Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>

Importância dos modelos de simulação de culturas diante dos impactos das alterações climáticas sobre a produção agrícola - Revisão

Antonio Gebson Pinheiro¹, Luciana Sandra Bastos de Souza², Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim³, George do Nascimento Araújo Júnior⁴, Cleber Pereira Alves⁵, Carlos André Alves de Souza⁶, Gabriel Ítalo Novaes da Silva⁷, Thieres George Freire da Silva⁸

¹Doutorando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP 52171-900; Recife; Pernambuco, (81)995441896, gebson10@hotmail.com. ²Dr. em Meteorologia Agrícola, Professora Assistente I, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco. (87) 3929-3216. sanddrabastos@yahoo.com.br. ³Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, alexandremrfj@gmail.com. ⁴Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, georgearaujo.agro@gmail.com. ⁵Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, cleberp.alves@hotmail.com. ⁶Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, carlosandre08_msn.com. ⁷Mestrando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, gabrielitalo.novaes@gmail.com. ⁸Dr. Professor Associado II, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco. (87) 3929-3208. thieres_freire@yahoo.com.br (autor correspondente).

Artigo recebido em 23/04/2021 e aceito em 23/08/2021

RESUMO

O efeito climático é o principal responsável pelas oscilações no rendimento produtivo. Logo, é esperado que as mudanças do clima promovam alterações na agricultura, comprometam a sustentabilidade e a segurança alimentar, especialmente, em áreas semiáridas. O entendimento da amplitude desses fatores e suas consequências no rendimento agrícola mediante os diferentes cenários climáticos, regionais e tecnológicos são fundamentais nas tomadas de decisões. Para as análises desses diversos cenários, os modelos de simulação de culturas se caracterizam como ferramentas funcionais e com eficientes performances na estimativa dos níveis de produtividades, desde que devidamente calibrados e validados com dados consistentes e representativos. Dentre os modelos de simulação podemos destacar: AquaCrop - FAO, ZAE - FAO, CROPGRO e Apsim como aqueles de maiores aplicabilidades nas culturas agrícolas, sendo utilizados de maneira recorrente em diversos estudos para fins do conhecimento das lacunas de produtividade agrícola, ou “Yield Gap”. Esta revisão analisou os impactos das alterações climáticas na agricultura e o levantamento de informações dos principais modelos de simulação de culturas. Mediante síntese das informações levantadas, pode-se evidenciar o eminente impacto das alterações climáticas sobre o cenário agrícola futuro, proporcionando maior vulnerabilidade agrícola. Logo, destaca-se a importância do uso de modelos de simulação de culturas para conhecimento das lacunas de produtividade e potencial produtivo. Contudo, é evidente a necessidade de pesquisas mais detalhadas sobre a aplicabilidade dos modelos em cenários agrícolas diversos e situações climáticas amplas.

Palavras-chave: modelos de simulação; sazonalidade climática; práticas resilientes; “yield gap”.

Importance of crop simulation models in view of the impacts of climate change on agricultural production – Review

ABSTRACT

The climatic effect is the main responsible for the fluctuations in the productive yield. Therefore, it is expected that climate change will promote changes in agriculture, compromise sustainability and food security, especially in semi-arid areas. Understanding the breadth of these factors and their consequences on agricultural income through different climatic, regional and technological scenarios are fundamental in decision-making. For the analysis of these different scenarios, the crop simulation models are characterized as functional tools and with efficient performances in the estimation of the productivity levels, as long as they are properly calibrated and validated with consistent and representative data. Among the simulation models we can highlight: AquaCrop - FAO, ZAE - FAO, CROPGRO and Apsim as those with the greatest

applicability in agricultural crops, being used in a recurring manner in several studies for the purpose of understanding agricultural productivity gaps, or “*Yield Gap*”. This review analyzed the impacts of climate change on agriculture and the gathering of information on the main crop simulation models. By synthesizing the information collected, it is possible to highlight the imminent impact of climate change on the future agricultural scenario, providing greater agricultural vulnerability. Therefore, the importance of using crop simulation models to understand the gaps in productivity and productive potential is highlighted. However, there is a clear need for more detailed research on the applicability of models in diverse agricultural scenarios and broad climatic situations.

Keywords: simulation models; climatic seasonality; resilient practices; yield gap

Introdução

De acordo com as projeções do IPCC (2014, 2019), as mudanças climáticas poderão ocasionar alterações nos padrões de precipitação e disponibilidade de água e a intensificação de cenários climáticos extremos. Essas mudanças podem gerar um desequilíbrio no rendimento das culturas, afetando a sustentabilidade dos sistemas agrícolas em muitas regiões, tornando as populações que dependem da produção local de alimentos mais vulneráveis (Abd-Elmabod et al., 2020; Ali et al., 2021; Martins et al., 2019).

Nesse contexto, os estudos com modelos de simulação de culturas são úteis para auxiliar na atenuação dos impactos causados pelas mudanças climáticas, melhorando o processo de tomada de decisões e aperfeiçoando os sistemas de cultivo, possibilitando análises de cenários e eficientes estratégias de manejo (Lamichhane et al., 2019; Manivasagam & Rozenstein, 2020; Tooley et al., 2021). A partir da aplicação desses modelos, podem ser obtidas informações mais precisas sobre a capacidade de produção das culturas, que podem ser afetadas por fatores internos (e.g. genéticos e hereditários) e externos (e.g. práticas de manejo e condições ambientais), causando lacunas nos níveis de produtividade – “*Yield Gap*” (Martins et al., 2018b).

Dentre os fatores ambientais, o clima respondeu por cerca de um terço da sazonalidade produtiva das culturas agrícolas (Leng et al., 2016). Diante disso, as informações climáticas são fundamentais para a previsão da produtividade agrícola, além de indicar a viabilidade econômica de determinadas práticas e o direcionamento das melhores estratégias para o aumento produtivo (Lamichhane et al., 2019; Palosuo et al., 2021; Sandhu & Irmak, 2019).

A realização desse processo é possível graças à utilização de modelos de simulação de crescimento de culturas agrícolas, que relacionam os processos solo, planta, atmosfera, além das práticas de manejo realizadas (Camargo e Kemanian, 2016; Zhao et al., 2019). Battisti et al.

(2018) citam a importância da comparação de distintos modelos de simulação de culturas, sendo possível identificar suas limitações e aplicabilidades. Para isto, vários são os modelos citados na literatura, podendo-se destacar: AquaCrop – FAO (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009); Agroecological Zone – FAO (Doorenbos e Kassam, 1994); Crop Simulation Model - CropGro (Boote et al., 1998) e Agricultural Production Systems Simulator – APSIM (Keating et al., 2003).

Esta revisão fez um levantamento sobre os impactos das mudanças climáticas no desenvolvimento agrícola e do uso dos principais modelos utilizados para a simulação de culturas.

Alterações climáticas e impactos na agricultura

A alteração climática é uma mudança dos padrões climáticos existentes, podendo ser constatada estatisticamente pela sua distribuição por prolongados períodos de tempo, desde décadas a milhões de anos (Bhattacharya, 2019). Atualmente, este tema tem sido abordado de forma central nas áreas científicas, econômicas e públicas (Funatsu et al., 2019), tendo sido associado a emissão contínua de gases de efeito estufa (GEE) que resulta no aumento da temperatura na superfície da Terra (Karimi et al., 2018; IPCC, 2014; IPCC, 2019).

Diante esse cenário, a escassez e a dificuldade da aquisição de dados climáticos, oceânicos e hidrológicos de alta resolução, alta qualidade e históricos, juntamente com resultados de estudos científicos regionais completos, aumentam os desafios para a região enfrentar a sazonalidade climática e as tendências extremas (IPCC, 2014). Tais alterações climáticas e fatores ambientais já são evidenciadas em todo o planeta, inclusive em Regiões da América Central e do Sul (Figura 1).

Figura 1. Resumo das mudanças observadas no clima e outros fatores ambientais em regiões representativas da América Central e do Sul (Adaptado: IPCC, 2014).

Desde 1850 observa-se elevação dos gases de efeito estufa (GEE), especialmente o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), com aumento aproximado de 40%, 150% e 20%, respectivamente (Figura 2A) (IPCC, 2014; IPCC, 2019). Fato que contribui diretamente para o aumento da temperatura global (Figura 2B), especialmente em resposta ao aumento do CO_2 , representando um sério risco a produtividade agrícola em todo o mundo.

O setor agrícola é um dos mais vulneráveis às mudanças climáticas, e por isso tem sido objeto de diversos estudos nos últimos anos (Neset et al., 2019; Smith et al., 2014). Neste contexto, alterações na precipitação, na temperatura média, distúrbios na ocorrência de doenças e pragas, mudanças nas concentrações atmosféricas de CO_2 e alteração na qualidade nutricional de alguns alimentos são relatados (Bhattacharya, 2019). No entanto, estes efeitos apresentam distribuição irregular pelo mundo.

Um estudo (Scheelbeek et al., 2018) com análises de 1.540 experimentos, resultantes de 174 artigos de alta relevância, evidenciou os efeitos das alterações de CO_2 , ozônio (O_3), disponibilidade de

água, salinidade e temperatura do ar no rendimento e qualidade nutricional nos vegetais e nas leguminosas. A partir deste, foram constatadas mudanças na produção para todos os vegetais e as leguminosas combinados, com +22% para aumento de 250 ppm na concentração de CO_2 , -8,9% para o aumento de 25% da concentração de O_3 , -34,7% para a redução de 50% na disponibilidade de água, -2,3% para aumento de 25% na salinidade e -31,5% para o aumento de 4% da temperatura.

Na região semiárida do Zimbábue, um estudo (Makuvu et al., 2018) simulou os efeitos ocasionados pelo aumento na temperatura de 2,3 - 4,5°C, diminuição da precipitação entre 10 - 15% e uma concentração de CO_2 equivalente a 532 ppm na produção do milho (SC403) e duração do seu ciclo de cultivo até 2050. O estudo evidenciou que as mudanças dessas variáveis climáticas ocasionaram queda de 16% na produção de grãos e diminuição de aproximadamente 23 dias para a maturidade. Estes efeitos foram atribuídos à redução dos graus-dias necessários para maturação fisiológica do milho, com diminuição dos estádios

fisiológicos e o tempo de assimilação de CO_2 e, que resultam na redução do acúmulo de matéria seca.

Figura 2. Indicadores de mudanças climáticas. Concentrações médias globais de gases de efeito estufa (A) e da temperatura combinada da superfície terrestre e oceânica (B). Fonte: IPCC (2019).

A elevação do CO_2 estimula o crescimento das plantas em condições ideais de nitrogênio, mas sob deficiência deste elemento, podem haver alterações no seu metabolismo primário e redução do crescimento (Takatani et al., 2014). As plantas expostas a elevados níveis de CO_2 apresentam uma série de alterações fisiológicas e químicas. Nas leguminosas há mudanças na qualidade nutricional, na rizosfera, na fixação biológica de nitrogênio, na eficiência no uso da água, dentre outras (Palit et al., 2020). Por estes motivos, perdas significativas no rendimento das colheitas e tenderão a se agravar com o tempo. Em curto prazo, estima-se que as perdas de até 25%, entretanto, projeções para o ano 2080 indicam que estas podem chegar à 50%, de

acordo com a cultura e região (Aggarwal et al., 2019).

É possível observar que as mudanças climáticas afetarão a sustentabilidade dos sistemas agrícolas em diversas regiões do mundo, ocasionando os maiores impactos às populações que dependem da produção local para alimentação. Em razão disso, a segurança alimentar enfrentará desafios importantes, principalmente em regiões com climas semiáridos, tornando fundamentais o aumento e a melhoria das tecnologias no cultivo afim de minimizar tais efeitos adversos (Funatsu et al., 2019; Martins et al., 2019).

Uso da modelagem agrícola para simulação de sistemas produtivos

As alterações climáticas globais como elevação do CO₂, da temperatura, e mudanças nos regimes hídricos afetam diretamente os sistemas agrícolas, causando distúrbios nas características fisiológicas, alterando seu crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas (Asseng et al., 2015; Minoli et al., 2019).

Diante de tal cenário, o conhecimento dos principais fatores de redução na produtividade agrícola e a adoção de eficientes práticas de manejo se configuram como alternativas de mitigação à sazonalidade climática, elevando os níveis de produtividade e, mesmo a estabilidade ao longo do ano para esse setor produtivo (Battisti et al., 2018).

As melhorias nos sistemas de produção podem ser qualificadas mediante a utilização de modelos de simulação de crescimento de culturas, que relacionam os processos solo, planta, atmosfera, além das práticas de manejo adotadas (Camargo e Kemanian, 2016; Zhao et al., 2019).

Este método tem se configurado como ótima ferramenta no cenário atual, em razão da necessidade de elucidação acerca dos efeitos das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola e a adoção de possíveis estratégias de manejo (e.g. data de plantio e densidade), colheitas, dentre outros (Jardim et al., 2021; Wit et al., 2019; D. P. Holzworth et al., 2015; Manivasagam & Rozenstein, 2020). Os modelos de culturas são cada vez mais utilizados em aplicações experimentais e práticas (Figura 3).

Figura 3. Número de artigo de pesquisa relacionados a estudos com modelos de simulação de culturas publicados entre 2000 e 2020. Fonte: Portal de pesquisa de documentos Scopus - acessado em 21 de julho de 2021.

A precisão e a confiabilidade dos resultados dependem da eficiente parametrização e calibração dos modelos (Khaliq et al., 2019; Martins et al., 2018a). De acordo com Battisti et al. (2017), o nível de complexidade e o processo de simulação são outros fatores essenciais. Logo, a comparação de distintos modelos de simulação de culturas é fundamental, possibilitando a análise de suas particularidades com o objetivo de identificar suas limitações e aplicabilidades (Battisti et al., 2018; Camargo e Kemanian, 2016; Vanuytrecht et al., 2014). A partir dos modelos, relações entre os níveis de produtividades e os diversos fatores

adversos são simulados por meio de funções determinísticas (Ammar e Davies, 2019). Basso et al. (2015) e van Bussel et al. (2011) afirmam que os modelos de simulação de culturas são mais eficientes do que os estatísticos para a estimativa das produtividades futuras das culturas agrícolas.

Dentre os diversos modelos de culturas existentes, destacam-se: Agroecological Zone (Doorenbos e Kassam, 1994); Aquacrop (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009); Crop Simulation Model – CropGro (Boote et al., 1998) e Agricultural Production Systems Simulator – APSIM (Keating et al., 2003). Esses evidenciam-

se por apresentarem melhores resultados nas simulações de culturas agrícolas, além de incorporar metodologias que minimizam a quantidade de parâmetros de entrada nos modelos, tornando-os mais aplicáveis e com resultados mais eficientes.

Aplicação dos principais modelos de simulação de crescimento de culturas agrícolas

O Agroecological Zone (ZAE – FAO) foi aplicado na identificação do “Yield Gap” entre cultivos de sequeiro e irrigado na cana-de-açúcar, e sua resposta na eficiência no uso do solo e da água em diversas regiões do Brasil (Piffer Cardozo et al., 2018). A partir das simulações realizadas com este modelo, foi possível verificar que os efeitos da variabilidade climática na produtividade e rentabilidade econômica influenciam diretamente na identificação das melhores datas de plantio para o sistema de sucessão soja-milho (Nóia Júnior e Sentelhas, 2019).

A partir de simulações com uso do modelo AquaCrop, verificou-se as melhores datas de plantio do sorgo em condições de sequeiro, além de instruções de práticas mais eficientes para produção em sistemas agroecológicos, na África do Sul (Hadebe et al., 2020). Com uso deste modelo também foi possível realizar estimativas da cobertura do dossel, água disponível no solo, rendimento de grãos, evapotranspiração da cultura e eficiência no uso da água para a cultura do milho em condições irrigadas e sequeiro em Nebraska (EUA) (Sandhu e Irmak, 2019) e a produção de grãos com diferentes níveis de Nitrogênio, na Nigéria (Akumaga et al., 2017).

O modelo CROPGRO foi empregado em estudos com objetivos diversos, desde a predição de rendimento da soja em condições irrigadas e de sequeiro, na Índia (Bhatia et al., 2008), até a identificação das regiões mais produtivas do Brasil mediante o déficit hídrico (Rafael Battisti & Sentelhas, 2019). Com a adaptação e parametrização desse modelo ainda é possível simular as características produtivas das culturas

forrageiras (e.g. *Brachiaria brizantha*), como o crescimento e rendimento em sistema monocultivo (Pedreira et al., 2011) e sistema silvipastoril com eucalipto (Bosi et al., 2020).

Para a identificação das lacunas na produtividade em sistema de rotação milho-soja, com práticas de manejo simples e avançadas, no Oeste dos Estados Unidos, Balboa et al. (2019) utilizaram o modelo APSIM. Esse também foi utilizado para a simulação do rendimento do trigo, em condição de sequeiro, na Austrália (Hochman et al., 2016). No Brasil, Dias; Sentelhas. (2018) aplicaram o modelo APSIM no estudo das limitações de rendimento da cana-de-açúcar e as principais causas, desde déficit hídrico a manejo de cultivo.

Muitos estudos ainda comparam a aplicação desses modelos para diversas culturas e manejos, identificando limitações e recomendando aqueles mais eficientes para distintas condições agrícolas e ambientais (Battisti et al., 2018; Dias e Sentelhas, 2018; Elli et al., 2019).

Descrição do Modelo Agroecological Zone – FAO (MAZ-FAO)

O modelo de Zona Agroecológica da FAO é um modelo simples de crescimento de cultura empregado para analisar a relação existente entre a produtividade e as condições climáticas (Doorenbos e Kassam, 1994). O mesmo baseia-se na estimativa da produtividade potencial (PP) para uma cultura padrão altamente produtiva sob condições ideais, por meio de equações matemáticas que são posteriormente corrigidas para a cultura de interesse. Já a produtividade atingível (PA), que considera as quebras de produtividade da PP ocasionadas pelo déficit hídrico, é estimada pelo modelo nas diferentes fases fenológicas e modulada por um Índice de Sensibilidade da Cultura ao Déficit Hídrico (Ky), que engloba todas as características associadas à resposta da espécie (Figura 4) (Battisti e Sentelhas, 2015; Dias e Sentelhas, 2018; Gustavo Andrioli e Cesar Sentelhas, 2009; Piffer Cardozo et al., 2018).

Figura 4. Diagrama geral dos parâmetros originais e incluídos na Adaptação do Modelo da Zona Agroecológica (MZA – FAO).

O cálculo da produtividade potencial da cultura é realizado por meio da taxa de produtividade bruta e de uma cultura padrão corrigida por fatores adimensionais:

$$PP = PB * C_{IAF} * C_R * C_C * C_{UM} * ND \quad (1)$$

em que: PB - produtividade bruta de matéria seca ($\text{kg, MS ha}^{-1}\text{dia}^{-1}$); C_{IAF} - coeficiente de correção do índice de área foliar (IAF); C_R - coeficiente de correção da respiração; C_C - coeficiente de correção da fração colhida (índice de colheita); C_{UM} - coeficiente de correção da umidade da fração colhida; e, ND - número de dias do ciclo.

A produtividade atingível é determinada diretamente por fatores determinantes que condicionam a PP e pelos fatores redutores ocasionados pela disponibilidade hídrica do solo, como pode ser evidenciado na equação seguinte:

$$PA = PP * \left\{ 1 - K_y * \left[1 - \left(\frac{E_{Tr}}{E_{Tm}} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

em que: E_{Tr} - evapotranspiração real da cultura; E_{Tm} - evapotranspiração máxima da cultura, que pode ser obtido pelo produto entre a evapotranspiração de referência (E_{To}) e o coeficiente da cultura (k_c).

No Brasil, o modelo de Zona Agroecológica – FAO tem sido aplicado com diversas finalidades, como estimativas de produtividade (Monteiro & Sentelhas, 2014), definição das melhores épocas no ano para

semeadura (Rolim et al., 2001), tolerância de determinadas culturas à déficits hídricos (Battisti e Sentelhas, 2015) e análise da eficiência do manejo agrícola (Battisti et al., 2013).

O modelo apresentou resultados eficazes na avaliação dos impactos das datas de plantio para a produtividade e rentabilidade econômica do sistema agrícola de sucessão de soja-milho para diferentes regiões do Brasil (Nóia Júnior e Sentelhas, 2019). Adicionalmente, foi possível realizar estimativas do aumento produtivo da cana-de-açúcar em sistemas irrigados, mediante as interações climáticas e eficiência agrícola para diferentes regiões brasileiras com uso do MAZ-FAO (Piffer Cardozo et al., 2018).

Modelo AquaCrop – FAO

O AquaCrop é um modelo de crescimento e desenvolvimento de culturas agrícolas, o qual realiza a simulação da produtividade de espécies herbáceas sob diferentes condições hídricas. Este foi desenvolvido pela Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, com o intuito de estudar a segurança alimentar e estimar a produtividade das culturas mediante a interação entre o ambiente biofísico e o manejo agrícola (Adeboye et al., 2019; Foster et al., 2017; Karuku & Mbindah, 2020; Pirmoradian e Davatgar, 2019; Steduto et al., 2009).

A estimativa do acúmulo de biomassa é realizada a partir do produto entre a transpiração da cultura e um parâmetro de produtividade da água (Eq. 3).

$$B = WP \times \sum Tr \quad (3)$$

em que: B - biomassa seca acima do solo (ton ha^{-1}), WP - produtividade da água (biomassa por unidade de transpiração cumulativa) e Tr - transpiração da cultura.

O rendimento das culturas (Eq. 4) é então calculado a partir do produto da biomassa seca acima do solo e do índice de colheita (IC). Este parâmetro aumenta durante o estágio de crescimento e é influenciado por estresses hídricos e térmicos (Steduto et al., 2007).

$$Y = B \times HI \quad (4)$$

em que: Y - rendimento da colheita, HI - índice de colheita.

O processo de simulação evolui a partir da equação original proposta por Doorenbos e Kassam (1979), que considera a produtividade e evapotranspiração como termos relativos, estimando a lacuna de produtividade potencial da

planta durante seu ciclo sob o efeito ocasionado pelo déficit hídrico no solo (Foster et al., 2017; Steduto et al., 2007).

A partir desse princípio de divisão da evapotranspiração em processos distintos de transpiração da cultura e evapotranspiração de água no solo (Doorenbos e Kassam, 1979) é possível eliminar o suposto efeito da evaporação, principalmente em situações em que o solo não apresenta cobertura superficial completa (Steduto et al., 2009).

O processo de transferência contínua caracteriza-se como a principal base estrutural do modelo AquaCrop. O mesmo simula a interação entre o solo (balanço hídrico), planta (crescimento, desenvolvimento e produtividade), atmosfera (temperatura do ar, precipitação, demanda evaporativa e concentração de dióxido de carbono) e manejo agrícola, (irrigação, fertilização, cobertura do solo) (Steduto et al., 2009). Tais fatores afetam o balanço hídrico do solo, crescimento e desenvolvimento, eficiência do uso da água e a produtividade da cultura (Figura 5). Os efeitos de pragas e doenças, no entanto, não são considerados.

Figura 5. Estrutura do modelo AquaCrop com destaque aos principais componentes da interação solo-planta-atmosfera e parâmetros da fenologia de transporte, cobertura do solo pelo dossel, transpiração, produção de biomassa e produção final (I – irrigação; T_n – temperatura mínima do ar; T_x – temperatura máxima do ar; ET_0 – evapotranspiração de referência; E – evaporação do solo; Tr – transpiração da cultura; g_s – condutância estomática; WP – produtividade da água; HI (IC) – índice de colheita; CO_2 – concentração de dióxido atmosférico; Escoamento – escoamento superficial; (1), (2), (3), (4) – diferentes respostas ao estresse hídrico. As linhas contínuas indicam ligações diretas entre as variáveis e os processos e as linhas tracejadas indicam retroalimentação. Adaptado de Steduto et al. (2009).

Quando comparado a outros modelos de simulação, o AquaCrop necessita de um número reduzido de variáveis e parâmetros de entrada, os quais são facilmente computados. Apesar das características de simplicidade do modelo, quando bem calibrado e validado, o mesmo oferece um grande equilíbrio na precisão da produção (Martini, 2018; Steduto et al., 2007; Vanuytrecht et al., 2014; Xu et al., 2019).

Os dados de entrada utilizados para a calibração são inseridos conforme descrito por Raes et al. (2009) e Steduto et al. (2009). A calibração é realizada com a quantidade mínima de variáveis (Tabela 1) sendo consideradas como as principais para o ajuste a cobertura do dossel e a biomassa, ambas observadas em campo (Akumaga et al., 2017; Hadebe et al., 2020; Sandhu e Irmak, 2019; Xu et al., 2019).

Tabela 1. Principais parâmetros utilizados para calibração do modelo AquaCrop.

Parâmetros	Unidades
Densidade de plantio	plantas m ⁻²
Cobertura inicial do dossel com emergência de 90%	%
Expansão do dossel	% dia ⁻¹
Máximo desenvolvimento do dossel	%
Declínio do dossel	% dia ⁻¹
Emergência	DAP ou GD
Máximo desenvolvimento do dossel	DAP ou GD
Início da senescência	DAP ou GD
Início da floração	DAP ou GD
Profundidade da raiz	m
Profundidade máxima da raiz	DAP ou GD
Max. transpiração da cultura	adm
Produtividade da água normalizada	g m ⁻²
Índice de colheita – HI	%
Função de expansão do dossel	-
Função de fechamento estomático	-
Função de senescência no dossel precoce	-
Temperatura base	°C
Temperatura superior	°C

em que: DAP – dias após o plantio; GD – graus-dias; adm – adimensional.

Esses parâmetros podem ser obtidos por meio de medições em campo, realização de estimativas e/ou, quando não houver disponibilidade da variável requerida, mediante estudos com características de sistema de cultivo semelhantes disponíveis na literatura. A partir

disso, tem-se a metodologia aplicável para aquisição dos valores de entrada:

- Densidade de plantio: atendendo as recomendações de espaçamento da cultura, é possível a contabilização do quantitativo de plantas por m².

- Cobertura dossel: em vez do Índice de Área Foliar (IAF), o AquaCrop usa a cobertura do dossel verde (CC) para expressar o desenvolvimento foliar da cultura, com exposto na equação seguinte:

$$CC = 1.005[1 - \exp(-0.6IAF)]^{1.2}$$

O desenvolvimento do dossel em condições ideais é descrito por alguns parâmetros, como a cobertura inicial do dossel com 90% de emergência (CCo) e a cobertura máxima do dossel quando está totalmente desenvolvido (CCx);

Já o coeficiente de crescimento do dossel (CGC), usado para descrever a expansão do dossel entre a emergência e o desenvolvimento total e o coeficiente de declínio do dossel (CDC), usado para descrever a fase de declínio devido à senescência foliar à medida que a cultura se aproxima da maturidade, podem ser obtidos mediante a inserção de valores por tentativa e erro até a máxima aproximação dos valores reais obtidos em campo.

- O desenvolvimento do sistema radicular ao longo do ciclo pode ser obtido por análise biométrica em raízes de plantas amostrais no campo, ou com embasamento teórico disponível em trabalhos com características de cultivar, clima, solo e manejo semelhantes.

Os resultados obtidos a partir das simulações são confrontados com os dados observados em campo e, posteriormente, validados com indicadores estatísticos e de performance. As simulações do modelo AquaCrop apresentaram resultados satisfatórios para diversos manejos agrícolas e culturas de metabolismos C₃ e C₄ (Adeboye et al., 2019; Araya et al., 2016; Battisti et al., 2017; Hadebe et al., 2020), tornando-o aplicável nas estimativas de produção agrícola.

Modelo Crop Simulation Model – CROPGRO

O CROPGRO é um modelo mecanicista que simula os processos de crescimento e desenvolvimento de culturas, fenologia, fotossíntese, demanda de nitrogênio e carbono da planta, balanço hídrico do solo e os danos ocasionados pela incidência de pragas e doenças. O CROPGRO está integrado ao Sistema de Decisão e Suporte à Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), permitindo aos usuários simular

diversas situações de manejo de culturas no decorrer de vários anos (Alderman et al., 2015; Boote et al., 1998; Moura da Silva et al., 2021; Singh et al., 2017).

O DSSAT é composto por uma variedade de programas independentes que operam juntos. Os modelos de simulação de cultura são a base central do processo (Figura 6). A partir dos bancos de dados de clima, solo, condições ambientais, observações de campo e informações de genótipos é possível a aplicação dos modelos em diferentes situações existentes. O software ajuda os usuários a preparar esses bancos de dados e compara os resultados simulados com os observados, aumentando a confiança nos modelos, além de determinar se modificações são necessárias para melhorar a precisão (Uehara, 1989; Jones et al., 1998). Além disso, os programas contidos no DSSAT permitem que os usuários simulem opções de manejo de safras ao longo de vários anos para avaliar os riscos associados a cada opção (Jones et al., 2003).

O modelo DSSAT possui um código genérico, ou seja, o modelo pode ser usado para diferentes culturas. Os parâmetros de espécies, ecótipos e cultivares, que controlam vários aspectos do crescimento e desenvolvimento das culturas, são mantidos em arquivos externos (Figura 4). Todavia, há uma separação entre os parâmetros de entrada, característicos das culturas, e aqueles do código-fonte existentes no modelo, facilitando-se então a adaptação para novas espécies (Boote et al., 1998; Jones et al., 2003; Pequeno et al., 2018).

Os principais coeficientes das culturas utilizados para calibração do CROPGRO são definidos na Tabela 2. A partir dessa calibração é possível simular o crescimento diário e o desenvolvimento em resposta às condições climáticas e do solo e ao manejo da cultura (Guerra et al., 2008).

Os procedimentos gerais de calibração e definição dos parâmetros de entrada do modelo são semelhantes entre estudos com o CROPGRO, que começa com os coeficientes iniciais que são extraídos do arquivo de genótipo do DSSAT e seleciona o melhor valor para cada coeficiente avaliando o erro quadrático médio (RMSE) entre as variáveis simuladas e observadas (Alderman et al., 2015; BAO et al., 2015; Bosi et al., 2020; Wang et al., 2020).

Figura 6. Diagrama do modelo DSSAT com seus bancos de dados, aplicativos e componentes de software. Adaptado de Jones et al. (2003).

Tabela 2. Principais parâmetros utilizados para calibração do modelo COPGRO - DSSAT.

Coefficiente	Definição	Unidade
CSDL	Duração curto do dia na qual o desenvolvimento reprodutivo progride sem efeitos da radiação	H
PPSEN	Declínio da resposta relativa de desenvolvimento ao fotoperíodo com o tempo	1/h
EM-FL	Tempo entre a emergência da planta e o aparecimento da flor	°C dia ⁻¹
FL-SH	Tempo entre a primeira flor e a primeira vagem	°C dia ⁻¹
FL-SD	Tempo entre a primeira flor e a primeira semente	°C dia ⁻¹
SD-PM	Tempo entre a primeira semente e a maturidade fisiológica	°C dia ⁻¹
FL-LF	Tempo entre a primeira flor e o final da expansão da folha	°C dia ⁻¹
SFDUR	Duração do enchimento de sementes para corte de frutos em condições de crescimento padrão	°C dia ⁻¹
PODUR	Tempo necessário para que o cultivar alcance a carga final da vagem em condições ideais	°C dia ⁻¹
LFMAX	Taxa máxima de fotossíntese foliar a 30 °C, 350 vpm CO ₂ e luz alta	mg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹
SLAVR	Área foliar específica da cultivar sob condições de crescimento padrão	cm ² g ⁻¹
SIZLF	Tamanho máximo da folha inteira (três folíolos)	cm ²
XRFT	Fração máxima de crescimento diário que é particionada em semente + casca	-
WTPSD	Peso máximo por semente	g
SDPDV	Semente média por vagem em condições de crescimento padrão	n° por vagem

Após a calibração do modelo e simulação, os resultados são confrontados com dados observados em campo. Geralmente, a produtividade de biomassa e a cobertura do dossel são os principais fatores de comparações. Os valores simulados e observados são submetidos a análises estatísticas, afim de evidenciar a precisão e confiança do modelo (Bosi et al., 2020; Wang et al., 2020).

Diversos estudos constataram eficiência nas simulações do modelo CROGRO, para diferentes culturas, como feijão (Alderman et al., 2015; Santos et al., 2016), algodão (Wang et al., 2020), forragens perenes (Bosi et al., 2020; Pedreira et al., 2011; Pequeno et al., 2018) e soja (BAO et al., 2015; Bhatia et al., 2008).

Modelo Agricultural Production Systems Simulator – APSIM

O Simulador de Sistemas de Produção Agrícola (APSIM) foi desenvolvido pela Unidade de Pesquisa em Sistemas de Produção Agrícola (APSRU), na Austrália, com o objetivo de melhorar a gestão agrícola (Keating et al., 2003; McCown et al., 1996). O modelo foi projetado por pesquisadores e programadores, visando simular sistemas agrícolas complexos e sob riscos na produção (Holzworth et al., 2014; McCown et al., 1995; Morel et al., 2021).

A estrutura do APSIM permite que os módulos de cada componente mais importante do sistema de cultivo sejam interconectados, por módulos biofísicos e de gestão, possibilitando realizar simulações ambientais de manejo (plantio, cobertura vegetal, adubação, controle fitossanitário) e seus efeitos na produção e recursos do solo (matéria orgânica, acidificação e erosão) (Akhavizadegan et al., 2021; Gaydon et al., 2017;

Holzworth et al., 2018; Keating et al., 2003). De acordo com McCown et al. (1995), o APSIM diferencia-se dos demais modelos por definir o solo, e não a cultura, como o principal componente da simulação.

A produtividade real é eficientemente simulada pelo APSIM para mais de 20 culturas e diferentes sistemas de cultivo. O modelo é adequado para avaliar os impactos na produtividade final das culturas ocasionadas por alterações nas propriedades físico químicas do solo em longo prazo (Asseng et al., 2011; Berghuijs et al., 2021; Gaydon et al., 2017; McCown et al., 1996; Mohanty et al., 2012).

De forma básica, o modelo APSIM está estruturado em quatro módulos (Figura 7). Keating et al. (2003) descreve a estrutura do modelo APSIM como um conjunto de módulos biofísicos que realizam a simulação de processos biológicos e físicos em ambientes agrícolas; um conjunto de módulos de gerenciamento que permitem ao usuário definir as regras de gerenciamento projetado para melhores resultados na simulação; vários módulos que permitem maior facilidade na aquisição dos dados de entrada e saída, além da simulação; e, uma metodologia que realiza todo o processo de simulação mantendo o controle das informações obtidas de forma independente.

Para os processos de calibração do modelo APSIM, os principais parâmetros de entrada são obtidos em campo a partir de dados reais das culturas. Para tal, são analisados parâmetros específicos das culturas que incluem número mínimo e máximo de folhas, taxa de aparecimento de folhas, tempo térmico para mudanças fenológicas e eficiência no uso da radiação (EUR) (Tabela 3).

Figura 7. Representação da estrutura do modelo APSIM com os módulos individuais de cultura e solo, módulos e mecanismos de simulação. Adaptado de Keating et al. (2003) e McCown et al. (1995).

Tabela 3. Principais parâmetros utilizados para calibração do modelo APSIM.

Símbolo	Descrição	Unidade
T_b	Temperatura base	$^{\circ}\text{C}$
Nf_0	Número de folhas na emergência	
$Nf_{\min}$	Número mínimo de folhas	
$Nf_{\max}$	Número máximo de folhas	
$T_{\max_{\text{lob}}}$	Tempo térmico necessário para o desenvolvimento do maior número de lóbulos	$^{\circ}\text{C dia}^{-1}$
$T_{\text{ult}_{\text{lob}}}$	Tempo térmico necessário para o desenvolvimento do último lóbulo foliar	$^{\circ}\text{C dia}^{-1}$
$T_{\text{emrg-juv}}$	Tempo térmico entre a emergência e o final do estágio juvenil	$^{\circ}\text{C dia}^{-1}$
$T_{\text{juv-inflor}}$	Tempo térmico entre o final do estágio juvenil e a iniciação floral	$^{\circ}\text{C dia}^{-1}$
$T_{\text{fband-flor}}$	Tempo térmico entre o aparecimento da folha bandeira e a floração	$^{\circ}\text{C dia}^{-1}$
$T_{\text{flor-graos}}$	Tempo térmico entre a floração e o início do enchimento dos grãos	$^{\circ}\text{C dia}^{-1}$
$T_{\text{flor-mat}}$	Tempo térmico entre a floração e a maturidade fisiológica	$^{\circ}\text{C dia}^{-1}$
EUR	Eficiência do uso da radiação (biomassa)	g MJ^{-1}

A partir dos resultados obtidos com as simulações, são realizadas análises comparativas com os dados observados em campo. Com isso é possível validar estatisticamente a utilização desse modelo para determinada cultura e/ou sistema produtivo.

Considerações finais

Esta revisão fez um levantamento sobre os impactos das mudanças climáticas no desenvolvimento agrícola e do uso dos principais modelos utilizados para a simulação de culturas. A nossa busca demonstrou que as mudanças climáticas podem intensificar as perdas de produtividade das culturas agrícolas e que neste caso, o uso de modelagem é fundamental para a compreensão e preenchimento de lacunas existentes, especialmente em sistemas de cultivo com informações incipientes, como é o caso de culturas forrageiras.

O uso de determinado modelo de simulação de cultura deve ser com base criteriosa, mediante a existência e disponibilidade de consistentes dados, além do conhecimento da sua limitação diante determinados cenários climáticos e de cultivos.

Para resultados científicos de maiores relevâncias, recomenda-se à melhoria da relação entre experimentos e modelos. Direcionando os estudos para as diferentes estações do ano, além de ampliar a análise sistemática entre os diversos fatores extremos de clima x genótipo x manejo agrícola.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEPE (processos: APQ-0215-5.01/10 e FACEPE – APQ – 1159 - 1.07/14). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (processos: 475279/2010-7, 476372/2012-7, 305286/2015-3, 309421/2018-7 e 152251/2018-9). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES (Código Financeiro 001) pela bolsa de pesquisa e estudo.

Referências

Abd-Elmabod, S.K., Muñoz-Rojas, M., Jordán, A., Anaya-Romero, M., Phillips, J.D., Laurence, J., Zhang, Z., Pereira, P., Fleskens, L., Van der

Ploeg, M., Rosa, D., 2020. Climate change impacts on agricultural suitability and yield reduction in a Mediterranean region. *Geoderma*, 374(4), 114453. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114453>

Adeboye, O.B., Schultz, B., Adekalu, K.O., Prasad, K.C., 2019. Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max* L. merr) in Ile-Ife, Nigeria. *Agricultural Water Management*, 213, 1130–1146.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.006>

Aggarwal, P., Vyas, S., Thornton, P., Campbell, B. M., Kropff, M. 2019. Importance of considering technology growth in impact assessments of climate change on agriculture. *Global Food Security*, 23(4), 41–48.

<https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.04.002>

Akhavizadegan, F., Ansarifard, J., Wang, L., Huber, I., Archontoulis, S.V., 2021. A time-dependent parameter estimation framework for crop modeling. *Scientific Reports*, 11(1), 11437. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90835-x>

Akumaga, U., Tarhule, A., Yusuf, A.A., 2017. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 225–234.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.011>

Alderman, P.D., Boote, K.J., Jones, J.W., Bhatia, V.S., 2015. Adapting the CSM-CROPGRO model for pigeonpea using sequential parameter estimation. *Field Crops Research*, 181, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.05.024>

Ali, U., Jing, W., Zhu, J., Omarkhanova, Z., Fahad, S., Nurgazina, Z., Khan, Z.A., 2021. Climate change impacts on agriculture sector: A case study of Pakistan. *Ciência Rural*, 51(8), 2021. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200110>

Ammar, M.E., Davies, E.G.R., 2019. On the accuracy of crop production and water requirement calculations: Process-based crop modeling at daily, semi-weekly, and weekly time steps for integrated assessments. *Journal of Environmental Management*, 238, 460–472. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.030>

Araya, A., Kisekka, I., Holman, J., 2016. Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. *Irrigation Science*, 34(6), 465–481.

3661

- <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0515-7>
- Asseng, S., Foster, I., Turner, N.C., 2011. The impact of temperature variability on wheat yields. *Global Change Biology*, 17(2), 997–1012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02262.x>
- Asseng, S., Zhu, Y., Wang, E., Zhang, W., 2015. Crop modeling for climate change impact and adaptation. In *Crop Physiology* (pp. 505–546). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00020-0>
- Balboa, G.R., Archontoulis, S.V., Salvagiotti, F., Garcia, F.O., Stewart, W.M., Francisco, E., Prasad, P.V.V., Ciampitti, I.A., 2019. A systems-level yield gap assessment of maize-soybean rotation under high- and low-management inputs in the Western US Corn Belt using APSIM. *Agricultural Systems*, 174, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.04.008>
- Bao, Y., Hoogenboom, G., McClendon, R.W., Paz, J.O., 2015. Potential adaptation strategies for rainfed soybean production in the south-eastern USA under climate change based on the CSM-CROPGRO-Soybean model. *The Journal of Agricultural Science*, 153(5), 798–824. <https://doi.org/10.1017/S0021859614001129>
- Basso, B., Hyndman, D.W., Kendall, A. D., Grace, P. R., & Robertson, G. P., 2015. Can Impacts of Climate Change and Agricultural Adaptation Strategies Be Accurately Quantified if Crop Models Are Annually Re-Initialized? *PLOS ONE*, 10(6), e0127333–e0127333. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127333>
- Battisti, R., Sentelhas, P.C., 2015. Drought tolerance of brazilian soybean cultivars simulated by a simple ag rometeorological yield model. 51(2), 285–298. <https://doi.org/10.1017/S0014479714000283>
- Battisti, R., Parker, P.S., Sentelhas, P.C., Nendel, C., 2017. Gauging the sources of uncertainty in soybean yield simulations using the MONICA model. *Agricultural Systems*, 155, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.04.004>
- Battisti, R., Sentelhas, P.C. 2019. Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. *Field Crops Research*, 240, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.06.007>
- Battisti, R., Sentelhas, P.C., Boote, K.J., 2017. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. *Field Crops Research*, 200, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.004>
- Battisti, R., Sentelhas, P.C., Boote, K.J., 2018. Sensitivity and requirement of improvements of four soybean crop simulation models for climate change studies in Southern Brazil. *International Journal of Biometeorology*, 62(5), 823–832. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1483-1>
- Battisti, R., Sentelhas, P.C., Pilau, F.G., Wollmann, C.A., 2013. Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. *Ciência Rural*, 43(3), 390–396. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000300003>
- Berghuijs, H.N.C., Weih, M., Van der Werf, W., Karley, A.J., Adam, E., Villegas-Fernández, Á.M., Kiær, L.P., Newton, A.C., Scherber, C., Tavoletti, S., Vico, G., 2021. Calibrating and testing APSIM for wheat-faba bean pure cultures and intercrops across Europe. *Field Crops Research*, 264, 108088. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108088>
- Bhatia, V.S., Singh, P., Wani, S.P., Chauhan, G.S., Rao, A.V.R.K., Mishra, A.K., Srinivas, K., 2008. Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(8–9), 1252–1265. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.03.004>
- Bhattacharya, A. 2019. Global Climate Change and Its Impact on Agriculture. In *Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816209-5.00001-5>
- Boote, K.J., Jones, J.W., Hoogenboom, G., Pickering, N.B., 1998. The CROPGRO model for grain legumes. In *Understanding Options for Agricultural Production*, 7, 99–128. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_6
- Bosi, C., Sentelhas, P.C., Pezzopane, J.R.M., Santos, P.M., 2020. CROPGRO-Perennial Forage model parameterization for simulating Piatã palisade grass growth in monoculture and in a silvopastoral system. *Agricultural Systems*, 177(5), 102724. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102724>
- Camargo, G.G.T., Kemanian, A.R., 2016. Six crop models differ in their simulation of water uptake. *Agricultural and Forest Meteorology*, 220, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.01.013>
- De Wit, A., Boogaard, H., Fumagalli, D., Janssen, S., Knapen, R., Van Kraalingen, D., Supit, I.,

- Van der Wijngaart, R., Van Diepen, K., 2019. 25 years of the WOFOST cropping systems model. *Agricultural Systems*, 168, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.018>
- Dias, H.B., Sentelhas, P.C., 2018. Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. *Science of the Total Environment*, 637–638, 1127–1136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.017>
- Elli, E.F., Sentelhas, P.C., Freitas, C.H., Carneiro, R.L., Alvares, C. A., 2019. Intercomparison of structural features and performance of Eucalyptus simulation models and their ensemble for yield estimations. *Forest Ecology and Management*, 450, 117493. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117493>
- Foster, T., Brozović, N., Butler, A.P., Neale, C.M. U., Raes, D., Steduto, P., Fereres, E., Hsiao, T.C., 2017. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural Water Management*, 181, 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.015>
- Funatsu, B.M., Dubreuil, V., Racapé, A., Debortoli, N.S., Nasuti, S., Le Tourneau, F. M., 2019. Perceptions of climate and climate change by Amazonian communities. *Global Environmental Change*, 57(May), 101923. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.05.007>
- Gaydon, D.S., Balwinder-Singh, Wang, E., Poulton, P.L., Ahmad, B., Ahmed, F., Akhter, S., Ali, I., Amarasingha, R., Chaki, A.K., Chen, C., Choudhury, B.U., Darai, R., Das, A., Hochman, Z., Horan, H., Hosang, E.Y., Kumar, P.V., Khan, A.S.M.M.R., Roth, C.H., 2017. Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. *Field Crops Research*, 204, 52–75. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.015>
- Andrioli, G.K., Cesar Sentelhas, P., 2009. Brazilian maize genotypes sensitivity to water deficit estimated through a simple crop yield model. In *Pesq. agropec. bras* (Issue 7). <http://www.scielo.br/pdf/pab/v44n7/01.pdf>
- Hadebe, S.T., Mabhaudhi, T., Modi, A.T., 2020. Sorghum best practice management recommendations based on AquaCrop modeling scenario analysis in various agro-ecologies of KwaZulu Natal, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 102866. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102866>
- Hochman, Z., Gobbett, D., Horan, H., Navarro Garcia, J., 2016. Data rich yield gap analysis of wheat in Australia. *Field Crops Research*, 197, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.017>
- Holzworth, D., Huth, N.I., Fainges, J., Brown, H., Zurcher, E., Cichota, R., Verrall, S., Herrmann, N.I., Zheng, B., Snow, V., 2018. APSIM Next Generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model. *Environmental Modelling & Software*, 103, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.02.002>
- Holzworth, D.P., Huth, N.I., De Voil, P.G., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., Van Oosterom, E.J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A.D., Brown, H., Whish, J.P.M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L.W., Peake, A.S., Poulton, P.L., Hochman, Z., Keating, B.A., 2014. APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software*, 62, 327–350. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
- Holzworth, D.P., Snow, V., Janssen, S., Athanasiadis, I.N., Donatelli, M., Hoogenboom, G., White, J. W., Thorburn, P., 2015. Agricultural production systems modelling and software: Current status and future prospects *. *Environmental Modelling and Software*, 72, 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.013>
- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E., 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448–459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- Jardim, A.M.R.F., Souza, L.S.B., Alves, C.P., Araújo, J.F.N., Souza, C.A.A., Pinheiro, A.G., Araújo, G.G.L., Campos, F.S., Tabosa, J.N., Silva, T.G.F., 2021. Intercropping forage cactus with sorghum affects the morphophysiology and phenology of forage cactus. *African Journal of Range and Forage Science*, 38, 1–12. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.1949749>
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 235–265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)

- Karimi, V., Karami, E., Keshavarz, M., (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- Karuku, G.N., Mbindah, B.A., 2020. Validation of aquacrop model for simulation of rainfed bulb onion (*Allium cepa* L.) yields in west ugenya sub-county, Kenya. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(06), 1–11.
- Keating, B., Carberry, P., Hammer, G., Probert, M., Robertson, M., Holzworth, D., Huth, N., Hargreaves, J. N., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K., Asseng, S., Smith, C., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 267–288. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9)
- Khaliq, T., Gaydon, D.S., Ahmad, M.D., Cheema, M.J.M., Gull, U., 2019. Analyzing crop yield gaps and their causes using cropping systems modelling—A case study of the Punjab rice-wheat system, Pakistan. *Field Crops Research*, 232, 119–130. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2018.12.010>
- Lamichhane, J.R., Constantin, J., Aubertot, J.N., Dürr, C., 2019. Will climate change affect sugar beet establishment of the 21st century? Insights from a simulation study using a crop emergence model. *Field Crops Research*, 238, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.022>
- Leng, G., Zhang, X., Huang, M., Asrar, G.R., Leung, L.R., 2016. The Role of Climate Covariability on Crop Yields in the Conterminous United States OPEN. *Nature Publishing Group*. <https://doi.org/10.1038/srep33160>
- Makuvu, V., Walker, S., Masere, T.P., Dimes, J., 2018. Smallholder farmer perceived effects of climate change on agricultural productivity and adaptation strategies. *Journal of Arid Environments*, 152, 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.01.016>
- Manivasagam, V.S., Rozenstein, O., 2020. Practices for upscaling crop simulation models from field scale to large regions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105554. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105554>
- Martini, L.C.P., 2018. Sensitivity analysis of the AquaCrop parameters for rainfed corn in the South of Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(8), 934–942. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000800008>
- Martins, M.A., Tomasella, J., Dias, C.G., 2019. Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. *Agricultural Water Management*, 216(8), 339–350. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.011>
- Martins, M.A., Tomasella, J., Rodriguez, D.A., Alvalá, R.C.S., Giarolla, A., Garofolo, L.L., Júnior, J.L.S., Paolicchi, L.T.L.C., Pinto, G.L.N., 2018a. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. *Agricultural Systems*, 160(11), 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.002>
- Martins, M.A., Tomasella, J., Rodriguez, D.A., Alvalá, R.C.S., Giarolla, A., Garofolo, L.L., Júnior, J.L.S., Paolicchi, L.T.L.C., Pinto, G.L.N., 2018b. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. *Agricultural Systems*, 160, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.002>
- McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D., Huth, N.I., 1995. APSIM: an agricultural production system simulation model for operational research. *Mathematics and Computers in Simulation*, 39(3–4), 225–231. [https://doi.org/10.1016/0378-4754\(95\)00063-2](https://doi.org/10.1016/0378-4754(95)00063-2)
- Mccown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., Freebairn, D.M., 1996. APSIM: a Novel Software System for Model Development, Model Testing and Simulation in Agricultural Systems Research. *Agricultural Systems*, 50, 255–271.
- Minoli, S., Egli, D.B., Rolinski, S., Müller, C., 2019. Modelling cropping periods of grain crops at the global scale. *Global and Planetary Change*, 174, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.12.013>
- Mohanty, M., Probert, M.E., Reddy, K.S., Dalal, R.C., Mishra, A.K., Rao, A.S., Singh, M., Menzies, N.W., 2012. Simulating soybean-wheat cropping system: APSIM model parameterization and validation. “*Agriculture, Ecosystems and Environment*,” 152, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.02.013>
- Monteiro, L. A., & Sentelhas, P. C. (2014). Calibration and testing of an agrometeorological model for the estimation of soybean yields in different Brazilian regions.

- Acta Scientiarum. Agronomy, 36(3), 265.
<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v36i3.17485>
- Morel, J., Kumar, U., Ahmed, M., Bergkvist, G., Lana, M., Halling, M., Parsons, D., 2021. Quantification of the Impact of Temperature, CO₂, and Rainfall Changes on Swedish Annual Crops Production Using the APSIM Model. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5(5), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.665025>
- Silva, E.H.F.M., Silva Antolin, L.A., Zanon, A.J., Andrade, A.S, Souza, H.A, Santos Carvalho, K.S., Vieira, N.A., Marin, F.R., 2021. Impact assessment of soybean yield and water productivity in Brazil due to climate change. *European Journal of Agronomy*, 129, 126329. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126329>
- Neset, T.S., Wiréhn, L., Opach, T., Glaas, E., Linnér, B.O., 2019. Evaluation of indicators for agricultural vulnerability to climate change: The case of Swedish agriculture. *Ecological Indicators*, 105(6), 571–580. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.042>
- Nóia Júnior, R. S., Sentelhas, P.C., 2019. Soybean-maize succession in Brazil: Impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. *European Journal of Agronomy*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.008>
- Palit, P., Kudapa, H., Zougmore, R., Kholova, J., Whitbread, A., Sharma, M., Varshney, R.K., 2020. An integrated research framework combining genomics, systems biology, physiology, modelling and breeding for legume improvement in response to elevated CO₂ under climate change scenario. *Current Plant Biology*, 22, 100149. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100149>
- Palosuo, T., Hoffmann, M.P., Rötter, R.P., Lehtonen, H.S., 2021. Sustainable intensification of crop production under alternative future changes in climate and technology: The case of the North Savo region. *Agricultural Systems*, 190, 103135. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103135>
- Pedreira, B.C., Pedreira, C.G.S., Boote, K.J., Lara, M.A.S., Alderman, P.D., 2011. Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. *Field Crops Research*, 120(3), 370–379. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.010>
- Pequeno, D.N.L., Pedreira, C.G.S., Boote, K.J., Alderman, P.D., Faria, A.F.G., 2018. Species-genotypic parameters of the CROPGRO Perennial Forage Model: Implications for comparison of three tropical pasture grasses. *Grass and Forage Science*, 73(2), 440–455. <https://doi.org/10.1111/gfs.12329>
- Piffer Cardozo, N., Oliveira Bordonal, R., La Scala Jr, N., 2018. Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 204, 861–871. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>
- Pirmoradian, N., Davatgar, N., 2019. Simulating the effects of climatic fluctuations on rice irrigation water requirement using AquaCrop. *Agricultural Water Management*, 213, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.003>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2009. AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Sandhu, R., Irmak, S., 2019. Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*, 223, 105687. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105687>
- Santos, M.G., Faria, R.T., Palaretti, L.F., Dantas, G.D.F., Dalri, A.B., Lopes, A.D.S., 2016. Calibration and testing of CS-CROPGRO Model for Common Beans. *Engenharia Agrícola*, 36(6), 1239–1249. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n6p1239-1249/2016>
- Scheelbeek, P.F.D., Bird, F.A., Tuomisto, H.L., Green, R., Harris, F.B., Joy, E.J.M., Chalabi, Z., Allen, E., Haines, A., & Dangour, A.D., 2018. Effect of environmental changes on vegetable and legume yields and nutritional quality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(26), 6804–6809. <https://doi.org/10.1073/pnas.1800442115>
- Singh, S., Boote, K.J., Angadi, S.V., Grover, K.K., 2017. Estimating water balance, evapotranspiration and water use efficiency of spring safflower using the CROPGRO model. *Agricultural Water Management*, 185, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.02.015>
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25(3), 189–207. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0064-3>

- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E., 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Takatani, N., Ito, T., Kiba, T., Mori, M., Miyamoto, T., Maeda, S.I., Omata, T., 2014. Effects of High CO₂ on Growth and Metabolism of Arabidopsis Seedlings During Growth with a Constantly Limited Supply of Nitrogen. *Plant and Cell Physiology*, 55(2), 281–292. <https://doi.org/10.1093/pcp/pct186>
- Tooley, B.E., Mallory, E.B., Porter, G.A., Hoogenboom, G., 2021. Predicting the response of a potato-grain production system to climate change for a humid continental climate using DSSAT. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, 108452. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108452>
- 2
- van Bussel, L.G.J., Müller, C., van Keulen, H., Ewert, F., Leffelaar, P.A., 2011. The effect of temporal aggregation of weather input data on crop growth models' results. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(5), 607–619. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.01.007>
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Heng, L.K., Garcia Vila, M., Mejias Moreno, P., 2014. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling & Software*, 62, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>
- Wang, X., Wang, H., Si, Z., Gao, Y., Duan, A., 2020. Modelling responses of cotton growth and yield to pre-planting soil moisture with the CROPGRO-Cotton model for a mulched drip irrigation system in the Tarim Basin. *Agricultural Water Management*, 241(July), 106378. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106378>
- Xu, J., Bai, W., Li, Y., Wang, H., Yang, S., Wei, Z., 2019. Modeling rice development and field water balance using AquaCrop model under drying-wetting cycle condition in eastern China. *Agricultural Water Management*, 213, 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.028>
- Zhao, C., Liu, B., Xiao, L., Hoogenboom, G., Boote, K.J., Kassie, B.T., Pavan, W., Shelia, V., Kim, K.S., Hernandez-Ochoa, I.M., Wallach, D., Porter, C.H., Stockle, C.O., Zhu, Y., Asseng, S., 2019. A SIMPLE crop model. *European Journal of Agronomy*, 104(2), 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.009>