power.larc.nasa.gov>), que segundo Duarte e Sentelhas (2020b) apresenta bom desempenho para fins de modelagem de culturas, exceto para chuva e velocidade do vento. Os dados faltantes de chuva, foram preenchidos com dados dos pluviômetros da ANA, adotando-se o critério da estação mais próxima até 20 km de distância. O método utilizado para estimação da evapotranspiração de referência foi o da Penman-Monteith-FAO (ALLEN et al., 1998), enquanto para a determinação do balanço hídrico foi empregado o método de Thornthwaite e Mather (1955).

4.2.3. Dados de solo

Como este estudo empregou uma ampla diversidade de regiões e os dados de solo exigidos pelos modelos AquaCrop e DSSAT não estavam disponíveis, optou-se por considerar três tipos padrões de solo para representar as diversidades de tipos de solo e suas respectivas capacidades de água disponível (CADs) no solo presentes em cada região, sendo eles: Neossolo Quartzarênico distrófico (NQd), para representar um solo de textura arenosa (CAD = 42 mm); Latossolo Vermelho-escuro distroférico (LVEd), para representar um solo de textura média (CAD = 66 mm); e Latossolo Roxo distrófico (LRd), para representar um solo de textura argilosa (CAD = 90 mm), assim como realizado por Vianna e Sentelhas (2014). Além disso, os demais dados de

solos exigidos pelos modelos foram obtidos junto ao banco de dados do RADAMBRASIL (1982, 1983). Os valores de CAD utilizados como referências neste estudo foram os mesmos utilizados pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para a cultura do algodão herbáceo, na safra 2020/2021, conforme as portarias obtidas junto ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil (<https://www.gov.br/agricultura/pt-br>), para as localidades estudadas. Os resultados representam a média aritmética dos diferentes tipos de solo.

As características físico-químicas e hídricas dos solos considerados neste estudo são apresentadas na Tabela 4.2. Os dados de solo comuns aos modelos estudados foram: profundidade; porcentagem de areia, silte e argila, e de carbono orgânico; pH em água; conteúdo de água no ponto de murcha permanente, capacidade de campo e ponto de saturação; densidade do solo; e capacidade de troca catiônica. Além desses dados, cada modelo possuía suas especificidades no que se refere a outras variáveis do solo. Mais detalhes sobre os perfis de solo são apresentados no APÊNDICE B4.

Tabela 4.2. Características texturais, físicas e químicas dos solos utilizados no presente estudo.

Prof. (cm)	Hor.	Areia	Silte (%)	Argila	Ds (g cm ⁻³)	C _{org} (%)	pH	PMP	CC (%)	Θ _s	CTC (cmolc kg ⁻¹)
Neossolo Quartzarênico distrófico (NQd)											
20	A	91	4	5	1,45	0,82	5,7	7,1	11,9	43,1	7,30
45	AC	89	4	7	1,50	0,40	4,9	7,4	12,6	41,3	4,50
55	C1	88	4	8	1,56	0,40	4,8	7,5	13,2	39,0	6,20
Latosolo Vermelho-escuro distroférico (LVEd)											
10	Ap	71	15	14	1,46	2,8	5,5	12,6	20,8	45,1	10,22
25	A3	76	10	14	1,50	0,7	4,4	11,5	18,9	43,0	4,70
57	B1	72	11	17	1,52	0,5	4,0	12,9	20,7	42,2	4,34
Latosolo Roxo distrófico (LRd)											
15	Ap	19	30	51	1,23	2,07	5,2	27,7	39,1	55,4	8,60
30	A3	11	35	54	1,26	1,60	5,4	28,2	40,6	54,8	6,30
60	B1	13	33	54	1,28	0,99	5,4	28,1	39,8	53,5	4,30

Prof. = profundidade (cm); Hor. = horizonte; Ds = densidade do solo; C_{org} = carbono orgânico; pH = pH em água; PMP = conteúdo de água no ponto de murcha permanente; CC = conteúdo de água na capacidade de campo; Θ_s = conteúdo de água no ponto de saturação do solo; CTC = capacidade de troca catiônica.

Fonte: Adaptado de Vianna e Sentelhas (2014) e RadamBrasil (1982, 1983).

4.2.4. Modelos de simulação de produtividade da cultura do algodoeiro

O uso da abordagem multi-modelos é uma forma de melhorar a precisão e reduzir as incertezas dos modelos de simulação de produtividade de culturas quando comparado com a abordagem individualizada (ASSENG et al., 2013). O desempenho dos modelos apresentados no Capítulo 3 desta tese confirmam esta hipótese. Com base nisso, o presente estudo simulou a produtividade da cultura do algodoeiro com três diferentes modelos de simulação de cultura: FAO – Zona Agroecológica (DOORENBOS; KASSAM, 1979; KASSAM, 1977; RAO; SARMA;

CHANDER, 1988), referido como MZA-FAO; FAO – AquaCrop v. 6.1 (EVETT et al., 2012; RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009), referido como AquaCrop; e CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) v. 4.7 (HOOGENBOOM et al., 2012; JONES et al., 2003; PATHAK et al., 2007), referido como DSSAT. A abordagem multi-modelos foi obtida a partir da média aritmética das produtividades simuladas pelos modelos individualmente. Detalhes sobre o desempenho dos modelos de simulação de produtividade do algodoeiro em abordagem individual e multi-modelos são apresentados no APÊNDICE C4.

4.2.4.1. Condições iniciais, datas de semeadura e cultivar

Para execução desses modelos, o teor inicial de água no solo foi definido pelo balanço hídrico que começou a ser executado dois anos antes da primeira semeadura, considerando a safra anterior como pousio. As simulações foram realizadas sem restrições nutricionais ou fitossanitárias, condições exigidas para obtenção da produtividade potencial (sem restrição de água no solo) e a produtividade atingível (com restrição de água no solo – condição de sequeiro) (SENTELHAS et al., 2015, 2016; VAN ITTERSUM et al., 2013). Essas produtividades foram simuladas para três diferentes datas de semeadura considerando as recomendações pelo ZARC para a cultura do algodão herbáceo, safra 2020/2021. As datas de semeadura foram simuladas no primeiro dia de cada decêndio do mês considerando uma data no início, no meio e no final da época de semeadura recomendada pelo ZARC para o algodoeiro em cada localidade. Mais informações sobre as épocas de semeadura simuladas para cada localidade são apresentadas no ANEXO A4.

A cultivar utilizada neste estudo foi a TMG44B2RF, pois foi a mais plantada no Brasil na safra 2019/2020 (ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 2020), além de ter sua semeadura recomendada pelo ZARC para todas as localidades estudadas. A TMG44B2RF é uma cultivar brasileira de algodão geneticamente modificada resistente a lagartas e ao herbicida Roundup®, possui ciclo médio-precoce e ótima qualidade de fibra (TMG, 2020).

4.2.4.2. Simulação das produtividades potencial e atingível

As simulações da PP e da PA foram realizadas por meio dos modelos MZA-FAO, AquaCrop e DSSAT calibrados para as condições brasileiras e apresentados no Capítulo 3 desta tese. As simulações foram realizadas em escala diária, exceto para o MZA-FAO, no qual as simulações foram realizadas em escala decendial. Os procedimentos para simulação da PP e da PA pelo MZA-FAO foram descritos no Capítulo 2 desta tese, mas, no presente estudo foram utilizados

os valores de K_y calibrados para cada fase fenológica da cultivar TMG44B2RF, que seguem: 0,75; 0,22; 0,46; 0,77; e 0,25, para as fases de estabelecimento, de crescimento vegetativo, de florescimento, de formação dos frutos e de maturação, respectivamente.

Para estimação da PP pelo modelo AquaCrop foi simulada a irrigação de modo que a quantidade de água aplicada proporcionasse o retorno do conteúdo de água no solo para a capacidade de campo. No DSSAT, a PP foi estimada por meio da simulação da irrigação automática quando requerida. O método de irrigação empregado nas simulações foi o de aspersão. Para simulação da PA, em ambos os modelos, não foi aplicada irrigação.

4.2.5. Análise do *yield gap* e das eficiências da cultura do algodoeiro

Para determinação das causas do *yield gap* da cultura do algodoeiro algumas inferências foram feitas. No presente estudo levou-se em consideração as abordagens apresentadas por Sentelhas et al. (2016); van Ittersum et al. (2013); e van Ittersum e Rabbinge (1997), as quais consideram que as principais causas do *yield gap* das culturas agrícolas são devido ao déficit hídrico e o déficit de manejo agrícola. As definições e a forma de cálculo dos *yield gaps* da cultura do algodoeiro são apresentadas a seguir:

- *Yield gap* por déficit hídrico (YG_{DH}): diferença entre a produtividade potencial e a atingível, ou seja, $YG_{DH} = PP - PA$ (VAN ITTERSUM et al., 2013);

- *Yield gap* por déficit de manejo agrícola (YG_{MA}): diferença entre a produtividade atingível e a real, ou seja, $YG_{MA} = PA - PR$ (VAN ITTERSUM et al., 2013). Nos casos em que PA foi menor que PR, o YG_{MA} não foi computado;

- *Yield gap* total (YG_T): diferença entre a produtividade potencial e a real (SENTELHAS et al., 2016), ou seja, $YG_T = PP - PR$ (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009).

Além dos *yield gaps*, também foram calculadas as eficiências da cultura do algodoeiro, as quais se dividem em:

- Eficiência climática (EC): indicador do nível do impacto da deficiência hídrica na produtividade agrícola, sendo definida pela relação percentual entre a PA e a PP [$EC = (PA/PP) \times 100$];

- Eficiência agrícola (EA): indicador do nível tecnológico dos produtores da região, sendo definida como a relação percentual entre a PR e a PA [$EA = (PR/PA) \times 100$] (BATTISTI; SENTELHAS; PILAU, 2012; MARIN et al., 2008). Nos casos em que PA foi menor que PR, a EA não foi computada.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Produtividades potencial, atingível e real

Os valores médios das produtividades (PP, PA e PR), dos *yield gaps* (YG_{DH}, YG_{MA} e YG_T) e eficiências (EC e EA) são apresentados nas Tabela 4.3, para os modelos MZA-FAO e AquaCrop, e Tabela 4.4, para o modelo DSSAT e para a abordagem multi-modelos.

Tabela 4.3. Produtividade potencial (PP), produtividade atingível (PA), simuladas pelos modelos MZA-FAO e AquaCrop, produtividade real (PR), *yield gap* por déficit hídrico (YG_{DH}), *yield gap* por déficit de manejo agrícola (YG_{MA}), *yield gap* total (YG_T), eficiência climática (EC) e eficiência agrícola (EA) da cultura do algodoeiro, em diferentes localidades brasileiras, considerando-se as médias para as safras de 1989/1990 a 2018/2019.

Municípios	PP	PA	PR	YG _{DH}	YG _{MA}	YG _T	EC	EA
	(kg ha ⁻¹)						(%)	
MZA-FAO								
Alcinópolis, MS	10252,51	8214,37	4855,48	2038,14	3358,89	5397,03	80,12	59,11
Balsas, MA	10637,59	6697,04	3673,38	3940,55	3023,66	6964,21	62,96	54,85
Campo Verde, MT	10106,76	7278,12	3923,22	2828,63	3354,91	6183,54	72,01	53,90
Correntina, BA	11570,60	5473,26	4988,85	6097,34	484,41	6581,75	47,30	91,15
Luís Eduardo Magalhães, BA	11015,31	6957,57	5028,74	4057,74	1928,84	5986,57	63,16	72,28
Panamá, GO	10451,89	6710,08	3977,75	3741,82	2732,33	6474,15	64,20	59,28
Paranapanema, SP	9614,63	8289,58	3999,28	1325,06	4290,30	5615,35	86,22	48,24
Paraúna, GO	10415,36	7125,35	4007,55	3290,01	3117,80	6407,81	68,41	56,24
Patrocínio, MG	10073,31	6751,94	4203,46	3321,37	2548,48	5869,85	67,03	62,26
Pedra Preta, MT	10203,57	6920,39	3990,63	3283,18	2929,76	6212,93	67,82	57,66
Rio Verde, GO	10044,46	6741,19	4419,91	3303,27	2321,28	5624,55	67,11	65,57
Sapezal, MT	9925,28	6788,56	4294,33	3136,72	2494,23	5630,95	68,40	63,26
Sidrolândia, MS	10701,68	9266,81	3833,59	1434,87	5433,21	6868,08	86,59	41,37
Sorriso, MT	10198,52	5410,87	4197,94	4787,64	1212,93	6000,58	53,06	77,58
Unai, MG	10664,19	6156,34	4244,09	4507,85	1912,26	6420,11	57,73	68,94
AquaCrop								
Alcinópolis, MS	6068,62	5292,49	4855,48	776,13	437,01	1213,14	87,21	91,74
Balsas, MA	6066,38	4119,38	3673,38	1947,00	446,00	2393,00	67,91	89,17
Campo Verde, MT	6073,30	4773,82	3923,22	1299,48	850,60	2150,08	78,60	82,18
Correntina, BA	6063,81	2545,48	4988,85	3518,33	-	1074,97	41,98	-
Luís Eduardo Magalhães, BA	6064,09	4106,25	5028,74	1957,84	-	1035,35	67,71	-
Panamá, GO	6065,97	4564,71	3977,75	1501,26	586,97	2088,22	75,25	87,14
Paranapanema, SP	6065,62	5638,41	3999,28	427,21	1639,13	2066,34	92,96	70,93
Paraúna, GO	6065,34	4500,63	4007,55	1564,71	493,08	2057,79	74,20	89,04
Patrocínio, MG	6074,99	4405,94	4203,46	1669,05	202,48	1871,53	72,53	95,40
Pedra Preta, MT	6069,65	4521,84	3990,63	1547,81	531,20	2079,01	74,50	88,25
Rio Verde, GO	6068,25	4538,35	4419,91	1529,90	118,44	1648,34	74,79	97,39
Sapezal, MT	6074,84	4639,00	4294,33	1435,84	344,67	1780,51	76,36	92,57
Sidrolândia, MS	6065,53	5508,39	3833,59	557,14	1674,80	2231,94	90,81	69,60
Sorriso, MT	6074,04	3657,00	4197,94	2417,04	-	1876,10	60,21	-
Unai, MG	6066,10	3583,74	4244,09	2482,36	-	1822,01	59,08	-

Tabela 4.4. Produtividade potencial (PP), produtividade atingível (PA), simuladas pelo modelo DSSAT e pela abordagem multi-modelos, produtividade real (PR), *yield gap* por déficit hídrico (YG_{DH}), *yield gap* por déficit de manejo agrícola (YG_{MA}), *yield gap* total (YG_T), eficiência climática (EC) e eficiência agrícola (EA) da cultura do algodoeiro em diferentes localidades brasileiras, considerando-se as médias para as safras de 1989/1990 a 2018/2019.

Municípios	PP	PA	PR	YG _{DH}	YG _{MA}	YG _T	EC	EA
	(kg ha ⁻¹)						(%)	
CROPGRO- <i>Cotton</i> (DSSAT)								
Alcinópolis, MS	10063,70	7542,33	4855,48	2521,36	2686,85	5208,22	74,95	64,38
Balsas, MA	9990,50	6576,56	3673,38	3413,95	2903,18	6317,12	65,83	55,86
Campo Verde, MT	9898,38	6964,23	3923,22	2934,15	3041,01	5975,16	70,36	56,33
Correntina, BA	11112,50	3735,98	4988,85	7376,52	-	6123,65	33,62	-
Luís Eduardo Magalhães, BA	10987,44	6660,52	5028,74	4326,93	1631,78	5958,71	60,62	75,50
Panamá, GO	10402,61	5961,56	3977,75	4441,06	1983,81	6424,87	57,31	66,72
Paranapanema, SP	10116,15	6259,58	3999,28	3856,57	2260,30	6116,87	61,88	63,89
Paraúna, GO	10922,08	7231,33	4007,55	3690,75	3223,78	6914,53	66,21	55,42
Patrocínio, MG	10076,55	4282,56	4203,46	5793,99	79,10	5873,09	42,50	98,15
Pedra Preta, MT	9844,88	6822,85	3990,63	3022,03	2832,21	5854,25	69,30	58,49
Rio Verde, GO	9971,64	5755,42	4419,91	4216,22	1335,51	5551,73	57,72	76,80
Sapezal, MT	9794,86	6231,72	4294,33	3563,14	1937,39	5500,53	63,62	68,91
Sidrolândia, MS	10788,65	6881,25	3833,59	3907,41	3047,65	6955,06	63,78	55,71
Sorriso, MT	9900,41	5641,99	4197,94	4258,42	1444,05	5702,47	56,99	74,41
Unai, MG	10435,24	4869,83	4244,09	5565,41	625,74	6191,15	46,67	87,15
Multi-modelos								
Alcinópolis, MS	8684,02	6931,41	4855,48	1752,61	2075,93	3828,54	79,82	70,05
Balsas, MA	8812,64	5691,73	3673,38	3120,91	2018,35	5139,26	64,59	64,54
Campo Verde, MT	8577,53	6250,36	3923,22	2327,18	2327,14	4654,31	72,87	62,77
Correntina, BA	9463,94	3893,31	4988,85	5570,63	-	4475,09	41,14	-
Luís Eduardo Magalhães, BA	9225,78	5737,61	5028,74	3488,17	708,87	4197,05	62,19	87,65
Panamá, GO	8843,69	5660,44	3977,75	3183,25	1682,69	4865,94	64,01	70,27
Paranapanema, SP	8452,86	6793,36	3999,28	1659,49	2794,08	4453,58	80,37	58,87
Paraúna, GO	8987,21	6201,20	4007,55	2786,01	2193,65	4979,66	69,00	64,63
Patrocínio, MG	8615,66	5235,89	4203,46	3379,77	1032,43	4412,20	60,77	80,28
Pedra Preta, MT	8602,49	5971,87	3990,63	2630,62	1981,24	4611,86	69,42	66,82
Rio Verde, GO	8585,29	5653,10	4419,91	2932,19	1233,19	4165,38	65,85	78,19
Sapezal, MT	8471,74	5914,75	4294,33	2556,99	1620,42	4177,41	69,82	72,60
Sidrolândia, MS	9044,25	7234,36	3833,59	1809,89	3400,77	5210,66	79,99	52,99
Sorriso, MT	8600,49	4798,11	4197,94	3802,38	600,17	4402,55	55,79	87,49
Unai, MG	8929,24	4863,10	4244,09	4066,14	619,02	4685,15	54,46	87,27

As produtividades (PP e PA) simuladas pelos três diferentes modelos variaram substancialmente (Tabelas 4.3 e 4.4), o que indica as discrepâncias entre os três modelos, gerando um elevado grau de incerteza em relação ao melhor deles e justificando o uso da abordagem multi-modelos. Analisando os dados da combinação dos três modelos empregados, observou-se que a PP média variou entre 8452,86 kg ha⁻¹, em Paranapanema, e 9463,94 kg ha⁻¹, em Correntina (Tabela 4.4). Esses valores representam a produtividade máxima que o algodoeiro pode obter sob

condições hídricas e de manejo ótimas (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; VAN ITTERSUM et al., 2013). Os maiores valores da PP foram obtidos na região de Correntina, onde o clima é tropical com inverno seco, classificado como Aw pelos critérios de Köppen (ALVARES et al., 2013). Os elevados valores de PP em Correntina estão relacionados à maior incidência de radiação solar na região (Tabela 4.1). A radiação solar é o principal fator determinante da PP para um dado genótipo, mesmo porque essa variável meteorológica está intimamente relacionada com os demais fatores que definem a magnitude da PP, ou seja, a temperatura do ar e o fotoperíodo (SENTELHAS et al., 2016; VAN ITTERSUM et al., 2013). Mais detalhes sobre as características climáticas das localidades consideradas neste estudo podem ser encontrados no APÊNDICE D4.

Os menores valores de PP foram obtidos na região de Paranapanema, a qual possui clima subtropical úmido, sem estação seca e verão quente, classificado como Cfa pelos critérios de Köppen (ALVARES et al., 2013). Essa região é caracterizada por apresentar mais nebulosidade ao longo do ano, levando a uma menor incidência de radiação solar direta sobre a superfície (Tabela 4.1), como reportado por Dias e Sentelhas (2017). A temperatura do ar também é um dos fatores que determinam a PP (SENTELHAS et al., 2016; VAN ITTERSUM et al., 2013), portanto, a condição de temperaturas amenas também pode levar à diminuição da PP.

Os resultados obtidos neste estudo para PP estiveram acima ou próximos daqueles encontrados em outros estudos, tanto quando se empregou os modelos individualmente como quando se utilizou a abordagem multi-modelos. Constable e Bange (2015) estimaram a PP de diversas cultivares de algodoeiro nos Estados Unidos, por meio de três métodos: taxas máximas de crescimento da cultura, eficiência máxima de uso de radiação e o modelo OzCot (APSIM), e obtiveram 7448 kg ha⁻¹, 7391 kg ha⁻¹ e 7817 kg ha⁻¹ (considerou-se o índice de colheita para o algodão em caroço ($IC_{\text{algodão em caroço}}$) de 60%), respectivamente. Os mesmos autores reportaram que na China, a PP pode atingir até 7508 kg ha⁻¹ ($IC_{\text{algodão em caroço}} = 60\%$). Esses valores são superiores aos encontrados para a cultura do algodoeiro por Baker e Hesketh (1969), da ordem de 6533 kg ha⁻¹ ($IC_{\text{algodão em caroço}} = 60\%$), nos Estados Unidos, e por Aslam (2016), que demonstrou que em condições irrigadas e plena tecnologia, a PP pode chegar a 4300 kg ha⁻¹, no Paquistão, valor muito aquém daquele reportado por Rosolem (2001) para as condições brasileiras (7500 kg ha⁻¹). Embora os resultados obtidos neste estudo estejam diferentes daqueles apresentados pela literatura, a magnitude dos valores de PP são realistas, seja qual for o modelo avaliado, especialmente, quando comparados com Constable e Bange (2015).

A variabilidade das PP e PA simuladas pelos modelos de forma individualizada e com a combinação dos resultados deles, ao longo das safras 1989/90 a 2018/19, é apresentada nas Figuras 4.2 a 4.6. Na abordagem individual, os modelos MZA-FAO e DSSAT apresentaram simulações de

produtividades semelhantes entre si, especialmente, para PP. Apesar do MZA-FAO ser mais simples, este conseguiu simular produtividades que se aproximam muito das produtividades oriundas do modelo inserido no DSSAT. Isso demonstra que a capacidade preditiva do MZA-FAO pode se assemelhar às dos modelos mais complexos e, por ser mais simples, é mais acessível ao usuário, além de apresentar resultados confiáveis. Os bons resultados obtidos pelo modelo MZA-FAO em relação aos modelos de simulação de culturas mais complexos, também foram reportados em pesquisas com outras culturas no Brasil, como da cana-de-açúcar (DIAS; SENTELHAS, 2017), do eucalipto (ELLI et al., 2019a), do milho (DUARTE; SENTELHAS, 2020a) e da soja (BATTISTI; SENTELHAS; BOOTE, 2017). As PPs simuladas pelos modelos MZA-FAO e DSSAT foram mais elevadas do que aquelas obtidas pelo modelo AquaCrop ou pela abordagem multi-modelos.

Figura 4.2. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro, estimadas pelos modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e abordagem multi-modelos, e produtividade real (PR), nas regiões de (A) Alcinópolis, MS e (B) Balsas, MA, para as safras de 1989-90 a 2018-19.

Figura 4.3. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro, estimadas pelos modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e abordagem multi-modelos, e produtividade real (PR), nas regiões de (A) Campo Verde, MT, (B) Correntina, BA, (C) Luís Eduardo Magalhães, BA e (D) Panamá, GO, para as safras de 1989-90 a 2018-19.

Figura 4.4. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro, estimadas pelos modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e abordagem multi-modelos, e produtividade real (PR), nas regiões de (A) Paranapanema, SP, (B) Paraúna, GO, (C) Patrocínio, MG e (D) Pedra Preta, MT, para as safras de 1989-90 a 2018-19.

Figura 4.5. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro, estimadas pelos modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e abordagem multi-modelos, e produtividade real (PR), nas regiões de (A) Rio Verde, GO, (B) Sapezal, MT, (C) Sidrolândia, MS e (D) Sorriso, MT, para as safras de 1989-90 a 2018-19.

Figura 4.6. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro, estimadas pelos modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e abordagem multi-modelos, e produtividade real (PR), na região de Unaí, MG, para as safras de 1989-90 a 2018-19.

Os valores da PP apresentaram menor variabilidade quando comparados aos da PA e da PR para todos os modelos em abordagem individual e, também, pela abordagem multi-modelos, considerando-se uma análise geral, com todas as localidades avaliadas (Figuras 4.2 a 4.6). Isso se deve ao fato de que a PP é obtida em condições sem restrições de ordem hídrica, nutricional e fitossanitária, sendo que o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura do algodoeiro é condicionada apenas pelo fatores determinantes, ou seja, pela interação entre o genótipo e a energia disponível no ambiente, representada pelas condições de radiação solar, temperatura do ar e fotoperíodo, além da concentração de dióxido de carbono na atmosfera (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; VAN ITTERSUM et al., 2013; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997). Deste modo, apesar das diferenças entre os climas das áreas estudadas (ALVARES et al., 2013) e da variação dos elementos climáticos (Tabela 4.1), esses variam pouco durante o ciclo do algodoeiro, fazendo com que a variabilidade da PP também seja pequena. Apesar disso, a amplitude dessas poucas variações de PP foi ligeiramente diferente entre os modelos empregados (Figuras 4.2 a 4.6), mostrando que as distintas estruturas dos modelos levam a resultados discrepantes, o que justifica o emprego da abordagem multi-modelos, por meio da média dos resultados apresentados por cada um dos modelos de simulação quando empregados individualmente, reduzindo as incertezas das estimativas.

As médias da PA, estimadas pela abordagem multi-modelos para as regiões estudadas, variaram entre 3893,31 kg ha⁻¹, em Correntina, e 7234,36 kg ha⁻¹, em Sidrolândia (Tabela 4.4). Esses valores representam a máxima produtividade que os produtores poderão atingir em condições de sequeiro, porém, com manejo agrícola ótimo (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; SENTELHAS et al., 2016; VAN ITTERSUM et al., 2013). Portanto, a ocorrência de estresses hídricos, seja por deficiências (mais comum) e excedentes hídricos afetam diretamente a PA. A

região de Sidrolândia, que apresentou os maiores valores médios de PA se encontra em uma região cujo clima é tropical com inverno seco, ou seja, Aw de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013), porém com pouca deficiência hídrica média anual, da ordem de 42 mm (Tabela 4.1), o que favorece a PA da cultura do algodoeiro na região. No entanto, tal condição pode, por outro lado, afetar a qualidade das fibras, assim como o processo de colheita.

Os menores valores de PA em Correntina (Tabela 4.4), estão relacionados aos maiores níveis de deficiência hídrica dessa região, que chega a atingir, em média, 540 mm por ano (Tabela 4.1). O déficit hídrico, dependendo de sua duração, intensidade e da fase fenológica em que ocorre, afeta o crescimento, o desenvolvimento, a produtividade e a qualidade das fibras do algodoeiro (LOKA; OOSTERHUIS, 2012; ROSOLEM, 2001; ZONTA et al., 2017). A deficiência hídrica é um dos fatores que mais limitam a produtividade agrícola. Assim, sob condições de déficit hídrico intenso a PA tende a ser muito menor do que a PP (HOCHMAN et al., 2012; VAN ITTERSUM et al., 2013), o que pode ser claramente visto nas Tabelas 4.3 e 4.4 e nas Figuras 4.2 a 4.6.

Os valores de PA obtidos neste estudo são similares ou ligeiramente superiores aos reportados na literatura, com PA simulada com modelos individuais. Li et al. (2019) simulando a PA do algodoeiro com o modelo DSSAT obtiveram valores da ordem de 6145 kg ha⁻¹ na China. Hussein, Janat e Yakoub (2011) simulando a PA com o modelo AquaCrop encontraram valores variando entre 5000 kg ha⁻¹ e 5200 kg ha⁻¹ na Síria, enquanto Qiao (2012), para as regiões produtoras de algodão dos Estados Unidos, obteve valores que variaram de 3380 kg ha⁻¹ a 3860 kg ha⁻¹. As diferenças observadas entre esses estudos e deles com os dados aqui reportados se devem à calibração dos modelos e às variações do clima das regiões avaliadas.

A simulação da PA apresentou maior variabilidade quando comparado com a PP e a PR para todos os modelos em abordagem individual e multi-modelos, para todas as localidades avaliadas (Figuras 4.2 a 4.6). A PA é obtida quando a cultura é submetida, além dos fatores determinantes, aos fatores limitantes a produtividade agrícola, como restrição de água e nutrientes, os quais apresentam uma maior variabilidade interanual do que os fatores associados à energia do ambiente. Assim, a variabilidade temporal e espacial das chuvas, assim como a variabilidade das condições dos solos, associadas à CAD, levam a uma grande variação das condições de disponibilidade de água no solo entre diferentes locais e anos da série histórica, o que se repercute na magnitude e variabilidade da PA.

Com relação à magnitude da PA obtida pelos diferentes modelos de simulação (Tabelas 4.3 e 4.4 e Figuras 4.2 a 4.6), observa-se que o modelo AquaCrop resultou em valores menores do que os obtidos pelos modelos MZA-FAO e DSSAT, mesmo que na fase de calibração e validação todos terem apresentado bom desempenho ao estimar a produtividade do algodoeiro. Apesar

dessas diferenças, no entanto, os resultados estão dentro da magnitude dos valores apresentados em outros estudos (HUSSEIN; JANAT; YAKOUB, 2011; QIAO, 2012), o que de certa forma confirma que os dados aqui apresentados são confiáveis.

Os valores de PR variaram substancialmente entre as localidades estudadas (Tabelas 4.3 e 4.4), dependendo, principalmente, das condições meteorológicas, das características físico-hídricas do solo e do manejo agrícola. Além disso, apesar da predominância das áreas de sequeiro, a PR abrange cultivos com e sem irrigação, o que colabora para aumentar ainda mais a variabilidade da PR entre as localidades estudadas. As médias de PR observadas nas regiões analisadas variaram entre 3673,38 kg ha⁻¹, em Balsas, e 5028,74 kg ha⁻¹, em Luís Eduardo Magalhães (Tabelas 4.3 e 4.4). A PR é resultante da interação entre todos os fatores que afetam a produtividade, ou seja, os fatores determinantes, limitantes e redutores. Os fatores redutores são aqueles que diferenciam a PR da PA, sendo, portanto, relacionados ao manejo agrícola e ao nível tecnológico de cada produtor (SENTELHAS et al., 2015; VAN ITTERSUM et al., 2013). Provavelmente, os cultivos de algodão localizados em Luís Eduardo Magalhães, Correntina e Alcinópolis, receberam algum nível de irrigação durante o ciclo, o que justifica as elevadas PRs nessas regiões, especialmente, no oeste da Bahia. Balsas está localizada em uma região de recente avanço da fronteira agrícola no Brasil, denominada de MATOPIBA, formada pelos estados do Maranhão (MA), Tocantins (TO), Piauí (PI) e oeste da Bahia (BA), onde as técnicas de manejo agrícola para a cultura do algodoeiro ainda se encontram em consolidação, justificando os menores níveis de produtividade.

Detalhes da variabilidade das PP e PA simuladas pelos modelos de simulação da cultura do algodoeiro com as abordagens individual e multi-modelos, assim como da PR podem ser encontradas no APÊNDICE E4.

4.3.2. Yield gap da cultura do algodoeiro

O YG_T da cultura do algodoeiro para as localidades analisadas e os valores de sua partição em YG_{DH} e YG_{MA} são apresentados na Figura 4.7. As médias de YG_{DH} para as localidades estudadas variaram de 1659,49 kg ha⁻¹ a 5570,63 kg ha⁻¹ (Tabela 4.4). Os maiores valores de YG_{DH} foram obtidos em Correntina (Figura 4.7A), onde o déficit hídrico médio anual foi de 540 mm (Tabela 4.1). Nessa localidade também foi encontrado o menor valor de EC (41,14%), demonstrando que a deficiência hídrica foi responsável por 58,86% das perdas de produtividade na região.

Figura 4.7. Variabilidade interanual dos *yield gaps* da cultura do algodoeiro (A – *Yield gap* por deficiência hídrica; B – *yield gap* por déficit de manejo agrícola; C – *yield gap* total) estimados pela abordagem multi-modelos para as localidades de: ALCI: Alcinoópolis, MS; BALS: Balsas, MA; CAVE: Campo Verde, MT; CORR: Correntina, BA; LEMA: Luís Eduardo Magalhães, BA; PANA: Panamá, GO; PAMA: Paranapanema, SP; PARA: Paraúna, GO; PATR: Patrocínio, MG; PEPR: Pedra Preta, MT; RVER: Rio Verde, GO; SAPE: Sapezal, MT; SIDR: Sidrolândia, MS; SORR: Sorriso, MT; e UNAI: Unaí, MG. O *yield gap* por déficit de manejo agrícola para Correntina não foi computado.

Já os menores valores de YG_{DH} foram obtidos em Paranapanema (Figura 4.7A), onde o déficit hídrico médio anual foi de 3 mm (Tabela 4.1). Nessa mesma localidade também foram encontrados os maiores valores de EC (80,37%) (Tabela 4.4), demonstrando que a deficiência hídrica foi responsável por apenas 19,63% das perdas de produtividade do algodoeiro na região.

As médias de YG_{MA} para as localidades estudadas variaram entre 600,17 kg ha⁻¹ e 3400,77 kg ha⁻¹ (Tabela 4.4). O maior valor de YG_{MA} médio foi observado em Sidrolândia (Tabela 4.4 e Figura 4.7B). No entanto, o maior valor médio de EA (87,65%) ocorreu em Luís Eduardo Magalhães, o que demonstra que o manejo agrícola foi responsável por 12,35% das perdas de produtividade na região. Já o menor valor médio de YG_{MA} ocorreu em Sorriso (Tabela 4.4 e Figura 4.7B). Entretanto, o menor valor médio de EA (52,99%) ocorreu em Sidrolândia, o que demonstra que o manejo agrícola foi responsável por 47,01% das perdas de produtividade na região. O YG_{MA} e a EA não foram computados para Correntina (Tabela 4.4 e Figura 4.7B), pois os resultados encontrados evidenciam que nessa localidade a cultura do algodoeiro pode estar sendo irrigada, o que eleva a PA e, conseqüentemente, a PR. Assim, neste caso, os resultados obtidos não representam fielmente a realidade, já que nas simulações de PA não foram consideradas as lâminas de irrigação efetivamente aplicadas.

As médias de YG_T para as localidades estudadas variaram entre 3828,54 kg ha⁻¹, em Alcínópolis, e 5210,66 kg ha⁻¹, em Sidrolândia, ambas no estado do Mato Grosso do Sul (Tabela 4.4). De acordo com os resultados da Tabela 4.4 e da Figura 4.7C, a principal causa das perdas de produtividade nessas localidades se deveu ao déficit de manejo agrícola. Aproximadamente, 80% das localidades analisadas mostraram que a principal causa do *yield gap* da cultura do algodoeiro é a deficiência hídrica. Somente as localidades pertencentes aos estados de Mato Grosso do Sul e São Paulo (Alcínópolis, Sidrolândia e Paranapanema) tiveram como a principal causa do *yield gap* da cultura do algodoeiro as deficiências no manejo agrícola, pois nessas localidades não houve grande deficiência hídrica durante o ciclo da cultura (Tabela 4.1). Em termos relativos, o déficit hídrico representou, em média, 66% do YG_T , enquanto o manejo agrícola foi responsável por 34% (Tabela 4.4), sendo que a influência da deficiência hídrica no YG_T foi mais variável do que a das práticas de manejo da cultura.

As magnitudes do YG_T obtidos neste estudo estão acima daquelas reportadas na literatura. Aggarwal et al. (2008) encontraram valores de YG_T na Índia variando de 550 kg ha⁻¹, em fazendas de altas produtividades, a 1120 kg ha⁻¹, quando empregados modelos de simulação. Elum e Sekar (2015), também na Índia, encontraram valores de YG_T variando de 594 kg ha⁻¹, para cultivos de algodão convencional, a 1658 kg ha⁻¹, para aqueles geneticamente modificados (transgênicos). Aslam (2016) obteve a YG_T de 2430 kg ha⁻¹, no Paquistão, enquanto Warade et al. (2010)

encontraram um *yield gap* médio do algodoeiro de 865 kg ha⁻¹, nos Estados Unidos, havendo pouca diferença entre a magnitude desses *yield gaps* entre as pequenas (YG_T = 893 kg ha⁻¹) e médias (YG_T = 834 kg ha⁻¹) propriedades. Apesar das diferenças observadas entre o presente estudo e a literatura, a abordagem multi-modelos mostrou-se eficiente em quantificar a magnitude do YG_T do algodoeiro no Brasil e determinar suas principais causas.

4.4. Conclusões

Os modelos de simulação de produtividade, empregados com a abordagem multi-modelos, permite estimar as produtividades potencial e atingível do algodoeiro, assim como avaliar a magnitude do *yield gap* da cultura em diferentes regiões brasileiras. As produtividades potenciais variaram entre 8453 kg ha⁻¹ e 9464 kg ha⁻¹, ao passo que as produtividades atingíveis oscilaram entre 3893 kg ha⁻¹ e 7234 kg ha⁻¹ e as produtividades reais entre 3673 kg ha⁻¹ e 5029 kg ha⁻¹, o que mostra que há possibilidade de aumento da produtividade do algodoeiro nas principais regiões produtoras do Brasil. Os YG_T do algodoeiro no Brasil variaram entre 3829 kg ha⁻¹ e 5211 kg ha⁻¹, sendo que 66% desse valor se deve à ocorrência de deficiências hídricas ao longo do ciclo da cultura, enquanto as deficiências no manejo agrícola foram responsáveis por 34% das perdas. Em razão disso, observa-se que há possibilidade de aumento da produtividade do algodoeiro no Brasil, as quais poderão ser obtidas, principalmente, com base em ações, como uso de cultivares mais tolerantes à seca; manejo para aumento da capacidade de retenção de água no solo; uso da irrigação, especialmente, na fase reprodutiva da cultura, quando o consumo hídrico da cultura é maior e há, normalmente, escassez de chuva.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, P. et al. Simulating future climate change impacts on seed cotton yield in the Texas High Plains using the CSM-CROPGRO-Cotton model. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 317–330, 2016.
- AGGARWAL, P. K. et al. **Global theme on agroecosystems: Quantification of yield gaps in rainfed rice, wheat, cotton and mustard in India**. Andhra Pradesh: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 2008.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

- ALVES, L. R. A.; LIMA, F. F.; FERREIRA FILHO, J. B. DE S. Aspectos econômicos. In: BORÉM, A.; FREIRE, E. C. (Eds.). **Algodão: Do plantio a colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2014. p. 9–30.
- ANDREA, M. C. S. et al. Variability and limitations of maize production in Brazil: Potential yield, water-limited yield and yield gaps. **Agricultural Systems**, v. 165, p. 264–273, 2018.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2019.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2020.
- ASLAM, M. Agricultural productivity current scenario, constraints and future prospects in Pakistan. **Sarhad Journal of Agriculture**, v. 32, n. 4, p. 289–303, 2016.
- ASSENS, S. et al. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 827–832, 2013.
- BAKER, D. N.; HESKETH, J. D. Respiration and the carbon balance in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). In: **Proceedings of the Beltwide Cotton Production Research Conferences**. New Orleans: National Cotton Council, 1969. p. 60–64.
- BATTISTI, R. et al. Rules for grown soybean-maize cropping system in Midwestern Brazil: Food production and economic profits. **Agricultural Systems**, v. 182, p. 102850, 2020.
- BATTISTI, R.; BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Assessment of different gridded weather data for soybean yield simulations in Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 135, n. 1–2, p. 237–247, 2019.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 200, p. 28–37, 2017.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G. Eficiência agrícola da produção de soja, milho e trigo no estado do Rio Grande do Sul entre 1980 e 2008. **Ciência Rural**, v. 42, n. 1, p. 24–30, 2012.
- BOSI, C. et al. CROPGRO-Perennial Forage model parameterization for simulating Piatã palisade grass growth in monoculture and in a silvopastoral system. **Agricultural Systems**, v. 177, p. 102724, 2020.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Projeto Radam Brasil. Folha SD. 23 Brasília: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1982.

- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Projeto Radam Brasil. Folha SE. 22 Goiânia: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra.** Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1983.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial do Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.
- CHIAVEGATO, E. J.; SALVATIERRA, D. K. DE; GOTTARDO, L. C. B. Algodão. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Ed.). **Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola.** 1a ed. Brasília: INMET, 2009. p. 33–49.
- CONSTABLE, G. A.; BANGE, M. P. The yield potential of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Field Crops Research**, v. 182, p. 98–106, 2015.
- DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Evaluation of three sugarcane simulation models and their ensemble for yield estimation in commercially managed fields. **Field Crops Research**, v. 213, p. 174–185, 2017.
- DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. **Science of The Total Environment**, v. 637–638, p. 1127–1136, 2018.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper No. 33.** Roma, Italy: FAO, 1979.
- DUARTE, Y. C. N. **Modelos de simulação da cultura do milho: Uso na determinação das quebras de produtividade (*yield gaps*) e na previsão de safra da cultura no Brasil.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2018.
- DUARTE, Y. C. N.; SENTELHAS, P. C. Intercomparison and performance of maize crop models and their ensemble for yield simulations in Brazil. **International Journal of Plant Production**, v. 14, n.1, p. 127–139, 2020a.
- DUARTE, Y. C. N.; SENTELHAS, P. C. NASA/POWER and DailyGridded weather datasets—how good they are for estimating maize yields in Brazil? **International Journal of Biometeorology**, v. 64, n. 3, p. 319–329, 2020b.
- ELLI, E. F. et al. Intercomparison of structural features and performance of *Eucalyptus* simulation models and their ensemble for yield estimations. **Forest Ecology and Management**, v. 450, p. 117493, 2019a.
- ELLI, E. F. et al. Assessing the growth gaps of *Eucalyptus* plantations in Brazil – Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management**, v. 451, p. 117464, 2019b.

- ELUM, Z. A.; SEKAR, C. An empirical study of yield gap in seed cotton production in Tamil Nadu state, **India**. **Indian Journal of Agricultural Research**, v. 49, n. 6, p. 549–553, 2015.
- EVETT, S. R. et al. Cotton. In: STEDUTO, P. et al. (Eds.). **Crop yield response to water. Irrigation and Drainage Paper No 66**. Roma, Italy: FAO, 2012. p. 150–161.
- FAO. **FAOSTAT**. 2020. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat>>. Acesso em: 5 fev. 2021.
- HEINEMANN, A. B.; SENTELHAS, P. C. Environmental group identification for upland rice production in central Brazil. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 5, p. 540–547, 2011.
- HOCHMAN, Z. et al. Quantifying yield gaps in rainfed cropping systems: A case study of wheat in Australia. **Field Crops Research**, v. 136, p. 85–96, 2012.
- HOOGENBOOM, G. et al. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]**. Honolulu: University of Hawaii, 2012.
- HUSSEIN, F.; JANAT, M.; YAKOUB, A. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 4, p. 1319–1330, 2011.
- IBGE. **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias: 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.
- IBGE. **Produção Agrícola Municipal 2019**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.
- JONES, J. W. et al. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 235–263, 2003.
- KASSAM, A. H. **Net biomass production and yield crops**. Roma, Italy: FAO, 1977.
- LI, M. et al. Simulation of cotton growth and soil water content under film-mulched drip irrigation using modified CSM-CROPGRO-Cotton model. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 124–138, 2019.
- LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, n. 1, p. 179–204, 2009.
- LOKA, D. A.; OOSTERHUIS, D. M. Water stress and reproductive development in cotton. In: OOSTERHUIS, D. M.; COTHREN, J. T. (Eds.). **Flowering and fruiting in cotton**. Candova: The Cotton Foundation, 2012. p. 51–58.
- MARIN, F. R. et al. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 11, p. 1449–1455, 2008.
- MEIRELES, E. J. L. et al. Risco climático de quebra de produtividade da cultura do feijoeiro em Santo Antônio de Goiás, GO. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 163–171, 2003.

- MONTEIRO, J. E. B. DE A. et al. Modeling of corn yield in Brazil as a function of meteorological conditions and technological level. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 3, p. 137–148, 2017.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap: Can it be determined at national level with a simple agrometeorological model? **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 3, p. 272–284, 2017.
- NACHIMUTHU, G.; WEBB, A. A. Closing the biotic and abiotic stress-mediated yield gap in cotton by improving soil management and agronomic practices. In: **Plant tolerance to individual and concurrent stresses**. New Delhi: Springer India, 2017. p. 17–31.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: Part I – A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282–290, 1970.
- NÓIA JÚNIOR, R. DE S.; SENTELHAS, P. C. Yield gap of the double-crop system of main-season soybean with off-season maize in Brazil. **Crop and Pasture Science**, v. 71, n. 5, p. 445, 2020.
- PATHAK, T. B. et al. Use of global sensitivity analysis for CROPGRO Cotton model development. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 6, p. 2295–2302, 2007.
- PEREIRA, A.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002.
- QIAO, X. **Parameterization of FAO AquaCrop model for irrigated cotton in the humid southeast - US**. [s.l.] Clemson University, 2012.
- RAES, D. et al. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 438–447, 2009.
- RAO, N. H.; SARMA, P. B. S.; CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 13, p. 25–32, 1988.
- ROSOLEM, C. A. Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro. **Informações Agronômicas**, n. 95, p. 1–9, 2001.
- SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil: Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, p. 1–18, 2015.
- SENTELHAS, P. C. et al. *Yield gap*: Conceitos, definições e exemplos. **Informações Agronômicas**, n. 155, p. 9–12, 2016.
- STEDUTO, P. et al. 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.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.

- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955.
- THORP, K. R. et al. Development and application of process-based simulation models for cotton production: A review of past, present, and future directions. **The Journal of Cotton Science**, v. 18, p. 10–47, 2014.
- TMG. **Cultivares de algodão**. Disponível em: <<http://www.tmg.agr.br/>>. Acesso em: 31 jan. 2020.
- VAN ITTERSUM, M. K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance: A review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013.
- VAN ITTERSUM, M. K.; RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. **Field Crops Research**, v. 52, p. 197–208, 1997.
- VIANNA, M. DOS S.; SENTELHAS, P. C. Simulação do risco de deficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 237–246, 2014.
- VISSES, F. A.; SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. B. Yield gap of cassava crop as a measure of food security – An example for the main Brazilian producing regions. **Food Security**, v. 10, n. 5, p. 1191–1202, 2018.
- WARADE, S. et al. Yield gap analysis in cotton of Akola District. **Journal of Social and Economic Development**, v. 12, n. 1, p. 71–81, 2010.
- WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.
- XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.
- ZONTA, J. H. et al. Cotton response to water deficits at different growth stages. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 4, p. 980–990, 2017.

ANEXOS

ANEXO A4. Épocas de semeadura simuladas para a cultivar de algodoeiro TMG44B2RF

Localidade	Ciclo	Textura do solo	SET			OUT			NOV			DEZ			JAN			FEV			MAR		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Alcinópolis, MS	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Balsas, MA	Grupo III	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Campo Verde, MT	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Correntina, BA	Grupo III	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Luís Eduardo Magalhães, BA	Grupo III	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Panamá, GO	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Paranapanema, SP	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Paraúna, GO	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Patrocínio, MG	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Pedra Preta, MT	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Rio Verde, GO	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Sapezal, MT	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Sidrolândia, MS	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Sorriso, MT	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Unaí, MG	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					

Legenda:

Risco até:

20%

30%

40%

sem indicação

Ciclo da cultura: Grupo II (Médio); e Grupo III (Tardio), conforme portarias do Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura do algodoeiro herbáceo na safra 2020/2021 das localidades listadas; SET = Setembro; OUT = Outubro; NOV = Novembro; DEZ = Dezembro; JAN = Janeiro; FEV = Fevereiro; MAR = Março. Os números indicam os decêndios: 1 = 1 a 10; 2 = 11 a 20; 3 = 21 ao último dia do mês. Estados: MT = Mato Grosso; BA = Bahia; GO = Goiás; MS = Mato Grosso do Sul; MG = Minas Gerais; MA = Maranhão; SP = São Paulo

APÊNDICES

APÊNDICE A4. Relação de localidades

Tabela A4.1. Relação de localidades, região imediata e municípios utilizados para obter a produtividade real do algodão em caroço no período de 1990 a 2019

Localidades	Imediata	Municípios utilizados
Alcinópolis, MS	Coxim	Alcinópolis, Costa Rica, Coxim, Pedro Gomes
Balsas, MA	Balsas	Alto Parnaíba, Balsas, Tasso Fragoso
Campo Verde, MT	Cuiabá	Campo Verde, Chapada dos Guimarães, Nova Brasilândia, Santo Antônio do Leverger
Correntina, BA	Santa Maria da Vitória	Correntina, Jaborandi
Luís Eduardo Magalhães, BA	Barreiras	Barreiras, Luís Eduardo Magalhães, São Desidério
Panamá, GO	Itumbiara	Bom Jesus de Goiás, Cachoeira Dourada, Goiatuba, Itumbiara, Panamá
Paranapanema, SP	Avaré	Itaí, Paranapanema
Paraúna, GO	Palmeiras de Goiás	Acreúna, Edéia, Firminópolis, Indiara, Palmeiras de Goiás, Palminópolis, Paraúna, São João da Paraúna
Patrocínio, MG	Patrocínio	Coromandel, Patrocínio, Serra do Salitre
Pedra Preta, MT	Rondonópolis	Alto Garças, Guiratinga, Itiquira, Pedra Preta, Rondonópolis, São José do Povo
Rio Verde, GO	Rio Verde	Maurilândia, Montividiu, Rio Verde, Santa Helena de Goiás, Santo Antônio da Barra
Sapezal, MT	Tangará da Serra	Brasnorte, Campo Novo do Parecis, Sapezal, Tangará da Serra
Sidrolândia, MS	Campo Grande	Dois Irmãos do Buruti, Sidrolândia, Terenos
Sorriso, MT	Sorriso	Ipiranga do Norte, Lucas do Rio Verde, Nova Mutum, Nova Ubiratã, Santa Rita do Trivelato, Sorriso, Tapurah, Vera
Unaí, MG	Unaí	Bonfinópolis de Minas, Buritis, Unaí, Uruana de Minas

APÊNDICE B4. Perfis dos solos utilizados nas simulações

Tabela B4.1. Características físico-hídricas dos solos considerados no uso do modelo AquaCrop para a cultura do algodoeiro.

Profundidade do solo (m)	Textura	PMP	CC %	Θ_s	Ksat (mm dia ⁻¹)
Neossolo Quartzarênico distrófico (NQd)					
0,20	Arenosa	7,1	11,9	43,1	5040,0
0,45	Arenosa	7,4	12,6	41,3	5040,0
0,55	Arenosa	7,5	13,2	39,0	1466,4
Latossolo Vermelho-escuro distroférico (LVEd)					
0,10	Franca	12,6	20,8	45,1	621,6
0,25	Franca	11,5	18,9	43,0	621,6
0,57	Franca	12,9	20,7	42,2	621,6
Latossolo Roxo distrófico (LRd)					
0,15	Franco-argilosa	27,7	39,1	55,4	14,4
0,30	Franco-argilosa	28,2	40,6	54,8	14,4
0,60	Franco-argilosa	28,1	39,8	53,4	14,4

PMP = conteúdo de água no ponto de murcha permanente; CC = conteúdo de água na capacidade de campo; Θ_s = conteúdo de água no ponto de saturação do solo; Ksat = condutividade hidráulica.

Tabela B4.2. Perfil dos solos empregados nas simulações da cultura do algodoeiro com o modelo DSSAT.

Prof. do solo (cm)	LL	DUL	SAT	SKS	BDM	RGF	LOC	LCL	LSI	LHW	CEC
	cm ³ cm ⁻³			cm h ⁻¹	g cm ⁻³	%					cmolc kg ⁻¹
Neossolo Quartzarênico distrófico (NQd)											
20	0,071	0,119	0,431	21,0	1,45	1,0	2,90	5	4	5,2	13,5
45	0,074	0,126	0,413	21,0	1,50	1,0	2,10	7	4	5,3	10,6
55	0,075	0,132	0,390	6,11	1,56	0,638	1,40	8	4	5,6	8,9
Latossolo Vermelho-escuro distroférico (LVEd)											
10	0,126	0,208	0,451	2,59	1,46	1,0	2,80	14	15	5,5	10,2
25	0,115	0,189	0,430	2,59	1,50	1,0	0,70	14	10	4,4	4,7
57	0,129	0,207	0,422	2,59	1,52	0,638	0,50	17	11	4,0	4,3
Latossolo Roxo distrófico (LRd)											
15	0,277	0,391	0,554	0,06	1,23	1,0	1,07	51	30	5,2	8,6
30	0,282	0,406	0,548	0,06	1,26	1,0	1,60	54	35	5,4	6,3
60	0,281	0,398	0,535	0,06	1,28	0,638	0,99	54	33	5,4	4,3

Prof. = profundidade; LL = conteúdo de água no ponto de murcha permanente; DUL = conteúdo de água na capacidade de campo; SAT = conteúdo de água no ponto de saturação; SKS = condutividade hidráulica; BDM = densidade do solo; RGF = fator de crescimento radicular; LOC = carbono orgânico; LCL = argila; LSI = silte; LHW = pH em água; CEC = capacidade de troca catiônica.

APÊNDICE C4. Desempenho dos modelos de simulação do algodoeiro

Tabela C4.1. Desempenho dos modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e a abordagem multi-modelos para a cultura do algodoeiro, nas fases de calibração e validação.

Índices	Modelos			
	MZA-FAO	AquaCrop	DSSAT	Multi-modelos
Calibração (n = 24)				
r	0,97	0,83	0,88	0,95
R ²	0,95	0,69	0,77	0,90
d	0,99	0,91	0,90	0,97
C	0,96	0,75	0,79	0,92
EM (kg ha ⁻¹)	-10,88	76,84	14,96	-26,97
EAM (kg ha ⁻¹)	129,14	312,13	376,07	180,12
EAMP (%)	2,76	6,67	8,03	3,85
RMSE (kg ha ⁻¹)	147,13	382,43	488,87	227,97
E	0,95	0,64	0,42	0,87
Validação (n = 8)				
r	0,97	0,96	0,93	0,97
R ²	0,95	0,92	0,86	0,94
d	0,94	0,94	0,92	0,97
C	0,92	0,90	0,85	0,94
EM (kg ha ⁻¹)	-226,35	-368,54	-57,29	217,40
EAM (kg ha ⁻¹)	295,99	368,55	488,59	257,88
EAMP (%)	7,29	9,07	12,03	6,35
RMSE (kg ha ⁻¹)	366,00	483,87	619,97	332,68
E	0,83	0,70	0,51	0,86

n = número de dados; r = coeficiente de correlação de Pearson; R² = coeficiente de determinação; d = índice de concordância (WILLMOTT et al., 1985); C = índice de confiança (CAMARGO; SENTELHAS, 1997); EM = erro médio; EAM = erro absoluto médio; EAMP = erro absoluto médio em porcentagem; RMSE = raiz quadrada do erro médio; E = índice de eficiência de modelagem (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

APÊNDICE D4. Classificação climática segundo Köppen

Figura D4.1. Classificação climática segundo Köppen para as localidades estudadas.

APÊNDICE E4. Produtividades potencial, atingível e real do algodoeiro

Figura E4.1. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-Cotton (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Alcinoópolis, MS, entre as safras de os anos de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.2. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Balsas, MA, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.3. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-Cotton (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Campo Verde, MT, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.4. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-Cotton (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Correntina, BA, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.5. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-Cotton (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Luís Eduardo Magalhães, BA, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.6. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Panamá, GO, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.7. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-Cotton (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Paranapanema, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.8. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Paraúna, GO, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.9. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-Cotton (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Patrocínio, MG, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.10. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-Cotton (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Pedra Preta, MT, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.11. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Rio Verde, GO, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.12. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Sapezal, MT, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.13. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-Cotton (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Sidrolândia, MS, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.14. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-Cotton (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Sorriso, MT, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

Figura E4.15. Variabilidade interanual das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do algodoeiro estimadas pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), CROPGRO-Cotton (DSSAT) (C) e pela abordagem multi-modelos (D), e da produtividade real (PR), no município de Unai, MG, entre as safras de 1989-90 a 2018-2019.

5. MITIGAÇÃO DO *YIELD GAP* DA CULTURA DO ALGODOEIRO NO BRASIL COM O USO DA IRRIGAÇÃO, SIMULADA POR UMA ABORDAGEM MULTI-MODELOS

RESUMO

A deficiência hídrica é a principal causa do *yield gap* para cultura do algodoeiro no Brasil. Os modelos de simulação do algodoeiro, em abordagem individual e multi-modelos, podem ser utilizados para avaliar técnicas de manejo, como o uso da irrigação como ação para minimizar o *yield gap* da cultura. Sendo assim, este estudo teve como objetivo avaliar o uso da irrigação como ação de manejo para mitigação do *yield gap* da cultura do algodoeiro em diferentes regiões brasileiras, por meio da abordagem multi-modelos. Três modelos de simulação para a cultura do algodoeiro, Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO), AquaCrop e CROPGRO-*Cotton* (DSSAT), em abordagem individual e multi-modelos, foram utilizados para simular as produtividades do algodoeiro, avaliar o uso da irrigação e os consequentes incrementos de produtividades oriundos da reposição de água no solo. A avaliação foi feita para três tipos de solos com capacidades de água disponível (CAD) distintas, nas texturas arenosa (42 mm), média (66 mm) e argilosa (90 mm), assim como para diferentes suprimentos do déficit hídrico (0, 20, 40, 60, 80 e 100%), em quatro localidades representativas das principais regiões de produção de algodão no Brasil, Alcinópolis, MS, Balsas, MA, Campo Verde, MT, e Luís Eduardo Magalhães, BA, considerando-se para tanto séries históricas de dados meteorológicos de 30 anos. Os resultados mostraram que o aumento da produtividade depende da interação das condições meteorológicas, características físico-hídricas do solo, data de semeadura e nível de irrigação. As produtividades, assim como seus incrementos, aumentaram conforme a lâmina de irrigação aplicada. As localidades situadas em clima Aw (Balsas, Campo Verde e Luís Eduardo Magalhães) apresentaram maior resposta ao uso da irrigação em relação a localidade situada no clima Am (Alcinópolis). Os solos arenosos e os cultivos semeados em terceira época apresentaram maior resposta ao uso da irrigação, independentemente da lâmina de água aplicada. Os modelos de simulação da cultura do algodoeiro permitiram simular a produtividade de sequeiro e irrigada, tanto com a abordagem individual como na multi-modelos, em diferentes tipos de solo e épocas de semeadura. A abordagem multi-modelos minimizou as incertezas das simulações de produtividade da cultura para avaliação dos benefícios da irrigação. Conclui-se que a irrigação é uma importante ação de manejo da cultura do algodoeiro para mitigação do *yield gap* causado por déficit hídrico, atualmente um dos maiores problemas dessa atividade agrícola na grande maioria das regiões produtoras. Portanto, a irrigação é uma prática recomendada, especialmente, nas áreas de solos arenosos e nas semeaduras tardias, em que se tem maiores incrementos de produtividade.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L., Modelos de simulação de cultura, Zona Agroecológica (MZA-FAO), AquaCrop, CROPGRO-*Cotton* (DSSAT), Irrigação plena e deficitária

MITIGATION OF COTTON CROP YIELD GAP IN BRAZIL WITH THE USE OF IRRIGATION, SIMULATED BY A MULTI-MODEL APPROACH

ABSTRACT

Water deficiency is the main cause of cotton crop yield gap in Brazil. Cotton crop simulation models, in individual and multi-model approaches, can be used to evaluate management measures, such as the irrigation, as a tool for minimizing the yield gap of the crop. Therefore, this study aimed to evaluate the use of irrigation as a measure to mitigate the cotton crop yield gap in different Brazilian regions, through a multi-model approach. Three cotton crop simulation models, FAO Agroecological Zone (AZM-FAO), AquaCrop, and CROPGRO-*Cotton* (DSSAT), in an individual and a multi-model approaches, were used to simulate cotton yield, evaluate the use of irrigation and the consequent yield increases resulting from the replacement of water in the soil. The evaluation was made for three types

of soils with different soil water holding capacities (CAD), in three types of soils: sandy (42 mm); medium (66 mm); and clayey (90 mm), as well as for different levels of irrigation, corresponding to water deficit coverages (0, 20, 40, 60, 80 and 100%), in four representative locations of the main cotton production regions in Brazil: Alcinópolis, MS; Balsas, MA; Campo Verde, MT; and Luís Eduardo Magalhães, BA, considering weather historical series of 30 years. The results showed that the yield increases depend on the interaction of meteorological conditions, physical-hydric soil characteristics, sowing date, and irrigation level. Yields, as well as their increments, increased according to the depth of irrigation. The sites located in Aw climate (Balsas, Campo Verde, and Luís Eduardo Magalhães) showed greater responses to the use of irrigation in relation to the site located in the Am climate (Alcinópolis). The sandy soils and the crops sown lately showed a greater response to the use of irrigation, regardless of the water depth applied. The cotton crop models allowed to simulate the rainfed and irrigated yields, both with the individual approach and in the multi-models one, in different types of soils and sowing dates. The multi-model approach minimized the uncertainties of the simulated cotton yields to assess the benefits of irrigation. It is concluded that irrigation is an important measure to mitigate the cotton yield gap caused by water deficit, currently one of the biggest problems of this crop in most Brazilian producing regions. Therefore, irrigation is a recommended practice, especially in areas of sandy soils and late sowing, where yield increments will be higher.

Keywords: *Gossypium hirsutum* L., Crop simulation models, Agroecological Zone model (AZM-FAO), AquaCrop, DSSAT, Full and deficit irrigation

5.1. Introdução

A cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) é uma importante *commodity* a nível mundial, sendo responsável pela produção de 90% do algodão no mundo, e representa importante fonte de fibras, alimentos e de matéria-prima para a produção de biodiesel (CHIAVEGATO; SALVATIERRA; GOTTARDO, 2009; THORP et al., 2014). Atualmente, o Brasil é o quarto maior produtor de algodão em caroço (pluma e caroço) do mundo e o segundo maior exportador de fibras de algodão (ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 2020; FAO, 2020). Nos últimos anos, o Brasil vem se destacando devido ao aumento da produção, a qual foi decorrente do incremento na produtividade do algodão em caroço que passou de 1324 kg ha⁻¹, em 1997, para 4236 kg ha⁻¹, em 2019, representando um aumento de 320% (IBGE, 2020), o que foi impulsionado pelo aumento do consumo e melhoria nos preços de venda, especialmente, no mercado internacional (ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 2019).

Apesar do crescente aumento da produtividade, a cultura do algodoeiro no Brasil é cultivada como cultura de segunda safra (safrinha), sendo semeada logo após a colheita da soja, entre janeiro e fevereiro. Desse modo, a parte inicial do ciclo se dá nos meses chuvosos, com boa disponibilidade de água no solo, porém boa parte do ciclo, que envolve a fase reprodutiva, se dá durante os meses com redução das chuvas e baixa disponibilidade hídrica no solo (ALVES; LIMA; FERREIRA FILHO, 2014). A ocorrência de deficiência hídrica, dependendo de sua duração, intensidade e da fase fenológica, pode levar a perdas de produtividade (LOKA; OOSTERHUIS,

2012; ROSOLEM, 2001; ZONTA et al., 2017), também conhecidas como *yield gap* (SENTELHAS et al., 2016; VAN ITTERSUM et al., 2013).

A deficiência hídrica é a principal causa do *yield gap* do algodoeiro no Brasil, como confirmado pela análise realizada no Capítulo 4 desta tese. Essa também foi considerada a principal causa do *yield gap* para outras culturas no país, como a cana-de-açúcar (DIAS; SENTELHAS, 2018; MONTEIRO; SENTELHAS, 2017), a mandioca (VISSES; SENTELHAS; PEREIRA, 2018), a soja (SENTELHAS et al., 2015) e para a sucessão soja-milho (NÓIA JÚNIOR; SENTELHAS, 2020). Dias e Sentelhas (2018) e Monteiro e Sentelhas (2017) relataram que a deficiência hídrica representou de 56% a 76% do *yield gap* total da cultura da cana-de-açúcar; enquanto Visses, Sentelhas e Pereira (2018) reportaram que 61% do *yield gap* total da cultura da mandioca tiveram como principal causa a deficiência hídrica. Já Sentelhas et al. (2015) e Nóia Júnior e Sentelhas (2020) demonstraram que 69% e 52% do *yield gap* total da cultura da soja e da mesma cultura na sucessão soja-milho tiveram como principal causa a deficiência hídrica. Assim, uma das opções para a mitigação do *yield gap* das culturas causado pelo déficit hídrico é o uso da irrigação, seja ela com lâminas parciais ou plenas.

O dimensionamento das magnitudes, das causas e das estratégias de mitigação do *yield gap* podem ser estimados por meio de modelos de simulação de produtividade, especialmente, em abordagem multi-modelos (SENTELHAS et al., 2016; VAN ITTERSUM et al., 2013). Essa abordagem é recomendada, pois melhora a precisão e reduz as incertezas do uso dos modelos de simulação empregados individualmente (ASSENGET al., 2013). A abordagem multi-modelos foi utilizada na estimativa do *yield gap* de algumas culturas no Brasil, como da cana-de-açúcar (DIAS; SENTELHAS, 2018), do milho (DUARTE, 2018), e para a sucessão soja-milho (NÓIA JÚNIOR; SENTELHAS, 2020). Para a cultura do algodoeiro, tal abordagem ainda não foi aplicada no Brasil, assim como em outros países produtores da cultura.

Considerando-se que o *yield gap* pode levar a grandes perdas de produtividade na cultura do algodoeiro, que a principal causa do *yield gap* do algodoeiro no Brasil é a deficiência hídrica e que as estratégias de mitigação podem ser dimensionadas por meio do uso de modelos de simulação, em abordagem multi-modelos, o objetivo deste estudo foi avaliar o uso da irrigação como ação de manejo para mitigação do *yield gap* por déficit hídrico em diferentes regiões brasileiras produtoras de algodão, definindo-se os incrementos de produtividade e as lâminas de irrigação requeridas.

5.2. Material e métodos

5.2.1. Modelos de simulação da cultura do algodoeiro

No presente estudo a produtividade do algodoeiro foi simulada por meio de três modelos de simulação de cultura: FAO – Zona Agroecológica (DOORENBOS; KASSAM, 1979; KASSAM, 1977; RAO; SARMA; CHANDER, 1988), referido como MZA-FAO; FAO – AquaCrop v. 6.1 (EVEITT et al., 2012; RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009), referido como AquaCrop; e CROPGRO-*Cotton* (DSSAT) v. 4.7 (HOOGENBOOM et al., 2012; JONES et al., 2003; PATHAK et al., 2007), referido como DSSAT. A abordagem multi-modelos foi empregada, sendo a produtividade final aquela resultante da média aritmética das produtividades simuladas pelos modelos individualmente. Detalhes sobre o desempenho dos modelos de simulação de produtividade do algodoeiro tanto para cada modelo individual como para a abordagem multi-modelos são apresentados no APÊNDICE A5.

5.2.2. Base de dados de produtividade, de clima e de solo

Este estudo foi realizado em quatro localidades representativas das principais áreas de produção da cultura do algodoeiro no Brasil, com diferentes condições climáticas, conforme observa-se na Tabela 5.1 e Figura 5.1. As localidades analisadas foram: Alcinópolis, MS (18°18'36" S; 53°42'00" W; altitude: 443 m), Balsas, MA (7°31'48" S; 46°2'24" W; altitude: 283 m), Campo Verde, MT (15°33'00" S; 55°10'12" W; altitude: 736 m) e Luís Eduardo Magalhães, BA (12°4'48" S; 45°46'48" W; altitude: 720 m).

Tabela 5.1. Localidades brasileiras utilizadas na determinação do uso da irrigação na cultura do algodoeiro, com suas respectivas coordenadas geográficas, altitude e condições meteorológicas e de balanço hídrico: radiação solar global diária média anual (Qg); temperatura média anual do ar (T); chuva anual média (P); evapotranspiração de referência anual média (ET_o); déficit hídrico anual médio (DEF); e excedente hídrico anual médio (EXC), do período de 1990 a 2019.

Localidades	Lat (graus)	Long	Altitude (m)	Qg (MJ m ⁻² d ⁻¹)	T (°C)	P	ET _o (mm ano ⁻¹)	DEF ^a	EXC ^a
Alcinópolis, MS	-18,31	-53,70	443	18,04	24,86	1493	1383	231	342
Balsas, MA	-7,53	-46,04	283	19,14	27,34	1186	1748	698	137
Campo Verde, MT	-15,55	-55,17	736	17,85	25,86	1689	1524	331	495
Luís Eduardo Magalhães, BA	-12,08	-45,78	720	19,98	25,37	1157	1436	505	226

^a Para fins de caracterização agroclimática das diferentes regiões, o déficit hídrico anual médio (DEF) e o excedente hídrico anual médio (EXC) foram obtidos pelo balanço hídrico decendial de Thornthwaite e Mather (1955), empregando-se a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Thornthwaite (1948) e a capacidade de água disponível (CAD) no solo de 66 mm, pois foi a CAD média utilizada neste estudo.

Figura 5.1. Classificação climática de Köppen para as localidades utilizadas neste estudo e a quantidade de algodão herbáceo (em caroço) produzido nas regiões produtoras do Brasil na safra 2019-20. Adaptado de Alvares et al. (2013) e de IBGE (2020).

Os dados meteorológicos de 1987 a 2015, para chuva, e de 1987 a 2017, para radiação solar global (Q_g), temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa e velocidade do vento, usados para estimar a produtividade potencial e a produtividade atingível foram obtidos junto ao banco de dados meteorológicos em grade ($0,25 \times 0,25^\circ$), disponibilizado por Xavier et al. (2016). Essa base de dados meteorológicos apresenta bom desempenho para fins de modelagem de culturas (BATTISTI; BENDER; SENTELHAS, 2019). Os dados referentes ao período de 2018 a 2019 foram compilados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Nacional de

Águas (ANA) e CPFL Energia. A Q_g foi empregada na estimação da insolação (n) por meio da equação de Angström-Prescott (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002) (Eq. 5.1):

$$n = \frac{\left(\frac{Q_g}{Q_o} - 0,25\right)}{0,5} \times N \quad (5.1)$$

em que: Q_o é a radiação solar extraterrestre e N é o fotoperíodo, ambos estimados por meio de equações astronômicas, as quais empregam como dados de entrada a latitude do local e o dia do ano (de 1 a 365), conforme procedimentos apresentados por Allen et al. (1998).

Para o preenchimento de falhas na série de dados, foram utilizadas as fontes citadas anteriormente e os dados do sistema *National Aeronautics and Space Administration – Prediction Of Worldwide Energy Resources* (NASAPOWER) (<http://power.larc.nasa.gov>), que segundo Duarte e Sentelhas (2020) apresenta bom desempenho para fins de modelagem de culturas, exceto para chuva e velocidade do vento. Os dados faltantes de chuva, foram preenchidos com dados dos pluviômetros da ANA, adotando-se o critério da estação mais próxima até 20 km de distância. O método utilizado para estimação da evapotranspiração de referência foi o de Penman-Monteith-FAO (ALLEN et al., 1998), enquanto para a determinação do balanço hídrico foi empregado o método de Thornthwaite e Mather (1955).

Devido à área utilizada neste estudo ter sido muito ampla e os dados de solo exigidos pelos modelos AquaCrop e DSSAT não estarem disponíveis de forma específica para as localidades estudadas, três tipos de solo padrão foram utilizados para representar as diferentes capacidades de água disponível (CAD): Neossolo Quartzarênico distrófico (NQd) para representar um solo de textura arenosa (CAD = 42 mm); Latossolo Vermelho-escuro distroférico (LVEd) para representar um solo de textura média (CAD = 66 mm); e Latossolo Roxo distrófico (LRd) para representar um solo de textura argilosa (CAD = 90 mm) (VIANNA; SENTELHAS, 2014). Os dados faltantes foram obtidos junto ao banco de dados do RADAMBRASIL (1982, 1983). Os valores de CAD foram utilizados pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para a cultura do algodão herbáceo, safra 2020/2021, conforme as portarias obtidas junto ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil (<https://www.gov.br/agricultura/pt-br>), para as localidades estudadas. Os três modelos empregados utilizaram as CADs mencionadas acima.

As características químicas e físico-hídricas desses solos são apresentadas na Tabela 5.2. Os dados de solo comuns aos modelos estudados foram: profundidade; porcentagem de areia, silte e argila; porcentagem de carbono orgânico; pH em água; conteúdo de água no ponto de murcha permanente, capacidade de campo e ponto de saturação; densidade do solo; e capacidade de troca

catiônica. Além desses dados, cada modelo possuía sua especificidade quanto a outras variáveis do solo. Mais detalhes sobre os perfis de solo são apresentados no APÊNDICE B5.

Tabela 5.2. Características texturais, físico-hídricas e químicas dos solos utilizados no presente estudo.

Prof. (cm)	Hor.	Areia	Silte (%)	Argila	Ds (g cm ⁻³)	Corg (%)	pH	CTC (cmolc kg ⁻¹)	PMP	CC (%)	Θs
Neossolo Quartzarênico distrófico (NQd)											
20	A	91	4	5	1,45	0,82	5,7	7,30	7,1	11,9	43,1
45	AC	89	4	7	1,50	0,40	4,9	4,50	7,4	12,6	41,3
55	C1	88	4	8	1,56	0,40	4,8	6,20	7,5	13,2	39,0
Latossolo Vermelho-escuro distroférico (LVEd)											
10	Ap	71	15	14	1,46	2,8	5,5	10,22	12,6	20,8	45,1
25	A3	76	10	14	1,50	0,7	4,4	4,70	11,5	18,9	43,0
57	B1	72	11	17	1,52	0,5	4,0	4,34	12,9	20,7	42,2
Latossolo Roxo distrófico (LRd)											
15	Ap	19	30	51	1,23	2,07	5,2	8,60	27,7	39,1	55,4
30	A3	11	35	54	1,26	1,60	5,4	6,30	28,2	40,6	54,8
60	B1	13	33	54	1,28	0,99	5,4	4,30	28,1	39,8	53,5

Prof. = profundidade; Hor. = horizonte; Ds = densidade do solo; Corg = carbono orgânico; pH = pH em água; CTC = capacidade de troca catiônica; PMP = conteúdo de água no ponto de murcha permanente; CC = conteúdo de água na capacidade de campo; Θ_s = conteúdo de água no ponto de saturação do solo.

Fonte: Adaptado de Vianna e Sentelhas (2014) e RADAMBRASIL (1982, 1983).

5.2.3. Condições iniciais, datas de semeadura e cultivar

A simulação dos modelos foi iniciada dois anos antes da primeira semeadura, considerando a safra anterior como pousio. Desse modo, o teor inicial de água no solo definido pelo balanço hídrico no início do ciclo do algodoeiro se encontrava normalizado. As simulações de produtividade foram realizadas para três diferentes datas de semeadura considerando as épocas de semeadura recomendadas pelo ZARC para a cultura do algodão herbáceo, safra 2020/2021 (<https://www.gov.br/agricultura/pt-br>). As datas de semeadura foram simuladas no primeiro dia de cada decêndio do mês considerando uma data no início, no meio e no final da época de semeadura recomendada pelo ZARC para o algodoeiro em cada localidade. Mais informações sobre as épocas de semeadura simuladas para cada localidade são apresentadas no ANEXO A5.

A cultivar utilizada neste estudo foi a TMG44B2RF, pois foi a cultivar mais plantada no Brasil na safra 2019/2020 (ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 2020), além de ter sua semeadura recomendada pelo ZARC para todas as localidades estudadas. Essa é uma cultivar brasileira de algodão geneticamente modificada resistente às lagartas e ao herbicida Roundup®, que possui ciclo médio-precoce e ótima qualidade de fibra (TMG, 2020).

5.2.4. Simulação das lâminas de irrigação na cultura do algodoeiro

As simulações das lâminas de irrigação ao longo do ciclo da cultura do algodoeiro foram realizadas empregando-se os modelos MZA-FAO, AquaCrop e DSSAT, devidamente calibrados e validados para as condições brasileiras, como apresentado no Capítulo 3 desta tese, tanto para o uso individual dos modelos, como para a combinação deles, por meio da abordagem multi-modelos. Para cada localidade, a irrigação foi aplicada para suprir 0 (sequeiro), 20, 40, 60, 80 e 100% do déficit hídrico ocorrido ao longo do ciclo da cultura. O suprimento de 100% do déficit hídrico foi considerado como sendo a irrigação plena, enquanto os suprimentos de 20, 40, 60 e 80% representaram a irrigação com déficit.

No modelo MZA-FAO, as aplicações da irrigação foram realizadas em escala decendial conforme a porcentagem do suprimento de déficit hídrico considerada, a textura do solo e a ocorrência de déficit hídrico ao longo do ciclo da cultura. Para os demais modelos, inicialmente, foi realizada a irrigação para suprir 100% do déficit hídrico para os 30 anos de dados de cada localidade. Em cada um dos locais, uma lâmina máxima foi selecionada conforme a textura do solo e, a partir dela, foram dimensionadas as porcentagens de 20, 40, 60 e 80%. As irrigações foram realizadas em dez aplicações de volumes iguais ao longo do ciclo da cultura. O método de irrigação empregado nas simulações foi o de aspersão. Para simulação do cultivo de sequeiro, em ambos os modelos, não houve irrigação.

O incremento da produtividade da cultura do algodoeiro causado pela irrigação para diferentes tipos de solo e épocas de semeadura foi obtido pela diferença entre a produtividade do algodoeiro irrigado e aquela sob condição de sequeiro.

5.3. Resultados e discussão

5.3.1. Variabilidade da produtividade do algodoeiro irrigado

As Figuras 5.2 a 5.5 apresentam a variabilidade interanual das produtividades do algodoeiro simuladas pelos modelos MZA-FAO, AquaCrop e DSSAT, e pela abordagem multi-modelos, para os diferentes tipos de solo e níveis de suprimento do déficit hídrico por meio da irrigação, considerando-se as três épocas de semeadura simuladas, nas localidades de Alcinópolis (Figura 5.2), Balsas (Figura 5.3), Campo Verde (Figura 5.4) e Luís Eduardo Magalhães (Figura 5.5).

Figura 5.2. Variabilidade interanual da produtividade do algodoeiro em Alcínópolis, MS, simulada pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), DSSAT (C) e com a abordagem multi-modelos (D), sob condições de sequeiro (0%) e diferentes suprimentos do déficit hídrico (20, 40, 60, 80 e 100%), para os solos de texturas arenosa (CAD = 42 mm), média (CAD = 66 mm) e argilosa (CAD = 90 mm). Os valores representam as médias das três épocas de semeadura. As barras de erro indicam o desvio padrão.

Figura 5.3. Variabilidade interanual da produtividade do algodoeiro em Balsas, MA, simulada pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), DSSAT (C) e com a abordagem multi-modelos (D), sob condições de sequeiro (0%) e diferentes suprimentos do déficit hídrico (20, 40, 60, 80 e 100%), para os solos de texturas arenosa (CAD = 42 mm), média (CAD = 66 mm) e argilosa (CAD = 90 mm). Os valores representam as médias das três épocas de semeadura. As barras de erro indicam o desvio padrão.

Figura 5.4. Variabilidade interanual da produtividade do algodoeiro em Campo Verde, MT, simulada pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), DSSAT (C) e com a abordagem multi-modelos (D), sob condições de sequeiro (0%) e diferentes suprimentos do déficit hídrico (20, 40, 60, 80 e 100%), para os solos de texturas arenosa (CAD = 42 mm), média (CAD = 66 mm) e argilosa (CAD = 90 mm). Os valores representam as médias das três épocas de semeadura. As barras de erro indicam o desvio padrão.

Figura 5.5. Variabilidade interanual da produtividade do algodoeiro em Luís Eduardo Magalhães, BA, simulada pelos modelos MZA-FAO (A), AquaCrop (B), DSSAT (C) e com a abordagem multi-modelos (D), sob condições de sequeiro (0%) e diferentes suprimentos do déficit hídrico (20, 40, 60, 80 e 100%), para os solos de texturas arenosa (CAD = 42 mm), média (CAD = 66 mm) e argilosa (CAD = 90 mm). Os valores representam as médias das três épocas de semeadura. As barras de erro indicam o desvio padrão.

De acordo com os dados apresentados nas Figuras 5.2 a 5.5, observou-se que quanto maior for o suprimento do déficit hídrico por meio da irrigação, maior a produtividade do algodoeiro e menor a variabilidade interanual e entre as épocas de semeadura desta, independentemente de as estimativas serem feitas com os modelos individuais ou pela abordagem multi-modelos. Isso demonstra que o uso da irrigação é uma ação de manejo que tende a minimizar as perdas, trazendo maior estabilidade para a produção de algodão nas regiões analisadas.

Apesar dessa constatação geral, diferenças entre os modelos são evidentes, com o Aquacrop sempre apresentando as menores variações interanuais (Figuras 5.2 a 5.5). Isso justifica o uso da abordagem multi-modelos de forma a minimizar as incertezas dos resultados obtidos. Além disso, diferenças entre as localidades também foram evidentes, com a maior variabilidade interanual sendo observada em Luís Eduardo Magalhães (Figuras 5.5), seguida da região de Balsas (Figura 5.3). Nas regiões de Alcinópolis (Figura 5.2) e Campo Verde (Figura 5.4), a variabilidade interanual das produtividades de sequeiro, assim como para aquelas obtidas com os diferentes níveis de suprimento do déficit hídrico, são menores, o que se deve à menor variabilidade climática observada nessas regiões.

Os resultados deste estudo demonstraram um incremento médio de 23% na produtividade quando comparados os tratamentos de sequeiro e com irrigação plena. O aumento da produtividade do algodoeiro sob condições irrigadas está, provavelmente, associado, a um maior crescimento das plantas, além de haver um menor risco de abortamento de estruturas reprodutivas quando o déficit hídrico na fase reprodutiva é suprimido (HIMANSHU et al., 2019; SHAREEF et al., 2018; SNOWDEN et al., 2014; ZONTA et al., 2017). A deficiência hídrica na cultura do algodoeiro afeta diretamente a fisiologia das plantas, podendo reduzir a evapotranspiração da cultura em até 50%, o que, por sua vez, reduz a produtividade em até 45% (CHASTAIN et al., 2014; DOORENBOS; KASSAM, 1979).

A redução da produtividade devido às menores porcentagens de suprimentos do déficit hídrico obtida neste estudo foi inferior aos valores encontrados na literatura. Em um experimento irrigado, Shareef et al. (2018) obtiveram reduções de produtividade do algodoeiro de até 45% quando utilizaram a irrigação cobrindo 40% da necessidade da cultura em um solo de textura arenosa, na China. Também na China, Li et al. (2019), utilizando o modelo DSSAT, obtiveram reduções médias de produtividade de 79%, quando a irrigação foi reduzida em 52% da necessidade hídrica da cultura. Com a utilização do modelo AquaCrop, Hussein, Janat e Yakoub (2011) simularam o uso da irrigação e obtiveram reduções médias na produtividade de 55%, quando a irrigação foi reduzida em 50% em relação à lâmina plena, em um solo de textura argilosa, na Síria.

Essas diferenças estão relacionadas às distintas condições climáticas de cada região, assim como às características do solo e dos genótipos estudados, em relação ao presente estudo.

De modo geral, as menores produtividades ocorreram em Balsas (Figura 5.3), mesmo sob condições irrigadas, o que se deve às características climáticas dessa região, onde o excesso de nebulosidade durante o ciclo da cultura do algodoeiro proporcionou uma redução na produtividade. Situação semelhante ocorreu em Campo Verde (Figura 5.4) e Luís Eduardo Magalhães (Figura 5.5), onde o clima Aw da classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013), promove intensa presença de nuvens e redução da radiação solar, levando ao aumento da abscisão de partes reprodutivas das plantas (ECHER; ROSOLEM, 2015; GRUNDY; YEATES; BELL, 2020a, 2020b), afetando negativamente a produtividade.

As produtividades encontradas no tratamento de irrigação plena são semelhantes aos reportados por outros estudos em que a produtividade potencial da cultura do algodoeiro foi obtida por meio de modelos de simulação da cultura. Constable e Bange (2015) encontraram produtividades potenciais entre 7391 kg ha⁻¹ e 7817 kg ha⁻¹ (com índice de colheita para o algodão em caroço (IC_{algodão em caroço}) de 60%), nos Estados Unidos. Os mesmos autores reportaram que na China, a produtividade potencial pode atingir até 7508 kg ha⁻¹ (IC_{algodão em caroço} = 60%), enquanto Baker e Hesketh (1969) obtiveram uma produtividade potencial de 6533 kg ha⁻¹ (IC_{algodão em caroço} = 60%), nos Estados Unidos. Já as produtividades simuladas neste estudo para a condição de sequeiro também foram similares às apresentadas por outros estudos da literatura. Zonta et al. (2017) obtiveram produtividades do algodão de sequeiro em condições de campo variando entre 5403 kg ha⁻¹ a 6578 kg ha⁻¹, para um conjunto de variedades brasileiras. Esses resultados demonstram que as estimativas obtidas no presente estudo, especialmente, empregando-se a abordagem multi-modelos apresentam resultados compatíveis com a realidade, o que garante confiabilidade nos resultados do incremento da produtividade em função do uso da irrigação como ação mitigadora do *yield gap* do algodoeiro.

As produtividades simuladas pelos modelos de cultura foram variáveis, mas os modelos MZA-FAO e DSSAT apresentaram desempenho similar e com valores de produtividade mais elevados do que o modelo AquaCrop, que apresentou os menores valores (Figuras 5.2 a 5.5). O MZA-FAO apesar de ser um modelo matemático-fisiológico (DOORENBOS; KASSAM, 1979; KASSAM, 1977; RAO; SARMA; CHANDER, 1988), conseguiu se equiparar a um modelo mais complexo e mecanístico, como o DSSAT (HOOGENBOOM et al., 2012; JONES et al., 2003; PATHAK et al., 2007), demonstrando bom desempenho nos resultados apresentados, bem como maior acessibilidade, dada sua simplicidade.

5.3.2. Incremento de produtividade do algodoeiro em diferentes tipos de solo e épocas de semeadura

As Figuras 5.6 a 5.9 mostram um resumo dos incrementos de produtividade do algodoeiro simulada pelos modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e pela abordagem multi-modelos, sob diferentes volumes de irrigação para suprimento do déficit hídrico, para diferentes tipos de solos e épocas de semeadura, nas localidades de Alcinópolis (Figura 5.6), Balsas (Figura 5.7), Campo Verde (Figura 5.8) e Luís Eduardo Magalhães (Figura 5.9). Os incrementos de produtividade variaram com os tipos de solos e épocas de semeadura, e as lâminas de irrigação (% de suprimento do déficit hídrico). Quanto maior o suprimento do déficit hídrico, maior foi a diferença dos incrementos de produtividades entre os distintos tipos de solo e épocas de semeadura. Os incrementos médios de produtividade nos diferentes tipos de solo foram de 612,78 kg ha⁻¹, 1113,28 kg ha⁻¹, 1467,53 kg ha⁻¹, 1731,40 kg ha⁻¹ e 1932,02 kg ha⁻¹, para os suprimentos dos déficits hídricos de 20, 40, 60, 80 e 100%, respectivamente.

Os maiores incrementos de produtividade foram obtidos em Luís Eduardo Magalhães (Figura 5.9D), para os diferentes tipos de solo (2745 kg ha⁻¹). Em relação aos tipos de solo, aquele que apresentou os maiores incrementos de produtividade foi o de textura arenosa em Alcinópolis (Figura 5.6D) e Campo Verde (Figura 5.8D), e o de textura média em Balsas (Figura 5.7D) e Luís Eduardo Magalhães (Figura 5.9D), sendo que nessa última localidade a diferença entre os incrementos de produtividade obtidos nos solos de textura arenosa e média estiveram muito próximos, apenas com uma ligeira vantagem para o solo de textura média. Os solos arenosos, quando comparados aos argilosos, apresentam maior macro porosidade e porosidade total (REICHERT et al., 2020; WEIL; BRADY, 2017), fatores responsáveis pela aeração do solo e rápida infiltração da água, resultando em menor retenção, o que leva as culturas nesse tipo de solo a apresentar maiores déficits hídricos. Portanto, nesse tipo de solo a cultura do algodão tende a necessitar de maiores volumes de água quando irrigada.

Figura 5.6. Incremento de produtividade (IP) do algodoeiro na região de Alcinópolis, MS, simulada pelos modelos MZA-FAO (A e E), AquaCrop (B e F), DSSAT (C e G) e pela abordagem multi-modelos (D e H), sob diferentes volumes de irrigação para suprimento do déficit hídrico (20, 40, 60, 80 e 100%) em relação à produtividade de sequeiro (0%), para os solos de texturas arenosa (CAD = 42 mm), média (CAD = 66 mm) e argilosa (CAD = 90 mm) (A, B, C e D, respectivamente) e para três épocas de semeadura (E, F, G e H). Os valores representam a média das épocas de semeadura (A, B, C e D) e dos tipos de solo (E, F, G e H). EP1 = época 1, EP2 = época 2, EP3 = época 3.

Figura 5.7. Incremento de produtividade (IP) do algodoeiro na região de Balsas, MA, simulada pelos modelos MZA-FAO (A e E), AquaCrop (B e F), DSSAT (C e G) e pela abordagem multi-modelos (D e H), sob diferentes volumes de irrigação para suprimento do déficit hídrico (20, 40, 60, 80 e 100%) em relação à produtividade de sequeiro (0%), para os solos de texturas arenosa (CAD = 42 mm), média (CAD = 66 mm) e argilosa (CAD = 90 mm) (A, B, C e D, respectivamente) e para três épocas de semeadura (E, F, G e H). Os valores representam a média das épocas de semeadura (A, B, C e D) e dos tipos de solo (E, F, G e H). EP1 = época 1, EP2 = época 2, EP3 = época 3.

Figura 5.8. Incremento de produtividade (IP) do algodoeiro na região de Campo Verde, MT, simulada pelos modelos MZA-FAO (A e E), AquaCrop (B e F), DSSAT (C e G) e pela abordagem multi-modelos (D e H), sob diferentes volumes de irrigação para suprimento do déficit hídrico (20, 40, 60, 80 e 100%) em relação à produtividade de sequeiro (0%), para os solos de texturas arenosa (CAD = 42 mm), média (CAD = 66 mm) e argilosa (CAD = 90 mm) (A, B, C e D, respectivamente) e para três épocas de semeadura (E, F, G e H). Os valores representam a média das épocas de semeadura (A, B, C e D) e dos tipos de solo (E, F, G e H). EP1 = época 1, EP2 = época 2, EP3 = época 3.

Figura 5.9. Incremento de produtividade (IP) do algodoeiro na região de Luís Eduardo Magalhães, BA, simulada pelos modelos MZA-FAO (A e E), AquaCrop (B e F), DSSAT (C e G) e pela abordagem multi-modelos (D e H), sob diferentes volumes de irrigação para suprimento do déficit hídrico (20, 40, 60, 80 e 100%) em relação à produtividade de sequeiro (0%), para os solos de texturas arenosa (CAD = 42 mm), média (CAD = 66 mm) e argilosa (CAD = 90 mm) (A, B, C e D, respectivamente) e para três épocas de semeadura (E, F, G e H). Os valores representam a média das épocas de semeadura (A, B, C e D) e dos tipos de solo (E, F, G e H). EP1 = época 1, EP2 = época 2, EP3 = época 3.

Independentemente das distintas épocas de semeadura, os maiores incrementos de produtividade foram obtidos em Balsas (Figura 5.7H) (4130 kg ha^{-1}). Essa localidade apresenta clima Aw, tropical com período seco no inverno (ALVARES et al., 2013) (Figura 5.1), com pronunciada deficiência hídrica (698 mm) (Tabela 5.1) ao longo do ano, a qual ocorre, em grande parte, quando o algodoeiro está sendo cultivado, especialmente, se semeado tardiamente (3ª época), quando então há maior necessidade de irrigação e, conseqüentemente, maior incremento de produtividade para a cultura. Considerando-se, o valor médio dos incrementos de produtividades das localidades estudadas, o uso da irrigação plena promoveu aumento da produtividade média em 40%, 43% e 19% para os solos com textura arenosa, média e argilosa, respectivamente, quando comparado com um cultivo em sequeiro, considerando a média das épocas de semeadura. Informações sobre os balanços hídricos para cada localidade avaliada são apresentadas no APÊNDICE C5.

Os maiores incrementos de produtividade também foram encontrados na terceira época de semeadura (Figuras 5.6H, 5.7H, 5.8H e 5.9H), para todas as localidades. Um cultivo semeado nessa época, que corresponde normalmente ao mês de fevereiro, tradicionalmente, é submetido a um pronunciado período de déficit hídrico. A deficiência hídrica ao ocorrer durante os estádios críticos de desenvolvimento da cultura, especialmente, na fase de formação dos frutos, pode causar sérios danos à cultura, resultando em perdas de produtividade e de qualidade da fibra (CHASTAIN et al., 2014; HIMANSHU et al., 2019; SNOWDEN et al., 2014; ZONTA et al., 2017). O déficit hídrico ao qual a cultura do algodoeiro semeada na terceira época foi submetida foi, em média, de 49, 246, 126 e 120 mm, enquanto na primeira época o déficit hídrico foi, em média, de 7, 36, 11 e 16 mm, respectivamente, para as localidades de Alcinópolis, Balsas, Campo Verde e Luís Eduardo Magalhães, o que demonstra que o risco climático é maior quando a cultura do algodoeiro é semeada na terceira época, especialmente, quando se emprega cultivares de ciclo tardio (SILVA et al., 2019). No entanto, considerando o valor médio dos incrementos de produtividades das localidades estudadas, o uso de irrigação plena em áreas cultivadas com algodão semeado na terceira época aumentou a produtividade média em 69%, quando comparado com um cultivo de sequeiro, considerando a média dos diferentes tipos de solos, e reduzindo assim, o risco climático da produção da cultura.

Os menores incrementos de produtividade foram obtidos em Alcinópolis (Figuras 5.6D e 5.6H) e em solos argilosos (CAD = 90 mm) (Figuras 5.6D, 5.7D, 5.8D e 5.9D). Essa localidade encontra-se em uma área de transição entre os climas Aw e Am, tropical de monção, caracterizado por apresentar pequena estação seca (ALVARES et al., 2013) (Figura 5.1). O clima Am apresenta maiores níveis de chuva quando comparado ao clima Aw, principalmente, no início do período de

maior déficit hídrico, quando solos argilosos conseguem armazenar e disponibilizar água para a cultura do algodoeiro por mais tempo do que os demais tipos de solo. Essas diferenças aumentam de acordo com a quantidade de água aplicada no solo. Dias e Sentelhas (2019), simulando o uso da irrigação pelo modelo MZA-FAO na cultura da cana-de-açúcar, no Brasil, encontraram resultados semelhantes a esta pesquisa para o clima Am e os solos argilosos.

Os menores incrementos também foram encontrados na primeira época de semeadura (Figuras 5.6H, 5.7H, 5.8H e 5.9H), para todas as localidades. Nessa época, as áreas avaliadas normalmente recebem grandes volumes de chuva, o que favorece o armazenamento de água no solo, e, posteriormente, diminuiu a magnitude do déficit hídrico que ocorre ao longo do ciclo da cultura do algodoeiro, especialmente na fase reprodutiva. Em média, o déficit hídrico da cultura do algodoeiro na semeadura precoce, por volta do mês de dezembro, é da ordem de 7, 36, 11 e 16 mm, respectivamente para as localidades de Alcinópolis, Balsas, Campo Verde e Luís Eduardo Magalhães. O risco climático é menor quando a cultura do algodoeiro é semeada na primeira época, independentemente do ciclo das cultivares utilizadas (SILVA et al., 2019). Deste modo, a irrigação teve menor influência no incremento de produtividade, pois boa parte da água disponível no solo para a cultura foi proveniente das chuvas; porém, mesmo assim, considerando, o valor médio dos incrementos de produtividades das localidades estudadas, o uso da irrigação promoveu um aumento na produtividade média de 65% para um cultivo implantado na primeira época de semeadura quando comparado com um cultivo de sequeiro, considerando a média dos solos.

Todos os modelos de simulação da cultura do algodoeiro demonstraram haver incremento logarítmico de produtividade para todas as porcentagens de suprimentos do déficit hídrico, sendo que apenas para o modelo MZA-FAO esse foi linear (Figuras 5.6A, 5.7A, 5.8A e 5.9A). Resultados semelhantes foram obtidos por Dias e Sentelhas (2019) simulando o incremento de produtividade da cana-de-açúcar no Brasil por meio do modelo MZA-FAO, por Tan et al. (2018) e Cammarano et al. (2012) utilizando, respectivamente, os modelos AquaCrop na China e DSSAT na Austrália, para a simulação da produtividade na cultura do algodoeiro irrigado.

O incremento logarítmico, encontrado com os modelos AquaCrop e DSSAT, e na abordagem multi-modelos, indica que o crescente volume de irrigação utilizado promoveu rápido aumento de produtividade até, aproximadamente, 60% do suprimento do déficit hídrico, como pode ser nitidamente observado nas simulações do modelo AquaCrop (Figuras 5.6B, 5.6F, 5.7B, 5.7F, 5.8B, 5.8F, 5.9B e 5.9F), e em alguns casos no DSSAT (Figuras 5.6C, 5.6G, 5.7C, 5.7G, 5.8C, 5.8G, 5.9C e 5.9G). Após esse limiar, a produtividade continuou aumentando com a irrigação, porém, de forma menos expressiva. Garibay et al. (2019) simularam diferentes estratégias de irrigação da cultura do algodoeiro com o modelo DSSAT, nos Estados Unidos, e observaram

redução do incremento de produtividade da cultura quando apenas, aproximadamente, 63 a 83% da quantidade total da irrigação foi aplicada.

Esse comportamento pode estar relacionado à eficiência do uso da água (EUA) ou produtividade da água, que representa a relação entre a produtividade total e a quantidade total de água utilizada durante o ciclo da cultura, sendo expressa em kg m^{-3} (MOLDEN et al., 2003). Ao considerar apenas a água oriunda da irrigação temos a eficiência do uso da água da irrigação (EUAI) ou produtividade da água da irrigação. No presente estudo, a EUAI média variou de 0,24 a 1,03 kg m^{-3} , resultados que se encontram próximos ou inferiores àqueles obtidos na literatura. Zonta et al. (2015) avaliaram o efeito de diferentes lâminas de irrigação sobre a eficiência do uso da irrigação na cultura do algodoeiro no Brasil e encontraram que a lâmina em que houve maior eficiência do uso da água foi a de 70% da ETc (EUAI = 0,69 kg m^{-3}) e a menor com a lâmina irrigação de 130% da ETc (EUAI = 0,48 kg m^{-3}). Na China, Wang et al. (2018) encontraram maior eficiência no uso da água na lâmina irrigação de 60% da ETc (EUAI = 1,72 kg m^{-3}) e a menor na lâmina irrigação de 100% da ETc (EUAI = 1,13 kg m^{-3}).

Os modelos apresentaram comportamentos variados em relação ao incremento de produtividade para os distintos tipos de solo, às épocas de semeadura e aos níveis de suprimento do déficit hídrico. Isso se deveu às diferenças estruturais dos modelos, assim como aos parâmetros empregados por eles, especialmente aqueles relacionados ao balanço de água no solo (DOORENBOS; KASSAM, 1979; EVETT et al., 2012; HOOGENBOOM et al., 2012; JONES et al., 2003; KASSAM, 1977; PATHAK et al., 2007; RAES et al., 2009; RAO; SARMA; CHANDER, 1988; STEDUTO et al., 2009). Assim, a recomendação do uso da abordagem multi-modelos melhora a precisão e reduz as incertezas das estimativas (ASSENG et al., 2013).

5.3.3. Produtividade do algodoeiro x lâmina de irrigação aplicada

A Tabela 5.3 apresenta as lâminas máximas de irrigação requeridas durante o ciclo do algodoeiro e as produtividades médias da cultura simuladas pelos modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT, e pela abordagem multi-modelos, para diferentes níveis de suprimento do déficit hídrico, para diferentes localidades brasileiras. Em geral, para todas as localidades e condições de irrigação, a produtividade média do algodoeiro foi de 6208,86 kg ha^{-1} , 6811,16 kg ha^{-1} , 7302,75 kg ha^{-1} , 7650,77 kg ha^{-1} , 7909,39 kg ha^{-1} , 8103,01 kg ha^{-1} , para 0, 20, 40, 60, 80 e 100% do suprimento do déficit hídrico, respectivamente, para uma quantidade média de irrigação entre 71 mm a 355 mm. Considerando-se a abordagem multi-modelos, a eficiência do uso da água para as condições

irrigadas (incremento de produtividade/lâmina de irrigação) variou de 4,4 a 9,7 kg ha⁻¹ para cada 1 mm de água aplicada.

Tabela 5.3. Irrigação máxima requerida durante o ciclo do algodoeiro e produtividade média da cultura simuladas pelos modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e pela abordagem multi-modelos, para a condição de sequeiro (0%) e para diferentes suprimentos do déficit hídrico (20, 40, 60, 80 e 100%), para as seguintes localidades brasileiras: Alcinópolis, MS (ALC); Balsas, MA (BAL); Campo Verde, MT (CPV); e Luís Eduardo Magalhães, BA (LEM). Os valores representam a média dos três tipos de solo e três épocas de semeadura.

Localidade	Irrigação (mm)					Produtividade (kg ha ⁻¹)					
	Suprimento (%)					Suprimento (%)					
	20	40	60	80	100	0	20	40	60	80	100
MZA-FAO											
ALC, MS	24	48	73	97	121	8214,37	8491,89	8769,98	9044,05	9307,88	9550,26
BAL, MA	35	70	105	140	175	6697,04	7292,98	7919,04	8561,58	9197,10	9778,84
CPV, MT	20	39	59	79	99	7278,12	7689,14	8113,44	8541,55	8959,94	9345,05
LEM, BA	67	135	202	269	337	6957,57	7539,98	8162,13	8814,65	9477,49	10101,22
AquaCrop											
ALC, MS	75	150	225	300	375	5298,58	5827,12	6098,45	6180,70	6190,73	6187,77
BAL, MA	110	220	331	441	551	4119,38	4957,42	5556,31	5811,69	5906,06	5908,76
CPV, MT	72	144	216	288	360	4773,82	5443,96	5911,00	6083,54	6136,54	6128,77
LEM, BA	117	234	351	468	585	4106,35	4921,95	5505,38	5774,93	5849,52	5846,03
DSSAT											
ALC, MS	72	145	217	290	362	7542,33	8037,46	8425,26	8724,95	8914,43	9010,64
BAL, MA	78	157	235	313	392	6587,34	7236,80	7708,42	8025,79	8229,47	8350,97
CPV, MT	66	133	199	265	332	6964,23	7437,24	7907,53	8247,27	8470,61	8595,55
LEM, BA	113	226	339	452	564	6660,52	7539,23	8187,80	8552,06	8728,62	8799,80
Multi-modelos											
ALC, MS	57	114	172	229	286	6975,92	7417,85	7733,13	7954,94	8113,31	8227,65
BAL, MA	74	149	224	298	373	5763,91	6460,93	7030,02	7437,81	7754,06	7994,05
CPV, MT	53	105	158	211	264	6317,85	6833,44	7281,45	7591,56	7822,52	7989,84
LEM, BA	99	198	297	396	495	5777,77	6532,45	7166,39	7618,77	7947,66	8200,52

As maiores produtividades foram obtidas em Alcinópolis e as menores em Balsas, exceto para o suprimento de 100% do déficit hídrico, em que o menor valor foi obtido em Campo Verde (Tabela 5.3). As localidades que apresentaram as menores produtividades possuem clima Aw, o qual afeta a produtividade, como já foi mencionado anteriormente, por apresentar deficiências hídricas mais pronunciadas ao longo do ciclo da cultura quando comparado com Alcinópolis, que apresenta clima Am (ALVARES et al., 2013). As localidades de clima Aw apresentaram maiores volumes de deficiência hídrica (Balsas = 698 mm ano⁻¹, Campo Verde = 331 mm ano⁻¹, e Luís Eduardo Magalhães = 505 mm ano⁻¹) (Tabela 5.1), portanto, havendo maior necessidade de irrigação para suprir as porcentagens de déficit hídrico avaliadas neste estudo.

Diversos estudos, com a cultura do algodoeiro, demonstraram que o uso da irrigação aumenta a produtividade da cultura. Dağdelen et al. (2006), comparando diferentes volumes de irrigação para a cultura do algodoeiro na Turquia, obtiveram produtividades médias de 1780 kg ha⁻¹ em cultivos de sequeiro e de 5490 kg ha⁻¹ com irrigação plena (700 mm no ciclo). Zonta et al. (2017) comparando o uso de irrigação deficitária em diferentes fases fenológicas de cultivares brasileiras de algodoeiro, encontraram produtividades médias de 2283 kg ha⁻¹ a 5215 kg ha⁻¹, com a irrigação variando de 584 a 650 mm, respectivamente, enquanto no tratamento com irrigação plena (700 mm), a produtividade chegou a 5904 kg ha⁻¹.

Outros estudos comprovam o bom desempenho do uso de modelos de simulação na avaliação do uso da irrigação como ação mitigadora do *yield gap* da cultura algodoeiro. Garibay et al. (2019), utilizando o modelo DSSAT para simular as produtividades do algodoeiro nos Estados Unidos, obtiveram valores entre 2754 kg ha⁻¹ e 5996 kg ha⁻¹, respectivamente para as condições de sequeiro e de plena irrigação (315 mm). Masasi et al. (2020), utilizando o modelo AquaCrop, ainda nos Estados Unidos, encontraram produtividades de 803 kg ha⁻¹ e 4543 kg ha⁻¹, para as condições de sequeiro e de plena irrigação (588 mm). No Brasil, estudos dessa natureza, ou seja, avaliando o impacto da irrigação na produtividade do algodoeiro por meio de modelos de simulação ainda são inexistentes, não tendo sido encontrado nenhum trabalho até o momento deste trabalho.

Os modelos apresentaram distintos valores de produtividade. Isso se deveu as suas diferenças intrínsecas, relacionadas, especialmente, à estrutura e aos parâmetros de cada modelo (DOORENBOS; KASSAM, 1979; EVETT et al., 2012; HOOGENBOOM et al., 2012; JONES et al., 2003; KASSAM, 1977; PATHAK et al., 2007; RAES et al., 2009; RAO; SARMA; CHANDER, 1988; STEDUTO et al., 2009). As produtividades obtidas pelos modelos MZA-FAO e DSSAT estiveram próximas, enquanto no AquaCrop, os valores foram mais baixos. Apesar das diferenças, em termos de magnitude, as produtividades simuladas pelo modelo AquaCrop foram semelhantes às obtidas em outros estudos (HUSSEIN; JANAT; YAKOUB, 2011; QIAO, 2012; TAN et al., 2018), confirmando que os resultados apresentados por esse modelo são plausíveis.

Os resultados deste estudo auxiliam na geração de conhecimentos sobre o uso da irrigação como ação de manejo da cultura do algodoeiro para mitigação do *yield gap* causado pelo déficit hídrico. Assim, os dados aqui apresentados servem para subsidiar a elaboração de projetos de irrigação para a cultura do algodoeiro, assim como de políticas públicas que incentivem a adoção da irrigação para a cultura nas diferentes regiões produtoras do Brasil, especialmente, para aquelas em que boa parte do ciclo do algodoeiro enfrenta déficits hídricos expressivos, como no caso das localidades em que o clima é Aw, e em cultivos realizados tardiamente.

5.4. Conclusões

Os modelos de simulação permitem simular a produtividade da cultura do algodoeiro por meio dos modelos MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e, também, pela abordagem multi-modelos, em diferentes tipos de solo, épocas de semeadura e lâminas de irrigação. Apesar do desempenho muito satisfatório dos modelos analisados, a abordagem multi-modelos minimiza as incertezas das simulações dos modelos de produtividade da cultura do algodoeiro, quando o objetivo é avaliar o uso da irrigação como ação mitigadora do *yield gap* do algodoeiro. A produtividade do algodoeiro aumenta quando a cultura é irrigada, sendo maior o incremento de produtividade quanto maior a lâmina de irrigação. A irrigação é uma importante ação de manejo para mitigação do *yield gap* da cultura do algodoeiro em diferentes regiões brasileiras, portanto, sua utilização é recomendada, especialmente nos cultivos semeados tardiamente, quando os déficits hídricos são mais severos.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES, L. R. A.; LIMA, F. F.; FERREIRA FILHO, J. B. DE S. Aspectos econômicos. In: BORÉM, A.; FREIRE, E. C. (Eds.). **Algodão: Do plantio a colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2014. p. 9–30.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2019.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DO ALGODÃO**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2020.
- ASSENG, S. et al. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 827–832, 2013.
- BAKER, D. N.; HESKETH, J. D. Respiration and the carbon balance in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). In: **Proceedings of the Beltwide Cotton Production Research Conferences**. New Orleans: National Cotton Council, 1969. p. 60–64.
- BATTISTI, R.; BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Assessment of different gridded weather data for soybean yield simulations in Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 135, n. 1–2, p. 237–247, 2019.

- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Projeto Radam Brasil. Folha SD. 23 Brasília: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra.** Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1982.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Projeto Radam Brasil. Folha SE. 22 Goiânia: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra.** Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1983.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial do Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.
- CAMMARANO, D. et al. Agronomic and economic evaluation of irrigation strategies on cotton lint yield in Australia. **Crop and Pasture Science**, v. 63, n. 7, p. 647, 2012.
- CHASTAIN, D. R. et al. Water deficit in field-grown *Gossypium hirsutum* primarily limits net photosynthesis by decreasing stomatal conductance, increasing photorespiration, and increasing the ratio of dark respiration to gross photosynthesis. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, n. 17, p. 1576–1585, 2014.
- CHIAVEGATO, E. J.; SALVATIERRA, D. K. DE; GOTTARDO, L. C. B. Algodão. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Ed.). **Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola.** 1a ed. Brasília: INMET, 2009. p. 33–49.
- CONSTABLE, G. A.; BANGE, M. P. The yield potential of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Field Crops Research**, v. 182, p. 98–106, 2015.
- DAGDELEN, N. et al. Water-yield relation and water use efficiency of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and second crop corn (*Zea mays* L.) in western Turkey. **Agricultural Water Management**, v. 82, n. 1–2, p. 63–85, 2006.
- DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. **Science of The Total Environment**, v. 637–638, p. 1127–1136, 2018.
- DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Dimensioning the impact of irrigation on sugarcane yield in Brazil. **Sugar Tech**, v. 21, n. 1, p. 29–37, 2019.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper No. 33.** Roma, Italy: FAO, 1979.
- DUARTE, Y. C. N. **Modelos de simulação da cultura do milho: Uso na determinação das quebras de produtividade (yield gaps) e na previsão de safra da cultura no Brasil.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2018.

- DUARTE, Y. C. N.; SENTELHAS, P. C. NASA/POWER and DailyGridded weather datasets—how good they are for estimating maize yields in Brazil? **International Journal of Biometeorology**, v. 64, n. 3, p. 319–329, 2020.
- ECHER, F. R.; ROSOLEM, C. A. Cotton yield and fiber quality affected by row spacing and shading at different growth stages. **European Journal of Agronomy**, v. 65, p. 18–26, 2015.
- EVETT, S. R. et al. Cotton. In: STEDUTO, P. et al. (Eds.). Crop yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper No 66**. Roma, Italy: FAO, 2012. p. 150–161.
- FAO. **FAOSTAT**. 2020. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat>>. Acesso em: 5 fev. 2021.
- GARIBAY, V. M. et al. Determining water-use-efficient irrigation strategies for cotton using the DSSAT CSM CROPGRO-cotton model evaluated with in-season data. **Agricultural Water Management**, v. 223, p. 105695, 2019.
- GRUNDY, P. R.; YEATES, S. J.; BELL, K. L. Cotton production during the tropical monsoon season. I – The influence of variable radiation on boll loss, compensation and yield. **Field Crops Research**, v. 254, p. 107790, 2020a.
- GRUNDY, P. R.; YEATES, S. J.; BELL, K. L. Cotton production during the tropical monsoon season. II – Biomass accumulation, partitioning and RUE in response to boll loss and compensation. **Field Crops Research**, v. 255, p. 107868, 2020b.
- HIMANSHU, S. K. et al. Evaluation of crop-growth-stage-based deficit irrigation strategies for cotton production in the Southern High Plains. **Agricultural Water Management**, v. 225, p. 105782, 2019.
- HOOGENBOOM, G. et al. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]**. Honolulu: University of Hawaii, 2012.
- HUSSEIN, F.; JANAT, M.; YAKOUB, A. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 4, p. 1319–1330, 2011.
- IBGE. **Produção Agrícola Municipal 2019**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.
- JONES, J. W. et al. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 235–263, 2003.
- KASSAM, A. H. **Net biomass production and yield crops**. Roma, Italy: FAO, 1977.
- LI, M. et al. Simulation of cotton growth and soil water content under film-mulched drip irrigation using modified CSM-CROPGRO-Cotton model. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 124–138, 2019.

- LOKA, D. A.; OOSTERHUIS, D. M. Water stress and reproductive development in cotton. In: OOSTERHUIS, D. M.; COTHREN, J. T. (Eds.). **Flowering and fruiting in cotton**. Candova: The Cotton Foundation, 2012. p. 51–58.
- MASASI, B. et al. Validation and application of AquaCrop for irrigated cotton in the Southern Great Plains of US. **Irrigation Science**, v. 38, n. 5–6, p. 593–607, 2020.
- MOLDEN, D. et al. A Water-productivity framework for understanding and action. In: KIJNE, J. W.; BARKER, R.; MOLDEN, D. (Eds.). **Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement**. Colombo: International Water Management Institute, 2003. p. 1–18.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap: Can it be determined at national level with a simple agrometeorological model? **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 3, p. 272–284, 2017.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: Part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282–290, 1970.
- NÓIA JÚNIOR, R. DE S.; SENTELHAS, P. C. Yield gap of the double-crop system of main-season soybean with off-season maize in Brazil. **Crop and Pasture Science**, v. 71, n. 5, p. 445, 2020.
- PATHAK, T. B. et al. Use of global sensitivity analysis for CROPGRO Cotton model development. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 6, p. 2295–2302, 2007.
- PEREIRA, A.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002.
- QIAO, X. **Parameterization of FAO AquaCrop model for irrigated cotton in the humid southeast - US**. [s.l.] Clemson University, 2012.
- RAES, D. et al. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 438–447, 2009.
- RAO, N. H.; SARMA, P. B. S.; CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 13, p. 25–32, 1988.
- REICHERT, J. M. et al. Estimating water retention and availability in cultivated soils of southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 21, p. e00277, 2020.
- ROSOLEM, C. A. Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro. **Informações Agronômicas**, n. 95, p. 1–9, 2001.
- SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil: Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, p. 1–18, 2015.

- SENTELHAS, P. C. et al. *Yield gap*: Conceitos, definições e exemplos. **Informações Agronômicas**, n. 155, p. 9–12, 2016.
- SHAREEF, M. et al. Water productivity, growth, and physiological assessment of deficit irrigated cotton on hyperarid desert-oases in northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 206, p. 1–10, 2018.
- SILVA, E. S. et al. Zoning of water deficiency risk for conventional cotton in Mato Grosso. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 35, n. 4, p. 1–12, 2019.
- SNOWDEN, M. C. et al. Timing of episodic drought can be critical in cotton. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 452–458, 2014.
- STEDUTO, P. et al. 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.
- TAN, S. et al. Performance of AquaCrop model for cotton growth simulation under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang, China. **Agricultural Water Management**, v. 196, p. 99–113, 2018.
- THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955.
- THORP, K. R. et al. Development and application of process-based simulation models for cotton production: A review of past, present, and future directions. **The Journal of Cotton Science**, v. 18, p. 10–47, 2014.
- TMG. **Cultivares de algodão**. Disponível em: <<http://www.tmg.agr.br/>>. Acesso em: 31 jan. 2020.
- VAN ITTERSUM, M. K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance: A review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013.
- VIANNA, M. DOS S.; SENTELHAS, P. C. Simulação do risco de deficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 237–246, 2014.
- VISSES, F. A.; SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. B. Yield gap of cassava crop as a measure of food security - An example for the main Brazilian producing regions. **Food Security**, v. 10, n. 5, p. 1191–1202, 2018.
- WANG, H. et al. Coupling effects of water and fertilizer on yield, water and fertilizer use efficiency of drip-fertigated cotton in northern Xinjiang, China. **Field Crops Research**, v. 219, p. 169–179, 2018.

- WEIL, R. R.; BRADY, N. C. **The nature and properties of soils**. 15a. ed. New Jersey: Pearson, 2017.
- WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.
- XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.
- ZONTA, J. H. et al. Cotton response to water deficits at different growth stages. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 4, p. 980–990, 2017.
- ZONTA, J. H. et al. Yield of cotton cultivars under different irrigation depths in the Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p. 748–754, 2015.

ANEXOS

ANEXO A5. Épocas de semeadura para o algodoeiro cultivar TMG44B2RF

Tabela AX5.1. Épocas de semeadura recomendadas pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura do algodoeiro herbáceo na safra 2020/2021, para a cultivar TMG44B2RF, para as localidades estudadas.

Localidade	Ciclo	Textura do solo	SET			OUT			NOV			DEZ			JAN			FEV			MAR		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Alcinópolis, MS	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Balsas, MA	Grupo III	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Campo Verde, MT	Grupo II	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					
Luís Eduardo Magalhães, BA	Grupo III	Arenosa																					
		Média																					
		Argilosa																					

Legenda:

Risco até:

20%

30%

40%

sem indicação

Ciclo da cultura: Grupo II (Médio), Grupo III (Tardio), conforme portarias do Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura do algodoeiro herbáceo na safra 2020/2021, para a cultivar TMG44B2RF, nas localidades citadas. SET = Setembro; OUT = Outubro; NOV = Novembro; DEZ = Dezembro; JAN = Janeiro; FEV = Fevereiro; MAR = Março, Os números indicam os decêndios: 1 = 1 a 10; 2 = 11 a 20; 3 = 21 a 28, 30, 31, MT = Mato Grosso; BA = Bahia; MS = Mato Grosso do Sul; MA = Maranhão

APÊNDICES

APÊNDICE A5. Desempenho estatístico dos modelos para a cultura do algodoeiro

Tabela A5.1. Desempenho estatístico dos modelos de simulação da cultura do algodoeiro, MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e da abordagem multi-modelos, nas fases de calibração e validação.

Índices	Modelos			
	MZA-FAO	AquaCrop	DSSAT	Multi-modelos
Calibração (n = 24)				
r	0,97	0,83	0,88	0,95
R ²	0,95	0,69	0,77	0,90
d	0,99	0,91	0,90	0,97
C	0,96	0,75	0,79	0,92
EM (kg ha ⁻¹)	-10,88	76,84	14,96	-26,97
EAM (kg ha ⁻¹)	129,14	312,13	376,07	180,12
EAMP (%)	2,76	6,67	8,03	3,85
RMSE (kg ha ⁻¹)	147,13	382,43	488,87	227,97
E	0,95	0,64	0,42	0,87
Validação (n = 8)				
r	0,97	0,96	0,93	0,97
R ²	0,95	0,92	0,86	0,94
d	0,94	0,94	0,92	0,97
C	0,92	0,90	0,85	0,94
EM (kg ha ⁻¹)	-226,35	-368,54	-57,29	217,40
EAM (kg ha ⁻¹)	295,99	368,55	488,59	257,88
EAMP (%)	7,29	9,07	12,03	6,35
RMSE (kg ha ⁻¹)	366,00	483,87	619,97	332,68
E	0,83	0,70	0,51	0,86

n = número de dados; r = coeficiente de correlação de Pearson; R² = coeficiente de determinação; d = índice de concordância (WILLMOTT et al., 1985); C = índice de confiança (CAMARGO; SENTELHAS, 1997); EM = erro médio; EAM = erro absoluto médio; EAMP = erro absoluto médio em porcentagem; RMSE = raiz quadrada do erro médio; E = índice de eficiência de modelagem (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

APÊNDICE B5. Perfis dos solos

Tabela B5.1. Perfis dos solos utilizados nas simulações com o modelo AquaCrop.

Prof. (m)	Textura	PMP	CC %	Θ_s	Ksat (mm dia ⁻¹)
Neossolo Quartzarênico distrófico (NQd)					
0,20	Arenosa	7,1	11,9	43,1	5040,0
0,45	Arenosa	7,4	12,6	41,3	5040,0
0,55	Arenosa	7,5	13,2	39,0	1466,4
Latossolo Vermelho-escuro distroférico (LVEd)					
0,10	Franca	12,6	20,8	45,1	621,6
0,25	Franca	11,5	18,9	43,0	621,6
0,57	Franca	12,9	20,7	42,2	621,6
Latossolo Roxo distrófico (LRd)					
0,15	Franco-argilosa	27,7	39,1	55,4	14,4
0,30	Franco-argilosa	28,2	40,6	54,8	14,4
0,60	Franco-argilosa	28,1	39,8	53,4	14,4

Prof. = profundidade; PMP = conteúdo de água no ponto de murcha permanente; CC = conteúdo de água na capacidade de campo; Θ_s = conteúdo de água no ponto de saturação do solo; Ksat = condutividade hidráulica.

Tabela B5.2. Perfis dos solos utilizados nas simulações com o modelo DSSAT.

Camada	LL cm ³ cm ⁻³	DUL cm ³ cm ⁻³	SAT	SKS cm h ⁻¹	BDM g cm ⁻³	RGF	LOC	LCL	LSI	LHW	CEC cmolc kg ⁻¹
Neossolo Quartzarênico distrófico (NQd)											
20	0,071	0,119	0,431	21,0	1,45	1,0	2,90	5	4	5,2	13,5
45	0,074	0,126	0,413	21,0	1,50	1,0	2,10	7	4	5,3	10,6
55	0,075	0,132	0,390	6,11	1,56	0,638	1,40	8	4	5,6	8,9
Latossolo Vermelho escuro distroférico (LVEd)											
10	0,126	0,208	0,451	2,59	1,46	1,0	2,80	14	15	5,5	10,2
25	0,115	0,189	0,430	2,59	1,50	1,0	0,70	14	10	4,4	4,7
57	0,129	0,207	0,422	2,59	1,52	0,638	0,50	17	11	4,0	4,3
Latossolo Roxo distrófico (LRd)											
15	0,277	0,391	0,554	0,06	1,23	1,0	1,07	51	30	5,2	8,6
30	0,282	0,406	0,548	0,06	1,26	1,0	1,60	54	35	5,4	6,3
60	0,281	0,398	0,535	0,06	1,28	0,638	0,99	54	33	5,4	4,3

LL = conteúdo de água no ponto de murcha permanente; DUL = conteúdo de água na capacidade de campo; SAT = conteúdo de água no ponto de saturação; SKS = condutividade hidráulica; BDM = densidade do solo; RGF = fator de crescimento radicular; LOC = carbono orgânico; LCL = argila; LSI = silte; LHW = pH em água; CEC = capacidade de troca catiônica.

APÊNDICE C5. Balanços hídricos das localidades estudadas

Figura C5.1. Extrato do balanço hídrico sequencial médio, na escala decendial, para as localidades de Alcinópolis, MS (A), Balsas, MA (B), Campo Verde, MT (C) e Luís Eduardo Magalhães, BA (D), no período de 1990 a 2019, considerando-se a CAD de 66 mm e ETo estimada pelo método de Thornthwaite (1948).

6. CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados do presente estudo permitiram concluir que:

- a) Os modelos de simulação avaliados neste estudo (MZA-FAO, AquaCrop, DSSAT e APSIM) são capazes de estimar a produtividade do algodoeiro quando devidamente calibrados e validados, de acordo com os ajustes de seus parâmetros de maior influência no crescimento e desenvolvimento da cultura. Apesar do desempenho muito satisfatório dos modelos analisados, a abordagem multi-modelos possibilita obter estimativas de produtividade da cultura do algodoeiro com menores erros, reduzindo, assim, as incertezas decorrentes das estruturas distintas de cada modelo e melhorando a capacidade preditiva em estudos agroclimáticos e de previsão de safra;
- b) Os modelos de simulação de produtividade, em abordagem multi-modelos, permitem estimar a produtividade potencial e a atingível em diferentes regiões brasileiras. As produtividades potencial e atingível variam entre 8453 kg ha⁻¹ e 9464 kg ha⁻¹, e de 3893 kg ha⁻¹ e 7234 kg ha⁻¹, respectivamente, mostrando que há possibilidade de aumento da produtividade do algodoeiro sem expansão da área plantada;
- c) O modelo Zona Agroecológica-FAO devidamente calibrado e avaliado para a cultura do algodoeiro demonstra ser uma ferramenta eficiente para identificar a tolerância à seca em cultivares de algodoeiro herbáceo. De acordo com o modelo, as cultivares brasileiras de algodão foram classificadas em cinco grupos de tolerância à seca, considerando-se os valores de Ky durante a fase de formação dos frutos como critério para esse agrupamento. Essas informações auxiliam os produtores na seleção das melhores cultivares para cada ambiente de produção e época de semeadura, diminuindo os impactos do déficit hídrico na produtividade da cultura;
- d) Os modelos de simulação de produtividade, em abordagem multi-modelos, permitem avaliar o *yield gap* da cultura do algodoeiro em diferentes regiões brasileiras devido à deficiência hídrica e ao manejo agrícola sub-ótimo. A principal causa do *yield gap* do algodoeiro no Brasil se deve a deficiência hídrica (66% do *yield gap* total), enquanto o déficit de manejo agrícola fica em segundo plano (34% do *yield gap* total). Portanto, a adoção de cultivares tolerantes à seca, o aumento da capacidade de água disponível do solo e o uso da irrigação são ações recomendadas para os ambientes de produção com limitação de água;

- e) Os modelos de simulação permitem simular a produtividade do algodoeiro por meio dos modelos MZA-FAO, AquaCrop e DSSAT, em abordagem individual e multi-modelos, considerando-se diferentes tipos de solo, épocas de semeadura e lâminas de irrigação. Apesar do desempenho muito satisfatório dos modelos analisados, a abordagem multi-modelos minimiza as incertezas das simulações da produtividade, o que auxilia na avaliação do uso da irrigação como ação mitigadora do *yield gap* do algodoeiro. A irrigação é uma importante ferramenta de manejo para a mitigação do *yield gap* da cultura do algodoeiro, especialmente nas regiões com maior risco climático. Sendo assim, sua utilização é recomendada, especialmente, quando a semeadura tardia é empregada.