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

Calibração, validação e análise de sensibilidade do modelo AquaCrop (*FAO*) para variedades de cana-de-açúcar

Nathalia Lopes Ribeiro

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

Piracicaba
2020

Nathalia Lopes Ribeiro
Bacharel em Agronomia

**Calibração, validação e análise de sensibilidade do modelo AquaCrop (FAO) para variedades de
cana-de-açúcar**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

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

Piracicaba
2020

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

Ribeiro, Nathalia Lopes

Calibração, validação e análise de sensibilidade do modelo AquaCrop (FAO) para variedades de cana-de-açúcar / Nathalia Lopes Ribeiro - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

98 p.

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

1. *Saccharum* spp. 2. Modelagem de culturas 3. Déficit hídrico 4. Irrigação 5. Simulação I. Título

DEDICATÓRIA

À Raimunda Pereira da Silva (*in memoriam*),
minha avozinha amada,
meu anjo na terra.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e pela benção de poder vivê-la.

À minha família, pelo amor e apoio dedicado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho, por acreditar e confiar no meu trabalho, pela paciência e apoio nos momentos difíceis. Não poderia ter tido orientador melhor.

Aos meus colegas de pós-graduação, pela parceria, apoio e risadas compartilhadas. Em especial ao meu irmão de orientação Alex Nunes, com certeza sem a ajuda dele eu estaria extraindo dados até o fim dos tempos, e a Timóteo Herculino pelo auxílio na análise dos dados e parceria de sempre.

Aos meus amigos, Bruno, Taiane, Larissa, Isabela por me apoiarem incondicionalmente nos momentos bons e ruins, sem vocês minha trajetória teria sido absurdamente solitária e sem graça.

Ao meu namorado, pelo apoio, carinho, amor e dedicação. Você tornou os meus dias mais leves e felizes.

Ao Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira, meu eterno orientador. Agradeço por ter iniciado a construção da minha carreira ao seu lado, tendo-o como um exemplo de professor e pesquisador para sempre me recordar e em quem me espelhar.

A todos os professores do departamento que tanto contribuíram para minha formação. Em especial aos Professores Sergio Nascimento e Paulo Libardi, sempre com uma palavra amiga e aconselhamento.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, sempre solícitos a ajudar quando necessário. Em especial a secretária do programa, Davilmar, pela paciência e dedicação, e ao Sr. Antônio sempre solícito e com sorriso no rosto.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas ESALQ/USP, pela oportunidade de fazer parte desta equipe.

A banca de qualificação, Prof. Sergio Nascimento Duarte, Prof. Jarbas Honório de Miranda e Prof. Fernando Barbosa da Silva pela colaboração e recomendações.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudos.

A minha banca de defesa, Prof. Paulo Sentelhas, Prof. Marconi Batista Teixeira e Prof. Rafael Battisti por todas as recomendações e considerações, foi um imenso privilégio tê-los avaliando meu trabalho.

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta participaram dessa fase da minha vida, ajudando, orientando ou mesmo aconselhando.

– Quem estará nas trincheiras ao teu lado?

– E isso importa?

– Mais do que a própria guerra.

Ernest Hemingway

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	9
1.1. OBJETIVOS	14
1.2. AQUACROP: DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DO MODELO	15
REFERÊNCIAS	22
2. CAPÍTULO 1: CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA VARIEDADES BRASILEIRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR	25
RESUMO	25
ABSTRACT	25
2.1. INTRODUÇÃO	25
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	28
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
2.4. CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS	53
3. CAPÍTULO 2: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS DE CULTURA NO MODELO AQUACROP PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA E AÇÚCAR, E TRANSPIRAÇÃO	58
RESUMO	58
ABSTRACT	58
3.1. INTRODUÇÃO	59
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	60
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
3.4. CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS	71
4. CAPÍTULO 3: APLICAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES REGIÕES DE CULTIVO BRASILEIRAS	74
RESUMO	74
ABSTRACT	74
4.1. INTRODUÇÃO	75
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	76
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.4. CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS	93

RESUMO

Calibração, validação e análise de sensibilidade do modelo AquaCrop para variedades de cana-de-açúcar

A utilização de modelos de simulação do crescimento de cana-de-açúcar será cada vez mais expressiva para avaliar os efeitos de estresse hídrico e otimizar o uso da água em condições limitantes, melhorando a sustentabilidade e a rentabilidade das produções de sequeiro e irrigada. O presente estudo teve por objetivos: i) calibrar e validar o modelo AquaCrop (FAO) e suas variáveis de entrada para a estimativa direta da produtividade das variedades de cana-de-açúcar e avaliar seu desempenho (validação) em comparação com dados observados sob condição de déficit hídrico; ii) realizar análise de sensibilidade com as variáveis: densidade de plantas, coeficiente de crescimento do dossel (CGC), o coeficiente de declínio do dossel (CDC) e o coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{c_{Trx}}$) de modo a identificar as mais impactantes na simulação da produtividade da cultura; iii) realizar simulações da produtividade da cultura por meio do modelo com o intuito de aplicá-lo para diferentes localidades brasileiras e; iv) estimar a lâmina de irrigação necessária em cada localidade estudada. O modelo AquaCrop apresentou-se eficiente na calibração das diferentes cultivares de cana-de-açúcar no tratamento com 100% da reposição hídrica, com altos índices de acurácia, de concordância e eficiência da modelagem ($d, C \geq 0,85$ e $E \geq 0,7$), o que proporcionou erro absoluto médio abaixo de 10 toneladas ha^{-1} . No processo de validação, o modelo simulou adequadamente (d, C e $E \geq 0,7$) as variáveis produtividade de colmos, rendimento bruto de açúcar e produção de biomassa seca das lâminas de 50 e 75% de reposição hídrica após a calibração das variedades na lâmina de 100%. O modelo AquaCrop não simulou precisamente a “*produtividade da água*” das variedades de cana-de-açúcar estudadas, resultando num índice de acurácia abaixo de 0,7, eficiência da modelagem negativa e índice de concordância com valores próximos de zero. O parâmetro mais sensível às variações testadas na análise de sensibilidade do modelo foi o coeficiente de cultura com completa expansão do dossel ($K_{c_{Trx}}$) seguido pelo coeficiente de crescimento do dossel (CGC), logo após o coeficiente de declínio da cultura (CDC) e por fim, a densidade de plantas. A redução do coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{c_{Trx}}$) proporcionou queda de até 50% na produtividade de colmos, rendimento bruto de açúcar e transpiração da cultura, enquanto a variação positiva proporcionou o aumento em até 5% dessas variáveis. Na análise do parâmetro densidade de plantas a diminuição do valor do parâmetro ocasionou a redução de cerca de 3% na produtividade colmos e no rendimento bruto de açúcar e de cerca de 2% na transpiração da cultura. O modelo AquaCrop apresentou bom desempenho na estimativa da produtividade de colmos da cana-de-açúcar em diferentes regiões do Brasil. Houve ligeira superestimativa da produtividade atingível em pelo menos metade das regiões simuladas quando comparada com a produtividade real do IBGE, tendo sido proposto a introdução de um fator varietal de correção da produtividade de colmos para melhorar a estimativa da produtividade desta cultura. As regiões nordestinas foram as mais responsivas à irrigação (>100%) da cana-de-açúcar, em especial nas regiões de Petrolina-PE e em Aracaju-SE, com lâminas médias de irrigação de 1700 mm e 800 mm respectivamente. As regiões de Jataí-GO e Paranaíba-MS também apresentaram incrementos interessantes de produtividade (>80%) para lâminas de irrigação entre 500 e 600 mm.

Palavras-chave: *Saccharum* spp, Modelagem de culturas, Déficit hídrico, Irrigação, Simulação

ABSTRACT

Calibration, validation and sensitivity analysis of the AquaCrop model for sugarcane varieties

Plant growth simulation models are being increasingly used to assess the effects of water stress on sugarcane production (yield gap) and to optimize water use under limiting conditions, to improve the sustainability and profitability of rainfed and irrigated production. Thus, the objectives of this study were: i) to calibrate and validate the AquaCrop model and its input variables for direct estimation of the productivity of sugarcane varieties and evaluate its performance in comparison with experimental observed data; ii) to perform sensitivity analysis with the variables : plant density, canopy growth coefficient (CGC), canopy decline coefficient (CDC) and canopy full expansion coefficient (KcTrx) in order to identify the variables most impact on the simulation of the crop yield; iii) perform crop yield simulations using the model in order to apply it to different Brazilian locations and; iv) estimate the required irrigation blade in each location. The AquaCrop model was efficient in the calibration of the different sugarcane cultivars in the treatment with 100% water replacement, with high rates of accuracy, agreement and modeling efficiency ($d, C \geq 0.85$ and $E \geq 0.7$), which provided average absolute error below 10 tons ha⁻¹. In the validation process AquaCrop model adequately simulated (d, C and $E \geq 0.7$) the variables stalk productivity, raw sugar yield and dry biomass production of the 50 and 75% water replacement depths after calibration of the varieties on the 100% depth. AquaCrop model did not adequately estimate the water productivity of the sugarcane varieties studied obtaining low statistical indexes, such as accuracy index below 0.7 and negative modeling efficiency, the concordance index showed values close to zero. The most sensitive parameter to the variations tested was the crop coefficient with complete canopy expansion (KcTrx) followed by the canopy growth coefficient (CGC), right after the crop decline coefficient (CDC) and finally, the plant density. The reduction of the canopy growth coefficient (KcTrx) provided up to 50% drop in stalk productivity, raw sugar yield and crop perspiration, while the positive variation provided up to 5% increase in these variables. In the analysis of the density parameter of plants the decrease in the value of the parameter caused a reduction of about 3% in the yield of stalks and raw sugar yield and about 2% in the perspiration of the crop. The AquaCrop model showed good performance in estimating sugarcane stalks productivity in different regions of Brazil. There was an slight difference of the attainable productivity in at least half of the regions studied compared to the real productivity, so the introduction of a correction factor was proposed for a better estimative of stalks real productivity. The northeastern regions of Petrolina-PE and Aracaju-SE were the most responsive to irrigation technology (> 100%), requiring irrigation depths of 1700 and 800 mm respectively. Jataí-GO and Paranaíba-MS regions also presented an interesting irrigation response (> 80%) for irrigation depths between 500 and 600 mm.

Keywords: *Saccharum* spp., Crop modeling, Water deficit, Irrigation, Simulation

1. INTRODUÇÃO

Como maior produtor mundial de cana-de-açúcar e apresentando pouco mais de um terço do total de área cultivada no mundo, o Brasil é um dos países de maior destaque dos setores de açúcar e de sucroenergia. O país deverá produzir aproximadamente 643 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra 2020/2021 o que lhe confere a posição de segundo maior produtor mundial de açúcar e de etanol (CEPEA, 2020).

Segundo Carvalho (2009) a cultura da cana-de-açúcar é um dos destaques do agronegócio brasileiro, tendo a discussão em torno das mudanças climáticas globais, variações nos preços do petróleo e a chegada dos veículos biocombustíveis tipo “flex” como principais fatores que impulsionaram a expansão desta cultura nas últimas décadas. Entretanto, de acordo com Job (2010), ainda existem oportunidades de crescimento da área total cultivada, visto que o açúcar é cada vez mais requerido por países em desenvolvimento, devido a ampliação do poder de compra e o consumo de alimentos processados.

A necessidade do incremento na produção das principais culturas tem gerado elevada pressão quanto a demanda de água na agricultura moderna. A precipitação não tem sido suficiente para suprir a necessidade hídrica da cultura da cana-de-açúcar na maioria das áreas tradicionais de produção, sendo necessário utilizar-se da irrigação para garantia de colheita próximas à produtividade potencial (ALENCAR, 2014). O cultivo da cana-de-açúcar pode ser observado em diversas regiões brasileiras e a cada safra há a expansão para áreas não tradicionais, muitas destas com características de períodos com intenso déficit hídrico.

O uso de modelos matemáticos de simulação do crescimento e desenvolvimento de plantas baseados em processos que simulem o comportamento da cana-de-açúcar podem ser uma ferramenta útil para: a) estudar e desenvolver estratégias de irrigação por déficit em áreas com baixa disponibilidade hídrica, b) estimar a necessidade de irrigação da cultura ao longo do ciclo e c) fornecer métodos para quantificação da eficiência do uso da água neste cultivo (BLUM, 2009; GEERTS & RAES, 2009).

Os modelos de simulação das culturas agrícolas são formados por um conjunto de algoritmos organizados, que descrevem os processos físicos e fisiológicos, utilizados para estimar o crescimento, desenvolvimento e produtividade de uma cultura e auxiliar na interpretação de dados experimentais, fornecendo possíveis resultados, além de funcionarem como ferramentas de pesquisa para o conhecimento da interação entre as plantas e o ambiente, permitindo assim,

melhorar o entendimento dos processos físicos, químicos e biológicos dessa interação (NASSIF, 2010). Desta forma, é necessário promover o equilíbrio entre simplicidade e exatidão dos modelos para garantir sua ampla aplicação.

Os principais modelos de simulação da cultura da cana-de-açúcar em uso em todo mundo são o modelo australiano, APSIM-Sugarcane (KEATING et al., 1999) e o modelo sul africano DSSAT/CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991). Estes dois modelos, embora desenvolvidos independentemente, tem origens e abordagens semelhantes para simular a fenologia, expansão do dossel, interceptação da radiação, partição da biomassa acima do solo e relações planta-nitrogênio (LISSON et al., 2005).

O APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) inclui uma coleção de módulos que podem ser montados de forma específica pelo usuário. Foi desenvolvido para simular os processos biofísicos em sistemas de cultivo, principalmente quando existe um interesse em resultados econômicos e ecológicos de práticas de gerenciamento defronte aos riscos climáticos (KEATING et al., 2003). O APSIM-Sugarcane representa um modelo para cana-de-açúcar que segue o modelo de outras culturas, mas suas características específicas são definidas em uma tabela de variáveis de entrada (O'LEARY, 2000). O modelo foi concebido para simular a produção de sacarose, biomassa vegetal, uso da água, captação de nitrogênio pela cultura e para partição de carbono e nitrogênio para um campo de cana-de-açúcar uniforme sendo o único modelo que simula as diferenças da cana-planta e cana-soca e teor de água no colmo (LISSON et al., 2005).

O Sistema de Suporte à decisão e Transferência de Agrotecnologia (DSSAT do inglês *Decision Support System Agrotechnology Transfer*) simula o crescimento e desenvolvimento das culturas ao longo do tempo, levando em conta o clima, o solo, o manejo e aspectos genéticos da cultura. O DSSAT contém uma coleção de programas independentes para a organização dos dados de clima, solo, observações de campo, condições experimentais e informações genotípicas (JONES et al., 2003). O modelo DSSAT/CANEGRO foi desenvolvido na África do Sul com intuito de modelar os processos fisiológicos mais relevantes a indústria açucareira sul-africana. Singels et al., (2008) apresentam as principais características do DSSAT/CANEGRO, baseando-se em descrições fisiológicas do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar incluindo a fenologia, desenvolvimento do dossel, perfilhamento, acúmulo e particionamento de biomassa, crescimento de raízes, estresse hídrico e acamamento da cultura.

O AquaCrop, modelo de referência adotado pela FAO atualmente (Boletim 66, STEDUTO et al., 2012), foi desenvolvido por Raes et al. (2009) e Steduto et al. (2009), visando equilibrar

precisão, robustez e simplicidade, na estimativa de respostas das culturas à necessidade de água. O modelo requer, relativamente, um pequeno número de parâmetros de entrada, quando comparado com outros modelos mais tradicionais (DSSAT e APSIM). Sendo a maioria destes parâmetros podendo ser facilmente obtidos no campo. Isto ocorre porque o modelo foi desenvolvido para ser mundialmente utilizado.

O AquaCrop prediz a produtividade das culturas, a necessidade de água e a eficiência do uso da água sob condições limitantes de déficit hídrico (RAES et al., 2009). Este modelo foi parametrizado e validado para as culturas do milho (HSIAO et al, 2009, HENG et al., 2009), algodão (GARCIA-VIA et al., 2009), girassol (TODOROVIC et al., 2009), trigo (ANDARZIAN et al., 2011), e soja (BATTISTI, 2016) sob diferentes condições ambientais e para cana-de-açúcar (ALENCAR, 2014). Todos esses trabalhos têm mostrado que o modelo apresenta precisão e acurácia adequadas aos objetivos para os quais foi desenvolvido, quais sejam: avaliar a produção de biomassa, a produtividade, a eficiência de uso da água, assim como balanço da água no solo sob condições de sequeiro, irrigação po déficit e irrigação plena.

Segundo Hsiao et al. (2009), o modelo AquaCrop parte da premissa que os parâmetros são conservativos, ou seja, são aplicáveis à uma ampla gama de condições, e não são específicos para determinada cultivar, ressaltando que há certamente algumas diferenças entre cultivares. Outros parâmetros são específicos de cada cultivar e do manejo da cultura. O modelo AquaCrop necessita de 33 parâmetros relacionados a cultura, porém alguns desses parâmetros são de simples obtenção, sendo que alguns estão relacionados ao manejo da cultura. Como a FAO é um organismo internacional, procurou-se um modelo que fosse simples após a parametrização, para sua aplicação mundial

O AquaCrop tem uma estrutura que vai além do contínuo solo-planta-atmosfera, consistindo em quatro componentes: atmosfera, cultura, solo e manejo. O modelo inclui o solo, com o balanço de água no solo, a planta, com o seu crescimento, desenvolvimento e processos de produção; e a atmosfera, com o seu regime térmico, as chuvas, a demanda evaporativa exercida pela atmosfera e a concentração de dióxido de carbono. No item manejo, o modelo enfatiza a irrigação, mas também considera a fertilidade do solo, principalmente nitrogênio e os aspectos relacionados à água, tais como disponibilidade da mesma e presença de cobertura vegetal sobre o terreno, além de como estes fatores afetam a disponibilidades hídrica, desenvolvimento da cultura e do crescimento. As relações funcionais entre os diferentes componentes do modelo são mostradas no fluxograma da Figura 1.1.

Figura 1.1. Fluxograma do modelo AquaCrop, indicando os principais componentes do contínuo solo-planta-atmosfera e os parâmetros da fenologia de transporte, cobertura do solo pelo dossel, transpiração, produção de biomassa e produção final (I - irrigação; T_n - temperatura mín do ar; T_x - temperatura máx do ar; ET_0 - evapotranspiração de referência; E - evaporação do solo; Tr - transpiração da cultura; g_s - condutância estomática; WP - produtividade da água; HI - índice de colheita; CO_2 - concentração de dióxido de carbono atmosférico; ES - escoamento superficial. (1), (2), (3), (4) - diferentes funções de resposta ao estresse de água). As linhas contínuas indicam ligações diretas entre as variáveis e os processos. As linhas tracejadas indicam retroalimentação. Fonte: Steduto et al. (2009)

De forma geral, no processo de modelagem, o sistema é analisado, equações matemáticas são descritas e um programa de computador é desenvolvido na expectativa de representar adequadamente o comportamento do sistema (SCORZA JÚNIOR, 2006). O processo de modelagem inclui diversos passos, que se iniciam pelo estabelecimento dos objetivos e limites do modelo, e passam pela escolha de formas matemáticas de representação e escolha de conjuntos de dados apropriados para sua parametrização.

A etapa de parametrização, também chamada de etapa de calibração é um dos processos essenciais da modelagem matemática e da identificação de sistemas (KOSTINA, 2004), já que o estabelecimento de valores adequados para os parâmetros é um dos requisitos básicos para que o comportamento do sistema modelado possa ser realisticamente representado (BARIONI et al., 2006).

O ajuste de parâmetros, normalmente, se faz por meio da comparação das estimativas do modelo com dados quantitativos, observados no sistema a ser representado. Essas

observações experimentais podem também estar sujeitas a erros em função das metodologias e equipamentos (sensores) utilizados (WALLACH et al., 2001).

Os modelos normalmente contêm grande número de parâmetros, sendo cada parâmetro identificado pelo fato de ter determinado valor fixo para todas as localidades e/ou anos, gerando acúmulo de erros por parte dos mesmos. O acúmulo de erros nos diferentes parâmetros, além dos erros nas equações do modelo, pode levar a resultados muito diferentes em relação aos dados medidos em campo. A solução para este problema é a parametrização do modelo, que consiste na estimativa de alguns ou de todos os parâmetros do modelo para melhoria do ajuste entre os dados modelados e medidos em campo (WALLACH et al., 2001).

O modelo de simulação AquaCrop não possui nenhuma ferramenta embutida a nível de software para auxílio da parametrização do modelo idealizado, assim como é possível usar as ferramentas Glue Coefficient Estimator (GLUE) e o Genotype Coefficient Estimator (GenCalc) nos modelos DSSAT e APSIM para auxílio na calibração dos dados.

Frequentemente o primeiro passo para ajustar os parâmetros é atribuir valores nominais derivados da combinação de aproximação, teoria, conhecimento adquirido e aleatoriedade (STUCKMAN et al., 1991) e comparar os resultados com as observações do sistema real, na tentativa de aprimorar a acurácia do modelo.

Lisson et al. (2000) avaliaram a performance de sistemas de modelagem de cana-de-açúcar concluindo que as dificuldades na parametrização de modelos muitas vezes surgem devido a deficiências na qualidade e extensão dos dados medidos, e salientaram que as variáveis de saída do modelo utilizado diferiram significativamente conforme houve mudanças em determinados parâmetros.

O procedimento de validação envolve o processo de simulações com o modelo e comparar os dados observados no trabalho de campo, para a área e a condição de interesse, com os dados gerados pelo modelo (SANDS & LANDSBERG, 2002; LANDSBERG et al., 2003; BUGG et al., 2006). Segundo Rykiel Jr (1996), a validação é a demonstração de que um modelo, dentro do seu domínio de aplicabilidade, possui um espectro satisfatório de precisão e acurácia, compatível com a aplicação prevista para o modelo.

Para os modelos de crescimento, essa comparação testa a habilidade do modelo em simular tanto flutuações a curto prazo no crescimento quanto em produzir corretas estimativas no final do ciclo de crescimento. Deve-se constatar que esta demonstração indica que o modelo é aceitável para uso, o que não quer dizer de forma nenhuma que ele contenha alguma verdade

absoluta, nem mesmo que seja o melhor modelo disponível. Colocando em termos operacionais, esta demonstração envolve a comparação dos dados simulados com aqueles obtidos pela observação experimental ou medidos no sistema real.

Desta maneira, buscou-se implementar o modelo AquaCrop, calibrado e validado, à cultura da cana-de-açúcar, em virtude da sua relevância na agricultura brasileira, vislumbrando os futuros impactos que decorrerão do aumento das áreas irrigadas e, conseqüentemente, do aumento do consumo de água por esta cultura.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos gerais

Realizar a calibração, validação, análise de sensibilidade e avaliação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar, de modo a torná-lo aplicável na avaliação da produtividade desta cultura em diferentes regiões do Brasil.

1.1.2. Objetivos Específicos

- (i) Calibrar e validar o modelo AquaCrop e suas variáveis de entrada para a estimativa direta da produção de 8 variedades de cana-de-açúcar e avaliar seu desempenho em comparação com dados observados;
- (ii) Realizar análise de sensibilidade com as variáveis: densidade de plantas, coeficiente de crescimento do dossel (CGC), o coeficiente de declínio do dossel (CDC) e o coeficiente de transpiração máxima da cultura ($K_{c_{Trx}}$) com intuito de obter a reposta de qual pode mais impactar na simulação a produção da cultura;
- (iii) Realizar simulações da produtividade da cultura através do AquaCrop com intuito de avaliar a aptidão do modelo em ser aplicado para diferentes localidades brasileiras;
- (iv) Estimar a lâmina de irrigação necessária para atingir produtividade máxima em cada localidade.

1.2. AquaCrop: Descrição dos principais componentes do modelo

São descritos a seguir os principais componentes utilizados pelo modelo e como eles são interpretados e/ou calculados.

➤ Atmosfera

O componente atmosférico que interfere na cultura é descrito no componente clima do modelo AquaCrop, sendo 5 os componentes meteorológicos necessários: médias diárias de temperaturas máxima e mínima do ar, precipitação pluviométrica diária, demanda diária evaporativa da atmosfera (ET_0) e a concentração de CO_2 . Enquanto os 4 primeiros são obtidos ou derivados a partir de dados de estações agrometeorológicas, a concentração de CO_2 é obtida a partir de registros da concentração média de CO_2 na atmosfera obtidas junto ao experimento conduzido em campo ou medido pelo observatório de Mauna Loa no Havaí. O nível de CO_2 na atmosfera pode ser alterado como input do modelo para diferentes cenários de mudanças climáticas.

Quando os dados meteorológicos diários não estiverem disponíveis, os registros de 10 dias ou mensais serão transformados pelo AquaCrop em valores diários. O modelo tem uma sub-rotina para estimar precipitação efetiva a partir de dados de 10 dias ou mensais, através de duas opções; o método USDA Soil Conservation Service (SCS, 1993), ou como determinada porcentagem do total de precipitação.

Como ilustrado na Figura 1, a temperatura do ar influencia no desenvolvimento das culturas (fenologia, produção de biomassa e polinização), a chuva e a ET são entradas para o balanço hídrico na zona radicular do solo, e a concentração de CO_2 da atmosfera influencia na taxa de crescimento do dossel da cultura e na produtividade da água (WP).

➤ Cultura

A parte do modelo referente à cultura tem 5 componentes principais: fenologia, cobertura do solo pelo dossel (CC), profundidade de enraizamento, produção de biomassa e produção alcançável. A cultura cresce e se desenvolve através dos estádios do seu ciclo de expansão, manutenção e senescência do dossel, aprofundando seu sistema radicular, crescendo e acumulando biomassa.

➤ **Estresse hídrico**

O estresse hídrico apresenta grande impacto na produtividade das culturas, dependendo de sua intensidade e duração. Desta maneira, o modelo distingue quatro efeitos do estresse hídrico: sobre o crescimento foliar, na condutância estomática, na senescência do dossel e no índice de colheita (HI). Com exceção do HI, esses efeitos se manifestam por meio de seus coeficientes de estresse individuais K_s , os quais definem a intensidade relativa de seu efeito na produtividade (STEDUTO et al., 2009).

Em essência, K_s é o parâmetro modificador do alvo do modelo. Acima do limite superior do conteúdo de água no solo, o estresse hídrico não é considerado, então, K_s é "1". Abaixo do limite inferior, o efeito do estresse é pleno e o valor de K_s é "0". Os limites superior e inferior são expressos como a fração (p) da quantidade total de água no solo disponível (TAW) entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.

A relação de K_s versus " p " geralmente não é linear devido a aclimação das plantas e a adaptação ao estresse, e devido a não-linearidade do potencial matricial versus a relação do conteúdo de água no solo.

➤ **Crescimento do dossel**

Uma das principais características do AquaCrop que o distingue dos demais modelos existentes é a expressão de superfície de cultivo para transpiração (portanto, para a produção de biomassa) que utiliza a fração da cobertura do solo pelo dossel verde (Canopy Cover (CC)) e não o índice de área foliar (IAF). O modelo não simula as medidas biométrica como diâmetro e altura do colmo, nem o processo de perfilhamento da cana-de-açúcar.

Uma característica importante das equações desenvolvidas para simular a cobertura do solo pelo dossel das plantas (CC_0) é que estas representam diretamente os efeitos da densidade de plantas, dentro da faixa de densidade comumente encontrada na prática.

Segundo Hsiao (1982), quando a cobertura do dossel é escassa, a taxa de crescimento do dossel é dependente do tamanho do dossel existente para a fotossíntese, e segue uma curva cinética de primeira ordem. A cobertura inicial do solo (CC_0) é importante na simulação porque este valor é necessário para o início do processo de crescimento do dossel. Este parâmetro é obtido pela densidade de plantas multiplicada pela área foliar de uma plântula, quando ocorre a emergência de 90% das plântulas. A expansão do dossel, da emergência até o desenvolvimento integral da cultura, segue uma curva do tipo sigmóide construída com função exponencial até

metade da cobertura do solo (CC) e como função de decaimento exponencial para a outra metade da curva (Figura 1.2).

Figura 1.2. Representação esquemática do desenvolvimento do dossel durante o crescimento exponencial e as fases de decaimento exponencial. CC_0 e CC_x são a cobertura do dossel inicial e máxima, respectivamente. Fonte: Steduto et al. (2009)

Em princípio, o crescimento exponencial do dossel é esperado depois que as plântulas da cultura se tornam autotróficas e não antes. Para a segunda metade da curva de crescimento, as plantas começam a sombrear mais o solo, assim o crescimento do dossel já não é proporcional ao tamanho do dossel existente. Sendo, a segunda metade da curva segue um decaimento exponencial.

Matematicamente a cobertura máxima ocorre quando o tempo tende ao infinito ($t \Rightarrow \infty$). Durante a fase de desenvolvimento, o crescimento do dossel pode facilmente ser modulado pelo estresse hídrico, já que o crescimento foliar é muito sensível ao estresse hídrico e pode ser retardado quando apenas pequena fração da água disponível está esgotada no solo, isto é, o limite superior para o coeficiente de estresse hídrico para o crescimento expansivo (Ks_{exp}) está abaixo de um valor “p”.

Como Ks_{exp} varia entre “1 e 0”, o crescimento do dossel começa a diminuir abaixo da taxa máxima quando a depleção da água no solo fica abaixo do limite superior, e cessa completamente quando a depleção atinge o limite inferior.

Após o seu pleno desenvolvimento, o dossel pode ter uma duração variável antes de entrar na fase de senescência. Uma vez que a senescência começa no final do estágio de maturação, a cobertura do solo pela planta (CC) entra em fase de declínio.

A senescência do dossel pode ser acelerada pelo estresse hídrico a qualquer momento durante o ciclo da cultura, desde que o estresse seja intenso o suficiente. Este processo é simulado através do ajuste do coeficiente de declínio do dossel (CDC) e do coeficiente de estresse hídrico para senescência (K_{Sen}).

➤ Biomassa e produção

A cobertura do solo pela cultura representa a fonte de transpiração, que é transformada em certa quantidade proporcional de biomassa, produzida através da produtividade da água (WP). Uma vez que a biomassa é calculada usando a equação 1, o rendimento da cultura é, então, obtido por meio da multiplicação da biomassa pelo índice de colheita (HI), equação 2.

$$B = WP \times \sum Tr \quad (1)$$

e

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

No AquaCrop, a normalização da WP para o clima é baseada na demanda evaporativa da atmosfera definida pela ETo e pela concentração de CO_2 da atmosfera; o objetivo desta metodologia é utilizar o conceito da produtividade de água normalizada (WP^*), de tal modo que o modelo possa ser aplicável à diferentes condições climáticas e épocas do ano, incluindo cenários climáticos futuros de CO_2 . A equação para calcular a produtividade da água normalizada (WP^*) é dada pela equação 3

$$WP^* = \left[\frac{B}{\sum \frac{Tr}{ET_0}} \right]_{[CO_2]} \quad (3)$$

O somatório assume intervalos de tempo sequenciais abrangendo o período em que a biomassa (B) é produzida. O índice $[CO_2]$ fora do colchete indica que a normalização é para determinado ano, com a sua específica concentração média de CO_2 anual. A equação para ajustar a WP^* variando com a concentração de CO_2 é descrita em Raes et al. (2009).

Embora o AquaCrop use o índice de colheita (HI) como parâmetro chave, ele não calcula o particionamento da biomassa em vários órgãos (por exemplo, folhas, raízes, etc). Esta escolha evita lidar com a complexidade e as incertezas associadas aos processos de particionamento, que são os mais difíceis de se modelar em fisiologia vegetal. No AquaCrop, a referência do índice de colheita (HI) deve ser fornecida para cada cultura e cultivar quando tal se justifique.

O déficit hídrico pode afetar o valor do índice de colheita final. A relação entre parte aérea e a raiz é mantida por procedimentos empíricos que são baseados no equilíbrio funcional entre o desenvolvimento do dossel e o crescimento das raízes (RAES et al., 2009).

➤ **Transpiração**

A medida que o dossel da cultura se desenvolve, a transpiração (Tr) é simulada separada da evaporação do solo (E), porque a transpiração é a base para a produção de biomassa. Assim, a transpiração (Tr) é basicamente proporcional à percentagem de cobertura do solo (CC) quando não há o fechamento dos estômatos induzido por algum estresse. Um ajuste é necessário para considerar os efeitos da microadvecção nas entrelinhas e devido à cobertura parcial do solo pela cultura

O ajuste na percentagem de cobertura do solo pelo dossel (CC^*) é usado para calcular a transpiração. Na ausência de estresse hídrico, a transpiração no AquaCrop é proporcional à CC^* .

Após o tempo necessário para atingir a cobertura máxima do dossel e antes do início da senescência, o dossel envelhece lenta e progressivamente e sofre pequena redução na transpiração e na capacidade fotossintética. Este processo é simulado por meio da aplicação de um fator de ajuste (f_{age}) que diminui o coeficiente de transpiração máxima da cultura (K_{cTrx}), por uma fração constante (por exemplo, $0,3\% \text{ dia}^{-1}$), resultando, assim uma redução no valor do coeficiente de cultura ajustado (K_{cTrx}).

➤ **Solo e sistema radicular**

A dinâmica do sistema radicular no AquaCrop é simulada através da profundidade máxima de enraizamento e seu padrão de extração de água do solo. A profundidade máxima de enraizamento é definida como a profundidade onde a absorção de água pelas raízes está ocorrendo, apesar de que, algumas culturas podem ter algumas raízes além dessa profundidade.

A extração de água pelas raízes segue o padrão de 40%, 30%, 20%, e 10% para cada $\frac{1}{4}$ da profundidade máxima das raízes, começando com o quarto superior, e pode ser estabelecido

pelo usuário nos casos em que diferentes padrões são inferidos, a partir de limitações físicas ou químicas do solo. O modelo realiza o balanço de água no solo, que inclui os processos de infiltração, escoamento superficial, drenagem dentro da zona radicular, percolação profunda, absorção pelas plantas, capilaridade, evaporação e transpiração.

Um balanço hídrico diário mantém o controle dos fluxos de entrada e saída de água nos limites da zona radicular e da água retida dentro dela. A dinâmica da profundidade efetiva de enraizamento do início do plantio até alcançar a profundidade máxima.

Figura 1.3. Representação esquemática do enraizamento profundo ao longo do tempo.
Fonte: Steduto et al. (2009)

Sabendo que o crescimento da raiz é mais resistente ao estresse hídrico do que o crescimento foliar (BRADFORD & HSIAO, 1982; HSIAO & XU, 2000), a expansão do dossel é reduzida à medida que a depleção da água no solo na zona radicular aumenta.

Uma representação esquemática da dinâmica da resposta da cultura ao estresse hídrico, como simulado pelo AquaCrop, é dada na Figura 4.

Figura 1.4. Representação esquemática da resposta da cultura ao estresse hídrico, com indicação (setas pontilhadas) dos processos (a - e) afetada pelo estresse hídrico. CC é a cobertura do dossel simulado, CC_{pot} cobertura do dossel potencial, K_{s_{sto}} coeficiente de estresse hídrico para o fechamento dos estômatos, K_{c,Tr} o coeficiente de transpiração da cultura, ET_o a evapotranspiração de referência, WP* a produtividade da água normalizada e HI o índice de colheita. Fonte: Steduto et al. (2012)

➤ Manejo

O componente de manejo do AquaCrop tem duas categorias principais: uma sobre o manejo no campo mais geral e o manejo da água. Na categoria campo, pode-se selecionar ou definir um nível de fertilidade do solo, restos de cultura sobre a superfície do solo, responsável por reduzir a evaporação do solo, e o uso de práticas conservacionistas para controle do escoamento superficial.

O modelo AquaCrop não realiza o balanço de nutrientes, em vez disso, a parametrização é feita para vários diferentes níveis de fertilidade, tais como: sem restrição de fertilidade, média fertilidade e alta restrição da fertilidade. Estes níveis de fertilidade afetam CGC, CC, o início da senescência do dossel e taxa de declínio da cobertura do solo pelo dossel e a produtividade da água (WP).

Na categoria manejo de água, pode-se selecionar cultura de sequeiro (sem irrigação) ou irrigada. No item irrigação, é possível selecionar o método de aplicação (aspersão, localizada ou superfície). O usuário pode definir sua própria programação, com base na lâmina d'água a ser aplicada, utilizando o critério de tempo ou deixar que o modelo o realize automaticamente, baseado num turno de rega fixo ou variável, na lâmina fixa ou fixando a umidade da água do solo em que será realizada a irrigação.

Referências

- ANDARZIAN, B.; BANNAYAN, M.; STEDUTO, P.; MAZRAEH, H.; BARATI, M.E.; BARATI, M.A.; RAHNAMA, A. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran, **Agricultural Water Management**, v.100, n.1, pp.1-8, 2011.
- BARIONI, L. G.; OLTJEN, J. W.; SAINZ, R. D. Iterative development, evaluation and optimal parameter estimation of a dynamic simulation model: a case study. In: KEBREAB, E.; DIJKSTRA, J.; BANNINK, A.; GERRITS, W. J. J.; FRANCE, J. (Ed.). **Nutrient digestion and utilization in farm animals: modelling approaches**. New York: CABI Publishing, 2006. p. 251-256.
- BATTISTI, R. **Calibration, uncertainties and use of soybean crop simulation models for evaluating strategies to mitigate the effects of climate change in Southern Brazil**. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 188p. 2016.
- BLUM, F. A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. **Field Crops Res.** v.112, pp.119–123. 2009.
- BUGG, A. L.; LANDSBERG, J.J.; LAUGHLIN, G.; TICKLE, P.; FRAKES, I. Application of three modelling approaches to simulating tree growth in central NSW, Australia. **Environmental Modelling & Software** 21: 310–319, 2006.
- CARVALHO, G. L. **Eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006**. Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 120p. 2009.
- CEPEA** - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Agromensal: Açúcar-Janeiro 2020. CEPEA-ESALQ/USP. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/revista/pdf/0945989001580923117.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2020
- GARCIA-VIA, M.; FERERES, E.; MATEOS, L.; ORGAZ, F.; STEDUTO, P. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. **Agronomy Journal**. v.101, pp.477–487, 2009.
- GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**. 96, 1275–1284. 2009.
- INMAN-BAMBER, N. G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant Soil**, Mount Edgecombe, v. 8, p. 93-99, 1991.
- JOB, L. Do açúcar dos antigos engenhos às modernas usinas. **Revista Cana Mix**, n.29, p.70-72, 2010.
- JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3/4, p. 235-265, 2003.

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

KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 61, p. 253-271, 1999.

KOSTINA, E. Robust parameter estimation in dynamic systems. **Optimization and Engineering**, v. 5, p. 461-484, 2004.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. & COOPS, N.C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. **Forest Ecology and Management**, n.172, p.199-214, 2003.

LISSON, S. N.; INMAN-BAMBER, N. G.; ROBERTSON, M. J.; KEATING, B. A. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, p. 31-48, 2000.

NASSIF, D.S.P. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**. 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

O'LEARY, G.J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, p. 97-111, 2000.

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

RYKIEL, E. J. Jr. Testing ecological models: the meaning of validation. **Ecological Modelling**, n. 90, pp. 229-244, 1996.

SANDS, P.J.; LANDSBERG, J.J. Parameterization of 3-PG for plantation grown Eucalyptus globulus. **Forest Ecology and Management**, n163, pp.273- 292, 2002.

SINGELS, A.; JONES, M. R VAN DER BERG, M. **DSSAT v.4.5 DSSAT/CANEGRO**: International Consortium Plant Module; scientific documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling, South African Sugarcane Research Institute, 34 p. 2008.

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

STEDUTO, P.; RAES, D. HSIAO, T.C.; FERERES, E. AquaCrop: concepts, rationale and operation. In: **Crop Yield Response to Water**. Irrigation & Drainage paper vol. 66FAO, Rome, 2012.

STUCKMAN, B.; EVANS, G.; MOLLAGHASEMI, M. Comparison of global search methods for design optimization using simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 23, 1991, Phoenix. **Proceedings**. Washington: IEEE Computer Society, 1991. p. 937-944.

TODOROVIC, M., ALBRIZIO, R., ZIVOTIC, L., ABI SAAB, M., STWCKLE, C., STEDUTO, P. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. **c. v. 101**, pp. 509–521, 2009.

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

2. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA VARIEDADES BRASILEIRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

A estimativa da produtividade da cultura da cana-de-açúcar é bastante complexa e envolve inúmeras variáveis do sistema de produção, porém ela é necessária para o planejamento de precisão e as tomadas de decisões no setor sucroenergético. Uma das formas de estimar a produtividade da cana-de-açúcar é por meio de modelos de simulação devidamente calibrados para a realidade local. Assim o objetivo deste estudo foi calibrar o modelo AquaCrop e suas variáveis de entrada para a estimativa direta da produção das variedades CTC 15, CTC 17, RB 867515, RB 92579, RB 931011, RB 966928, IAC 955000 e a Sul-africana NCo 376 e avaliar seu desempenho em comparação com dados observados em experimento controlado. O AquaCrop apresentou bom desempenho na calibração das diferentes cultivares de cana-de-açúcar (d , $C \geq 0,85$ e $E \geq 0,7$) no tratamento com 100% da reposição hídrica. Os índices estatísticos tiveram valores compatíveis ou superiores aos resultados de outros autores que trabalharam com AquaCrop ou com outros modelos. O modelo simulou adequadamente (d , C e $E \geq 0,7$) as variáveis produtividade de colmos, rendimento bruto de açúcar e produção de biomassa seca das lâminas de 50 e 75% de reposição hídrica após a calibração das variedades na lâmina de 100%. O modelo AquaCrop só não estimou adequadamente a produtividade da água das variedades de cana-de-açúcar analisadas no experimento obtendo índices estatísticos baixos, como índice de acurácia abaixo de 0,7 e eficiência da modelagem negativa.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Produtividade; Manejo; Modelagem agrícola

ABSTRACT

Estimating the productivity of sugarcane crops is quite complex and involves countless variables in the production system, but it is extremely necessary to facilitate planning and decision making in the sugar-energy sector. One way of estimating sugarcane productivity is through simulation models properly calibrated to local reality. Thus, the objective of this study was to calibrate the AquaCrop model and its input variables for the direct estimation of the production of the varieties CTC 15, CTC 17, RB 867515, RB 92579, RB 931011, RB 966928, IAC 955000 and the South African NCo 376 and to evaluate its performance in comparison with data observed in controlled experiment. AquaCrop performed well in calibrating the different sugarcane cultivars (d , $C \geq 0.85$ and $E \geq 0.7$) in the treatment with 100% water replacement. The statistical indices had values compatible or superior to the results of other authors who worked with AquaCrop or with other models. The model adequately simulated (d , C and $E \geq 0.7$) the variables stalk productivity, raw sugar yield and dry biomass production of the 50 and 75% water replacement slides after calibration of the varieties in the 100% slide. The AquaCrop model did not adequately estimate the water productivity of the studied sugarcane varieties obtaining low statistical indexes, such as accuracy index below 0.7 and negative modeling efficiency.

Keywords: *Saccharum* spp.; Productivity; Management; Agricultural modeling

2.1. Introdução

Os modelos de simulação do crescimento de culturas agrícolas procuram estimar a resposta das plantas frente às interações com os fatores edafoclimáticos, podendo contribuir com o desenvolvimento de estratégias de manejo das culturas, monitoramento de colheita e previsões de safras e estimativa do rendimento das culturas para fins de análise econômica

de projetos (ANDRADE et al., 2009; ASSENG et al., 2013; MARIN et al., 2011; MARTÍN; OLESEN; PORTER, 2014).

Os modelos utilizados para simular uma cultura em campo são aproximações da realidade, servindo para orientar na tomada de decisões no campo (LIMA FILHO; COELHO FILHO; HEINEMANN, 2013). Entretanto, a utilização de modelos de crescimento de culturas em condições diferentes daquelas do local onde foram desenvolvidos é limitada, necessitando de testes e adaptações em razão das diferenças edafoclimáticas do local de estudo e características genéticas da planta utilizada (NASSIF et al., 2012). Assim, para que os resultados do estudo sejam confiáveis todos os modelos devem ser calibrados e validados para as condições de interesse (TIMSINA; HUMPHREYS, 2006).

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

O AquaCrop é um modelo de crescimento de cultura, desenvolvido sob orientação da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), que utiliza a água como fator determinante para a simulação da produtividade da cultura (HSIAO et al., 2009). O AquaCrop difere de outros modelos de simulação de produção agrícola como o DSSAT-CSM, APSIM e CROPSYST por procurar estabelecer o equilíbrio entre precisão, simplicidade e robustez. O AquaCrop é um modelo de simulação que exige relativamente poucos parâmetros e dados de entrada comparado ao DSSAT e ao APSIM (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009).

O AquaCrop possui uma interface modular fácil de usar que auxilia na entrada de dados de gerenciamento de clima, solo, fenologia, planta e colheita (RAES et al., 2017). Além disso, sua interface permite definir várias funções internas necessárias para simular mudanças no solo e na planta devido à disponibilidade de água durante o ciclo da colheita. Dados climáticos, de solo, de plantas e de culturas permitem a integração do balanço hídrico a um modelo de crescimento de plantas e, portanto, vários cenários podem ser criados para simular os efeitos da disponibilidade de água do solo na biomassa das culturas e no rendimento de grãos. Séries de dados climatológicos podem ser inseridos no AquaCrop para avaliar os impactos das mudanças climáticas na produção agrícola e identificar frequências de perdas de culturas devido ao estresse hídrico.

No entanto, modelos como o AquaCrop exigem conjuntos de dados regionais calibrados para obter resultados confiáveis. Portanto, vários estudos vêm aplicando e testando o modelo AquaCrop em todo o mundo nos últimos anos (SALEMI et al., 2011; MABHAUDHI et al., 2014; TOUMI et al., 2016). Alguns desses trabalhos foram realizados no Brasil aplicados à cultura da cana-de-açúcar. Minella et al. (2014) avaliaram as limitações e usos potenciais desse modelo para prever eventos de falha de colheita; Alencar (2014) realizou um estudo de parametrização e validação para cana-de-açúcar; e Battisti et al. (2017) realizaram um estudo comparativo com modelos semelhantes para cultura da soja. De acordo com esses estudos, a parametrização é essencial para a aplicação de modelos de balanço hídrico no solo em condições de campo. Portanto, o uso de simulações para avaliar os parâmetros do AquaCrop pode auxiliar na escolha dos valores de entrada para estudos adicionais de calibração e validação de campo pode orientar os esforços de pesquisa para componentes com maior impacto nos resultados (STRICEVIC et al., 2011; NYAKUDYA & STROOSNIJDER, 2014).

Dentre as principais características do AquaCrop, destacam-se, a produção diária de biomassa e o rendimento final das culturas em relação à transpiração das plantas no campo e ao manejo agrônomico, com base nos conceitos atuais de fisiologia de planta, disponibilidade hídrica e salinidade do solo e da água. Detalhes dos processos simulados são fornecidos em um conjunto de três artigos (STEDUTO et al., 2009; RAES et al., 2009; HSIAO et al., 2009), no Boletim FAO *Irrigation and Drainage Paper Nº. 66 'Resposta de rendimento da cultura à água'* (STEDUTO et al., 2012) e no manual do modelo (RAES et al., 2012). De acordo com, Steduto et al. (2009) e Hsiao et al. (2009) o AquaCrop® é um modelo regido pela dinâmica da água e utilizado como ferramenta de apoio para tomada de decisões, planejamento e análise de cenários climáticos.

A partir da premissa original de uma relação direta entre o consumo de água pela planta e a produtividade da cultura, a abordagem de Doorenbos e Kassam (1979), foi à base para o desenvolvimento do modelo AquaCrop®. É importante destacar que no modelo, a evapotranspiração da cultura (ETc) é separada em transpiração da cultura (Tr) e evaporação da água do solo (E), para evitar confundir o efeito do uso improdutivo do consumo de água pela evaporação, pois, a evaporação se torna o componente principal da evapotranspiração na fase inicial do ciclo da cultura (MAGALHÃES, 2017).

O modelo AquaCrop é dividido em dois grupos, de acordo com seus parâmetros, sendo um grupo formado pelas características que apresentam poucas alterações em decorrência do clima e condições locais, tais como a produtividade da água, o índice de colheita e transpiração, denominados parâmetros conservativos, e o segundo grupo é representado pelos parâmetros que mudam de acordo com o ambiente e com as características da cultivar, denominados parâmetros específicos da cultura (MARTINS, 2017).

Devido às alterações que os parâmetros menos conservativos apresentam em decorrência do manejo diferenciado da cultura, das condições do solo e do clima, são necessários determinados ajustes a fim de se obter respostas plausíveis dos modelos em determinadas situações, como em variedades específicas e condições do ambiente local (HSIAO et al., 2009; HENG et al., 2009). Desse modo, são feitas simulações com os dados de entrada do modelo, comparando as estimativas com os dados reais da cultura obtidas em campo, e posteriormente, realizando o ajuste dos parâmetros.

Assim o objetivo deste estudo foi calibrar o modelo AquaCrop e suas variáveis de entrada para a estimativa direta da produtividade das variedades de cana-de-açúcar e avaliar seu desempenho em comparação com dados observados em experimento controlado.

2.2. Material e métodos

Para realizar a calibração do modelo para cultura da cana-de-açúcar foram utilizados dados de um experimento conduzido em ambiente protegido com variedades comerciais de cana-de-açúcar submetidas diferentes níveis de irrigação por gotejamento, de onde derivaram as teses e/ou dissertações de Barbosa (2015), Lizcano (2015), Barros, 2015 Santos (2016), Leal (2016) e Lopes (2016).

Os dados de entrada do modelo AquaCrop necessários para calibração, considera aspectos de clima, cultura, solo e manejo:

- ✓ Clima: Temperaturas máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), precipitação pluviométrica diária (mm dia^{-1}), evapotranspiração de referência diária (ET_0 ; mm dia^{-1}) e concentração média anual de CO_2 na atmosfera (ppm) são os dados climáticos de entrada requeridos pelo modelo. Os dados diários de temperatura máxima, mínima e média do ar ($^{\circ}\text{C}$) radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ m}^{-1}$) e umidade relativa do ar (%) foram obtidos em experimento desenvolvido previamente. A evapotranspiração de referência foi estimada com o método de Priestley e

Taylor (1972) por Santos (2016). Quanto à concentração média anual de CO₂ na atmosfera, o modelo disponibiliza opções quanto ao local de obtenção dos dados, no presente estudo optou-se pela utilização dos dados de CO₂ obtidos no observatório de Mauna Loa, Havaí (RAES et al., 2009). A precipitação pluviométrica diária não foi utilizada devido ao fato de o experimento ser irrigado em ambiente protegido, assim foram inseridos os dados referentes aos volumes e datas de irrigação.

- ✓ Dados de Solo: Tipo de solo, umidade capacidade de campo, ponto de murcha permanente, densidade do solo, condutividade hidráulica saturada, valor do número curva (Curve Number).
- ✓ Dados da cultura: Data de plantio, data de colheita, duração dos estádios fenológicos da cultura, população de plantas, espaçamento entre plantas, espaçamento entre linhas, comprimento do sistema radicular, índice de colheita de referência (HI_o) foram obtidos no experimento descrito no apêndice A. Os seguintes parâmetros foram calibrados no modelo: o Coeficiente da cultura com completa expansão do dossel (Kc_{Trx}) e o coeficiente de máxima cobertura do dossel (CC_x). Algumas variáveis requeridas pelo modelo, como a máxima cobertura do dossel; máxima e mínima profundidade efetiva de raízes, temperaturas limites (mínima e máxima) para crescimento da planta, fração de depleção de água no solo(p) entre outros, foram retirados da literatura. A salinidade não foi considerada no experimento pois nem o solo e nem a água utilizada apresentava características salinas.
- ✓ Dados de manejo: O modelo permite inserir dados sobre a presença, o tipo de cobertura e a porcentagem que ela cobre o solo (%), as práticas culturais que evitam o escoamento superficial da água e a possibilidade de quatro níveis de fertilização (alto, próximo ao ideal, médio e baixo). O nível de fertilização foi considerado próximo ao ideal, não foi considerado a cobertura do solo por restos vegetais. Foram realizados o controle fitossanitário e a adubação de acordo com o requerido pela cultura.
- ✓ Dados de irrigação: método de irrigação, data da irrigação, volume aplicado, qualidade da água.

Os parâmetros iniciais da modelagem foram derivados a partir de dados de literatura e de culturas previamente parametrizadas, com padrão de similaridade com a cana-de-açúcar, como por exemplo o milho (cultura C4). Os principais parâmetros do modelo são aqueles relacionados aos limites de temperatura do ar para o crescimento, transpiração da cultura,

crescimento do dossel, estresse hídrico e produção da biomassa, ou seja, aqueles considerados conservativos.

O processo de parametrização do modelo se deu por meio do método de tentativa e erro (*trial and error approach*), sendo realizado para as seguintes variedades de cana-de-açúcar: CTC 15 (V1), CTC 17 (V2), RB 867515 (V3), RB 92579 (V4), RB 931011 (V5), RB 966928 (V6), IAC 955000 (V7) e a variedade NCO 376 (Sul-Africana) (V8). Foram realizadas em torno de 10 mil simulações para se chegar à calibração final do modelo.

A calibração do AquaCrop foi realizada através da comparação dos valores observados e simulados para as variáveis biomassa total (ton ha^{-1}) e produtividade (ton ha^{-1}) no tratamento de 100% (conforme explicado no próximo tópico), ajustando o modelo às diversas informações encontradas e definidas em condição de campo e experimental, onde foi possível encontrar os parâmetros adequados às condições locais.

Uma recomendação geral empírica utilizada nos processos de calibração dos modelos de simulação das culturas é que seja utilizado um experimento conduzido sem restrição hídrica (T 100%) neste processo de ajuste.

Para validar a calibração realizada no modelo, foram simuladas as produtividades de colmos frescos, o rendimento bruto de açúcar, a produção de biomassa seca e a produtividade da água para as 8 variedades considerando a reposição hídrica de 50 e 75% da evapotranspiração em condições experimentais.

DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO¹

A pesquisa foi realizada na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB), localizado na Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz' (ESALQ/USP), em Piracicaba – SP (Figura 1). As coordenadas geográficas do local são: 22° 43' 30" de latitude Sul, e 47° 38' 00" de longitude Oeste, a altitude é de 546 m.

O experimento foi conduzido em infraestrutura do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia-Engenharia da Irrigação (INCT-EI), com base em uma casa de vegetação (ambiente protegido), composta por três vãos conjugados, com área total de 400 m² e altura do pé-direito de 5,2 m, cobertura plástica transparente (Ginegar Plastic Products® - Kibbutz Ginegar, Israel) e laterais fechadas com tela "sombrite" preta, com aproximadamente 50% de

¹ Adaptado de Barbosa, 2015

interceptação da radiação global. A estrutura é provida de um total de 396 vasos (parcelas) em concreto armado (333 litros/vaso) assentados sobre base de concreto.

Uma estufa anexa (Estufa de Apoio) com aproximadamente 110 m² também foi utilizada para abrigar os quadros de comandos do sistema de irrigação, conjuntos moto-bombas, sistemas de aquisição de dados (*dataloggers*), além de servir de apoio na realização das análises, colheita e armazenamento do material coletado.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, com três blocos completos com parcelas subdivididas. Foram estudados dois fatores, sendo o primeiro com 3 níveis e o segundo com oito, totalizando assim 24 tratamentos, sendo eles: três níveis de irrigação ao longo do ciclo (100, 75 e 50% da Demanda Hídrica potencial - DHp) e oito variedades comerciais de cana-de-açúcar.

Para o primeiro fator, os níveis de irrigação adotados foram determinados tomando como referência a demanda hídrica potencial de cada variedade, mantendo-se a umidade do solo no nível de referência (100%) sempre próxima à umidade de capacidade de campo (θ_{cc}) para cada variedade individualmente; os demais níveis representaram frações de 75% e 50% da lâmina de referência 100% do tratamento que atendia toda demanda evapotranspirométrica de cada variedade. A diferenciação dos níveis de irrigação iniciou-se após a fase de intenso perfilhamento (~110 dias após o plantio), tomando-se como fase crítica na determinação da produção (INMAN-BAMBER, 2004).

Quanto ao fator variedades, buscou-se trabalhar com variedades comerciais que representassem os três principais programas de melhoramento genético atuantes no país, sendo eles: a Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético – RIDESA, o Centro de Tecnologia Canavieira – CTC e o Instituto Agrônomo de Campinas – IAC. Adicionalmente, optou-se por inserir dentre as variedades nacionais, uma representante sul africana, tendo em vista que este material genético tem sido largamente utilizado em experimentos que subsidiam a modelagem agrícola em cana-de-açúcar (variedade padrão na plataforma DSSAT-Canegro).

Os recipientes (vasos) para as plantas tinham um volume interno de 0,33 m³ tendo as seguintes dimensões: 1,04 x 0,41 x 0,76 m de largura, comprimento e profundidade respectivamente, com uma camada de 0,10 m de brita no fundo dos vasos, isolada por uma manta geotêxtil (Bidim), para facilitar a drenagem e isolar as parcelas. A cultura foi conduzida

em solo da série “Sertãozinho (60 cm de profundidade), que é um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura franco-arenosa, cultivados com duas mudas de cana-de-açúcar.

As Tabelas 2.1 e 2.2 estão descritos os resultados dos teores de macro e micronutrientes encontrados em cada um dos três blocos da estufa no início do ciclo de cultivo.

Tabela 2.1 – Resultado da análise química do solo para macronutrientes realizada nos três blocos do experimento para o ciclo de cultivo

Bloco	pH CaCl ₂	M.O. g dm ⁻³	P _{resina} mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S.B.	CTC	Sat. bases -----%-----	m	S mg dm ⁻³
1	5,3 c	9,0	41,5 d	2,7 c	24,0 d	11,3 d	24,3	0,0	38,3	62,5	61,0 c	0,0	11,5 d
2	5,3 c	9,0	44,0 d	3,2 d	22,5 d	9,8 d	24,3	0,0	35,3	59,5	59,3 c	0,0	13,0 d
3	5,6 c	10,0	38,0 d	2,1 c	25,8 d	12,8 d	19,5	0,0	40,5	60,0	67,8 c	0,0	11,5 d

Potencial hidrogeniônico (pH); matéria orgânica (M.O.); fósforo (P_{resina}); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); hidrogênio+alumínio (H+Al); soma de bases (S.B.); capacidade de troca catiônica (CTC); enxofre (S). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos. IAC (2014) e Raij et al. (1997)

Tabela 2.2 – Resultado da análise química do solo para macronutrientes realizada nos três blocos do experimento para o ciclo de cultivo

Bloco	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	----- DTPA * -----				(água quente)
	----- mg dm ⁻³ -----				
1	0,7 c	26,3 d	1,4 d	5,2 d	0,4 c
2	0,7 c	42,8 d	1,6 d	7,0 d	0,5 c
3	0,7 c	26,0 d	1,7 d	4,2 c	0,5 c

Cobre (Cu); ferro (Fe); zinco (Zn); manganês (Mn); boro (B). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos, segundo IAC (2014) e Raij et al. (1997)

*ácido dietilenotriaminopentaacético

A caracterização físico-hídrica do solo pode ser observada na Tabela 2.3 e os parâmetros do modelo de van Genuchten para a curva de retenção de água do solo na Tabela 2.4.

Tabela 2.3 – Caracterização físico-hídrica do solo

Camada	θ _{cc}	θ _{pmp}	CAD	D _s	D _p	PT	Frações granulométricas		
(m)	cm ³ cm ⁻³		(mm)	g cm ⁻³		(%)	Areia	Silte	Argila
							%		
0,00 – 0,20	0,224	0,161	22,10	1,61	2,69	40,1	72,29	8,00	19,71
0,20 – 0,40	0,226	0,163	19,62	1,58	2,69	41,2	72,03	8,04	19,93
0,40 – 0,60	0,229	0,166	18,49	1,54	2,69	42,7	72,03	7,69	20,28

θ_{cc}: umidade na capacidade de campo (correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de -4,85 kPa). θ_{pmp}: umidade no ponto de murcha permanente (correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de -1500 kPa). CAD: capacidade de água disponível. D_s: densidade do solo. D_p: densidade de partículas do solo. PT: porosidade total do solo.

Tabela 2.4 – Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r), e dos parâmetros empíricos (α , n e m) do modelo de van Genuchten (1980)

Camada (m)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	a (1/cm)	m	n
0,00 – 0,20	0,493	0,161	0,0674	0,4471	1,8224
0,20 – 0,40	0,489	0,163	0,0744	0,4328	1,7680
0,40 – 0,60	0,507	0,166	0,0736	0,4471	1,8137

As irrigações foram realizadas via sistema de gotejamento superficial, com emissores autocompensantes, anti-sifão e anti-drenante. Cada gotejador possuía vazão de 1,6 L h⁻¹ e foram instalados cinco emissores por parcela, sendo estes espaçados em 0,20 m, totalizando assim uma vazão de 8 L h⁻¹ por parcela. O tubo gotejador, com diâmetro interno de 16 milímetros, foi instalado no centro da parcela, a alimentação dos tubos gotejadores foi realizada por meio de microtubos que conduziam a água que supria o sistema. A comunicação destes com os tubos gotejadores foi realizada a partir de cotovelos e conectores internos, ambos com diâmetro de 4,5 cm. Cada uma das parcelas experimentais foi irrigada individualmente, com controle da água de irrigação realizado por meio da abertura e fechamento de micro registros instalados na estufa de apoio, localizada ao lado da estufa principal. Para facilitar o controle da irrigação, os micro-registros foram agrupados em um painel de controle, o qual permitia o monitoramento simultâneo de todos os controladores. A água utilizada na irrigação (Tabela 2.5) foi armazenada em duas caixas d'água com volume de 5,0 m³.

Tabela 2.5 – Resultados da análise físico-química da água utilizada para irrigação.

Parâmetros	Unidades	Valores	Valores Normais **
Condutividade elétrica	dS m ⁻¹	0,30	0 – 3
Sais dissolvidos totais	mg L ⁻¹	192,00	0 – 2000
Cálcio	mmol _c L ⁻¹	0,71	0 – 20
Magnésio	mmol _c L ⁻¹	0,16	0 – 5
Sódio	mmol _c L ⁻¹	0,57	0 – 40
Potássio	mmol _c L ⁻¹	0,08	-
Cloreto	mmol _c L ⁻¹	0,34	0 – 30
Sulfato	mmol _c L ⁻¹	1,02	0 – 20
Nitrato	mmol _c L ⁻¹	0,25	-
Carbonato	mmol _c L ⁻¹	0,23	0 – 0,1
Bicarbonato	mmol _c L ⁻¹	0,23	0 – 10
Nitrogênio-nitrato	mg L ⁻¹	15,3	0 – 10
Nitrogênio amoniacal	mg L ⁻¹	0,20	0 – 5
Fósforo	mg L ⁻¹	0,01	0 – 1
Potássio	mg L ⁻¹	3,20	0 – 2
Acidez (pH)	-	6,7	6,0 – 8,5
Relação de adsorção de sódio	-	0,39	0 – 15
Classificação		C2S1	

*Ayres e Westcot (1999)

Os sensores de solo instalados foram do tipo tensiômetros de punção digital, que serviram para o monitoramento do potencial mátrico do solo e subsequente manejo da irrigação. Uma bateria com três tensiômetros foi instalada no centro das parcelas de cada uma das 3 repetições por variedade e entre as duas plantas nas profundidades de 0,10 m, 0,30 m e 0,50 m, representando as camadas de 0,0-0,20 m; 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente.

Quanto aos sensores utilizados para o monitoramento dos elementos climáticos, estes foram instalados no centro da casa de vegetação, com o intuito de estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Priestley e Taylor, assim como auxiliar na interpretação dos resultados alcançados. Desta forma, foram monitorados a densidade de fluxo (W m⁻²) da radiação solar global (R_g) com piranômetro de silício (LI200X - Licor), radiação fotossinteticamente ativa (RFA) com sensor quântico (LI190SB - Licor) e radiação líquida (R_n) com saldo radiômetro (NRLITE - Campbell Sci.), assim como a temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%) com sensor Vaissala (HMP45C - Vaissala). Os sensores foram instalados no vão central em duas alturas (próximo ao teto da estufa e acima do dossel da cultura), e ligados a um datalogger (CR1000 - Campbell Sci.), armazenando-se os dados em intervalos de 15 minutos. Na figura 2.1 têm-se as temperaturas máximas e mínimas do ar e a evapotranspiração ao longo do experimento.

Figura 2.1 – Temperaturas máximas e mínimas do ar e evapotranspiração ao longo do experimento.

Mais detalhes sobre o delineamento experimental e condução da cultura podem ser encontrados em Barbosa (2015), Lizcano (2015), Barros, 2015 Santos (2016), Leal (2016) e Lopes (2016).

Tabela 2.6 – Quantidade total de nutrientes aplicados durante o ciclo da cana-de-açúcar

N	K	B	Cu	Mn	Mo	Zn
-----kg ha ⁻¹ -----						
94	92	2	0,32	0,61	0,72	6,20

Para as fertirrigações, os fertilizantes eram diluídos em aproximadamente 400 L de água, sendo esta solução injetada no sistema já pressurizado. Após a injeção de toda a solução fertilizante, era feita a injeção de água "pura" para limpeza do sistema e melhor distribuição dos fertilizantes no solo.

O manejo da irrigação foi realizado via solo, o qual buscou repor o volume de água consumido por cada uma das variedades estudadas. Após obter os dados do potencial matricial da água no solo (ψ_m), foi estimada a umidade (θ), em m³ m⁻³, através do modelo proposto por van Genuchten (1980), que relaciona os valores de ψ_m com os respectivos valores de θ , utilizando os parâmetros característicos deste solo apresentados na Tabela 2.4.

Assim, de posse dos dados de umidade estimados e a caracterização físico-hídrica do solo de cada camada (Tabela 2.3), foram calculadas as lâminas de irrigação necessárias para

elevar a umidade do solo até a capacidade de campo (θ_{cc}) para cada variedade do tratamento de 100% da demanda hídrica, individualmente. A somatória das lâminas necessárias de cada camada resultou na lâmina de irrigação total aplicada em cada variedade ao longo do ciclo de cultivo.

Para facilitar o manejo da irrigação, foi utilizada uma planilha elaborada no Software Microsoft Excel®, que tornou prática e rápida a determinação do tempo de irrigação para cada tratamento de lâmina imposto. Para o cálculo do tempo de irrigação, adotou-se a vazão do sistema e área de solo da parcela de 8 L h⁻¹ e 0,43 m², respectivamente.

Dessa forma, a lâmina de irrigação L100 de cada variedade foi adotada como lâmina de referência, bem como o tempo de irrigação necessário para que houvesse a reposição hídrica. Para a irrigação dos demais tratamentos (L50, L75), foi calculada a fração do tempo de irrigação que deveria ser aplicada de acordo com o tratamento.

Tabela 2.7 – Lâmina total aplicada durante o ciclo das oito variedades de cana-de-açúcar.

Lâminas	CTC 15	CTC 17	RB 867515	RB 92579	RB 931011	RB 966928	IAC 955000	NCo 376
	-----mm-----							
50	775,94	772,48	692,45	773,33	686,60	649,05	702,77	591,03
75	1022,67	1014,98	898,16	1013,80	888,23	832,67	916,56	750,99
100	1269,40	1257,48	1103,88	1254,27	1089,86	1016,30	1130,36	904,01

O experimento foi colhido no dia 16/02/2014, 381 dias após o plantio (DAP), e devido ao grande número de amostras, se estendeu até 27/02/2014 (392 DAP). Para minimizar os erros experimentais do longo período de colheita, o experimento foi colhido bloco a bloco, colhendo-se 32 parcelas (64 touceiras) por dia. Imediatamente após o corte e a limpeza, os colmos foram pesados em balança digital semi analítica, obtendo-se a biomassa fresca de colmos de cada touceira, também se obteve a biomassa de ponteiros, bainhas e folhas a partir da pesagem destas partes, que foram secas em estufa de circulação de ar forçada a 65°C até peso constante.

Na Tabela 2.8 são apresentados os resultados de produtividades obtidos para cada variedade em função de cada lâmina. Sendo todas as variáveis calculadas nesse estudo baseadas nas produtividades correspondentes.

Tabela 2.8 - Produtividade de colmos das variedades de cana de açúcar em função das lâminas de irrigação.

Lâminas	CTC 15	CTC 17	RB 867515	RB 92579	RB 931011	RB 966928	IAC 955000	NCo 376
	-----t ha ⁻¹ -----							
50	152,5	139,9	120,3	148,0	110,8	115,7	113,5	106,7
75	201,0	226,3	180,6	229,7	174,9	162,1	156,0	141,8
100	266,7	261,0	205,1	288,0	224,1	197,3	225,9	189,8

*Adaptado de Barbosa, 2015.

A partir do número de perfilhos no final do ciclo da cultura foi estimada a densidade de colmos por hectare para cada variedade e lâmina, como pode ser observado na tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Densidade de colmos por hectare das variedades de cana de açúcar

CTC 15	CTC 17	RB 867515	RB 92579	RB 931011	RB 966928	IAC 955000	NCo 376
151115	146341	113333	136991	132175	118008	132175	141666

Através dos dados de produtividade de açúcar e de colmos foram obtidos o índice de colheita (IC) (conforme SANTOS, 2016) para produção de sacarose e de colmos para cada variedade em cada lâmina avaliada, conforme tabela 2.10.

Tabela 2.10 – Índices de colheita medidos nas variedades de cana de açúcar (base peso seco)

CTC 15	CTC 17	RB 867515	RB 92579	RB 931011	RB 966928	IAC 955000	NCo 376
sacarose							
27	25	26	27	26	33	27	25
colmos							
64	62	62	65	64	67	67	63

*Adaptado de Santos, 2016.

A análise de desempenho do modelo na calibração e na validação foi realizada utilizando os seguintes indicadores: Raiz quadrada do erro médio (RQEM), erro absoluto médio (EAM), coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância ou acurácia (d) (WILLMOTT, 1985), índice de eficiência de modelagem (E) (NASH: SUTCLIFFE, 1970) e índice de confiança (C) (CAMARGO & SENTELHAS, 1997). As equações dos indicadores são apresentadas a seguir:

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

$$\mathbf{RQEM} = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (\mathbf{Est}_i - \mathbf{Obs}_i)^2}$$

$$\mathbf{EAM} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (|\mathbf{Est}_i - \mathbf{Obs}_i|)$$

$$\mathbf{R}^2 = \frac{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n [(\mathbf{Est}_i - \overline{\mathbf{Obs}}_i) \times (\mathbf{Obs}_i - \overline{\mathbf{Obs}})]}{\left[\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (\mathbf{Est}_i - \overline{\mathbf{Est}})^2 \right] \times \left[\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (\mathbf{Obs}_i - \overline{\mathbf{Obs}})^2 \right]}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\mathbf{Est}_i - \mathbf{Obs}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\mathbf{Est}_i - \overline{\mathbf{Obs}}| + |\mathbf{Obs}_i - \overline{\mathbf{Obs}}|^2)}$$

$$\mathbf{E} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\mathbf{Est}_i - \mathbf{Obs}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\mathbf{Obs}_i - \overline{\mathbf{Obs}})^2}$$

$$\mathbf{C} = \sqrt{\mathbf{R}^2} \times d$$

em que: $\mathbf{Est}_i$ e $\mathbf{Obs}_i$ são respectivamente as produtividades de colmos estimada e observada (t ha^{-1}), ou a produtividade de biomassa seca estimada e observada (t ha^{-1}), ou o rendimento bruto de açúcar estimado e observado (t ha^{-1}), ou a produtividade da água estimada e observada (kg m^{-3}); $\overline{\mathbf{Est}}$ e $\overline{\mathbf{Obs}}$ são respectivamente as médias das produtividades de colmos estimada e observada (t ha^{-1}), ou a produção de biomassa seca estimada e observada (t ha^{-1}), ou o rendimento bruto de açúcar estimado e observado (t ha^{-1}), ou a produtividade da água estimada e observada (kg m^{-3}); n é o número de observações.

No presente estudo, tinha-se disponível para calibração e validação do modelo AquaCrop na cultura de cana-de-açúcar um experimento com 3 níveis distintos de irrigação: L100%, L75% e L50%. Deve-se ressaltar ainda, que o método de irrigação utilizado foi o gotejamento em alta frequência de aplicação de água: turno de rega de 1 – 2 dias, mesmo para a menor lâmina de irrigação (50%), não ocorrendo nenhuma retenção de água no dossel das plantas, nenhuma retenção de água na biomassa seca sobre o solo (*mulching*) e nem

perdas por evaporação durante o processo de aplicação de água (irrigação por gotejamento). O manejo da irrigação foi feito com base em medição do potencial matricial de água no solo (tensiômetros) conseguindo-se manter os valores de potenciais entre 5 e 15 kPa na maior parte do tempo.

Outro detalhe importante do experimento é que a lâmina de irrigação L100% é específica para cada variedade, ou seja: os valores de K_c utilizados ao longo do ciclo de crescimento são específicos para cada variedade, de acordo com o consumo hídrico observado de cada variedade ao longo do experimento.

A recomendação geral utilizada nos processos de calibração dos modelos de simulação das culturas é que ele seja conduzido com dados experimentais conduzidos sem restrição hídrica (L100%) e em condições ótimas nutricionais. A desvantagem deste tipo de calibração levando-se em consideração somente a condição hídrica ótima (L100%) é que ele não permite calibrar os fatores de estresse hídrico redutores da produtividade que estão sendo computados pelo processo mecanístico do modelo AquaCrop; de tal modo que os fatores de estresse hídrico que contabilizam a produtividade sob condição de déficit hídrico, ficam fixados nos valores padrões embutidos na versão original do modelo AquaCrop.

O ideal seria que o processo de calibração fosse feito por algum tipo de algoritmo que levasse em consideração no processo de calibração, níveis distintos de irrigação simultaneamente (L100, L75 e L50%), o que permitiria ajustar os parâmetros de estresse hídrico de uma maneira mais robusta. Como não se teve acesso a esse tipo de algoritmo, propôs-se neste trabalho a calibração de 2 etapas:

a) Etapa 1: calibração padrão para lâmina L100 % variando-se de maneira manual as variáveis X, Y, Z (CC_x , CDC , $K_{c_{Tx}}$); analisando a calibração do modelo com os dados observados no experimento para L100%, através dos seguintes indicadores numéricos: Raiz quadrada do erro médio, erro absoluto médio, coeficiente de determinação, índice de concordância ou acurácia, índice de eficiência de modelagem e índice de confiança;

b) Etapa 2: mantendo-se fixo as variáveis ajustadas na Etapa 1, procedeu-se a validação do modelo ajustado para L100%, aplicado para as lâminas experimentais de 75 e 50 % e calculando-se o desempenho do modelo na validação das lâminas de L75% e L50% através dos mesmos indicadores numéricos especificados na Etapa 1.

Com esta calibração de 2 Etapas, pode-se tirar proveito de toda base de dados obtida no experimento conduzido. Um outro detalhe importante a ser observado é que o AquaCrop

não traz resultados da produção e produtividade de colmos em base úmida, mas apenas em base seca, sendo necessário a conversão dos dados para a base úmida que é a referência mais utilizada pelas usinas no Brasil. Caso a Etapa 2 de validação não tivesse apresentado desempenho adequado, seria necessário uma Etapa 3 de ajuste dos parâmetros de estresse hídrico de uma maneira mais robusta, levando-se em consideração as lâminas de 50 e 75 % no processo de calibração (ano 1 do experimento), porém a validação da calibração teria que ser feita com um outro conjunto de dados, neste caso com os dados do experimento conduzido no ano 2 nesta mesma área experimental (dados não apresentados nesta tese).

2.3. Resultados e Discussão

Os parâmetros obtidos na calibração do modelo AquaCrop para cultura da cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 2.11. Estes parâmetros incluem o coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{c_{Tx}}$) e o coeficiente de máxima cobertura do dossel (CC_x). Os outros parâmetros foram preenchidos com dados presentes na literatura e obtidos experimentalmente (Tabela 2.12). No Capítulo 2 será apresentada análise de sensibilidade do modelo para algumas variáveis de entrada do modelo, de modo a justificar o foco da calibração nas variáveis $K_{c_{Tx}}$ e CC_x , as quais são as mais sensíveis no processo de calibração do modelo.

Os parâmetros foram ajustados repetidamente depois de se comparar os resultados simulados com os obtidos em experimento, assim chegou-se ao conjunto de valores para os parâmetros mais adequados para as condições simuladas.

Pode-se observar que cada variedade necessitou de um determinado ajuste nesses parâmetros para que a calibração ideal fosse encontrada, o que confronta diretamente HSIAO et. al. (2009), que afirma que a concepção do modelo assume que os parâmetros são aplicáveis a uma ampla gama de condições e não são específicos para uma cultivar. Ele afirma que há algumas diferenças, especialmente quando a cultivar é melhorada geneticamente visando ser mais tolerante a determinados tipos de estresse. No entanto, essas diferenças são geralmente pequenas e espera-se que os parâmetros conservativos da cultura possam ser amplamente aplicáveis sem calibração para cada cultivar.

Smith e Singels (2005), avaliando a resposta do desenvolvimento do dossel ao estresse hídrico na cana-de-açúcar, sugerem o aumento na taxa de senescência foliar para as duas

cultivares avaliadas, devido à diminuição da água no solo. Sendo que a taxa de senescência duplicou quando a água disponível no solo reduziu de 30% até 70%. O processo de senescência parece bastante sensível ao estresse hídrico com respostas visíveis quando a quantidade de água disponível fica abaixo de 70%.

Além disso, o modelo leva em consideração a expansão do dossel como uma função exponencial de primeira ordem, e não leva em consideração o perfilhamento, como ocorre na cana-de-açúcar, sendo este processo variável de dentro as cultivares. De acordo com Farahani et al. (2009), a simulação correta da cobertura do solo é fundamental para o desempenho do AquaCrop, já que afeta a taxa de transpiração e, consequentemente, acúmulo de biomassa.

O K_{cTrx} é um fator que indica quando a cultura apresenta expansão completa do dossel ($CC_x=1$) e não está em condição de estresse (STEDUTO et al., 2012). É um parâmetro conservativo e aproximadamente equivalente ao coeficiente basal da cultura na meia estação nos casos de completa expansão do dossel (RAES et al., 2012; DALLA MARTA et al., 2016).

Tabela 2.11 – Parâmetros da cultura obtidos na calibração do modelo AquaCrop para as 8 variedades de cana-de-açúcar para o tratamento com 100% de reposição hídrica.

CTC 15	CTC 17	RB 867515	RB 92579	RB 931011	RB 966928	IAC 955000	NCo 376
K_{cTrx}							
1.50	1.24	1.07	1.36	1.32	1.04	1.22	1.0
CC_x							
0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.85

Na Tabela 2.12 observa-se os principais parâmetros conservativos da cultura da cana-de-açúcar utilizados na calibração do modelo AquaCrop para as diferentes cultivares, estes parâmetros foram obtidos na literatura, no Boletim FAO *Irrigation and Drainage Paper Nº. 66 'Resposta de rendimento da cultura à água'* (STEDUTO et al., 2012) e no manual do modelo (RAES et al., 2017) onde os autores sugerem valores base para alguns parâmetros conservativos da cultura da cana-de-açúcar.

Tabela 2.12 – Parâmetros conservativos da cultura utilizados na calibração do modelo AquaCrop para as diferentes cultivares

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade ou significado
T _{base}	Temperatura basal	12	°C
T _{upper}	Temperatura máxima	32	°C
	Tempo do transplantio até a senescência	330	dias
Zn	Zona radicular mínima efetiva	0.10	m
Zx	Zona radicular máxima efetiva	0.6	m
f _{age}	Coefficiente de redução do coeficiente de cultura para transpiração	0.3	Declínio em função do envelhecimento foliar
P _{exp, upper}	Limite da depleção da água no solo para a expansão do dossel - Limite superior	0.25	-
P _{exp, lower}	Limite da depleção da água no solo para a expansão do dossel - Limite inferior	0.57	-
-	Fator forma para o coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel	3	-
p _{sto}	Limite da depleção da água no solo para controle estomático- Limite superior	0.50	Acima deste limite não ocorre fechamento dos estômatos
-	Fator forma para o coeficiente de estresse hídrico para o fechamento estomático	3	-
p _{sen}	Limite da depleção da água no solo para a senescência do dossel - Limite superior	0.64	Acima deste limite não ocorre senescência das folhas
-	Fator forma para o coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel	1.3	-
-	Fator forma da curva de crescimento do sistema radicular	1.3	-
WP*	Produtividade da água normalizada	30	g m ⁻²

A Figura 2.2a exibe a relação entre os resultados obtidos para produtividade de colmos (TCH) no experimento com os simulados pelo AquaCrop para as variedades de cana-de-açúcar. No processo de calibração buscou-se ajustar os parâmetros teóricos presentes no modelo com os determinados em condições experimentais para o tratamento com 100% da reposição hídrica, através de um ajuste que proporcionasse maior aproximação entre os resultados medidos e os simulados. Nota-se que a calibração das variedades (Figura 2.2a) obteve alta acurácia ($d=0.90$), ótima precisão ($R^2=0.99$), com RQEM de 15 t ha⁻¹, resultando em $C=0.90$ e eficiência da modelagem (E) de 0,99.

Na Figura 2.2b tem-se a relação entre a produção de biomassa seca da parte aérea simulada pelo AquaCrop e a obtida no experimento para as variedades de cana-de-açúcar. Como tem relação direta com a produtividade de colmos a biomassa seca da parte aérea teve índices próximos aos observadas na primeira. A calibração obteve alta acurácia ($d=0.94$), ótima precisão ($R^2=0.94$), com RQEM inferior a 7 t ha⁻¹, um índice de confiança de 0.89 e uma eficiência da modelagem de 79% (E).

Na Figura 2.2c observa-se a relação entre o rendimento bruto de açúcar simulado pelo AquaCrop e o obtido no experimento para as variedades de cana-de-açúcar. A diferença entre a simulação do rendimento bruto de açúcar e da produtividade de colmos é a alteração do

índice de colheita, todos os outros parâmetros permaneceram iguais. A calibração das variedades obteve alta acurácia ($d=0.92$), ótima precisão ($R^2=0.94$), com RQEM de $2,2 \text{ t ha}^{-1}$, resultando em $C=0.85$ e uma eficiência da modelagem de 68% (E). Na Figura 2.2d é possível observar a relação entre a produtividade da água (WP) simulada pelo AquaCrop e a obtido no experimento para as variedades de cana-de-açúcar. A calibração das variedades obteve boa acurácia ($d=0.6$), precisão mediana ($R^2=0.61$), e o RQEM inferior a $0,6 \text{ kg m}^{-3}$ de água transpirada, resultando em $C=0.41$ e uma eficiência da modelagem negativa, o que mostra que o modelo não conseguiu simular adequadamente esse parâmetro.

Figura 2.2. Relações entre a produtividade de colmos frescos (t ha^{-1}) (a), biomassa seca (t ha^{-1}) (b), rendimento bruto de açúcar (t ha^{-1}) (c) e, produtividade da água (kg m^{-3}) (d), simuladas e observadas no ciclo de cana planta das 8 variedades de cana-de-açúcar avaliadas na calibração para lâmina de irrigação de 100% da ET.

A Figura 2.3a exibe a relação entre os resultados obtidos para produtividade de colmos (TCH) no experimento com os simulados pelo AquaCrop para as variedades de cana-de-açúcar na lâmina de 75% da reposição hídrica. A simulação obteve alta acurácia ($d=0.93$), ótima precisão ($R^2=0.96$), com RQEM inferior a 13 t ha^{-1} , $C=0.87$ e eficiência de modelagem de 75%.

Na Figura 2.3b observa-se a relação entre a produção de biomassa seca da parte aérea simulada pelo AquaCrop e a obtida no experimento para as variedades de cana-de-açúcar,

para lâmina de 75%. A simulação também obteve alta acurácia ($d=0.96$), ótima precisão ($R^2=0.97$), com RQEM inferior a 4 t ha^{-1} , $C=0.92$ e eficiência da modelagem de 88%.

Na Figura 2.3c têm-se a relação entre o rendimento bruto de açúcar simulado pelo AquaCrop e o obtido no experimento para as variedades de cana-de-açúcar, na lâmina de 75%. A simulação obteve alta acurácia ($d=0.93$), ótima precisão ($R^2=0.97$), com RQEM inferior a 2 t ha^{-1} , $C=0.97$ e eficiência da modelagem de 94%.

Na Figura 2.3d é possível observar a relação entre a produtividade da água (WP) simulada pelo AquaCrop e a obtida no experimento para as variedades de cana-de-açúcar, na lâmina de 75%. A calibração das variedades obteve boa acurácia ($d=0.57$), baixa precisão ($R^2=0.23$), e o RQEM inferior a $0,6 \text{ kg de matéria seca m}^{-3}$ de água transpirada, resultando em $C=0.54$ e uma eficiência da modelagem negativa ($E=-2.27$), o que mostra que o modelo não conseguiu simular adequadamente esse variável.

Figura 2.3. Relações entre a produtividade de colmos frescos (t ha^{-1}) (a), biomassa seca (t ha^{-1}) (b), o rendimento bruto de açúcar (t ha^{-1}) (c) e a produtividade da água (kg m^{-3}) (d), simuladas e observadas no ciclo de cana planta das 8 variedades de cana-de-açúcar avaliadas na validação para lâmina de irrigação de 75% da ET.

A Figura 2.4a exibe a relação entre os resultados obtidos para produtividade de colmos (TCH) no experimento com os simulados pelo AquaCrop para as variedades de cana-de-açúcar

na lâmina de 50% da reposição hídrica. A simulação obteve alta acurácia ($d=0.92$), boa precisão ($R^2=0.73$), com RQEM inferior a 10 t ha^{-1} , $C=0.82$ e eficiência de modelagem de 69%.

Na Figura 2.4b observa-se a relação entre a produção de biomassa seca da parte aérea simulada pelo AquaCrop e a obtida no experimento para as variedades de cana-de-açúcar, para lâmina de 50%. A simulação obteve boa acurácia ($d=0.76$), boa precisão ($R^2=0.74$), com RQEM inferior a 4 t ha^{-1} , $C=0.76$ e eficiência da modelagem de 64%.

Na Figura 2.3c têm-se a relação entre o rendimento bruto de açúcar simulado pelo AquaCrop e o obtido no experimento para as variedades de cana-de-açúcar, na lâmina de 50%. A simulação obteve alta acurácia ($d=0.85$), ótima precisão ($R^2=0.85$), com RQEM inferior a 2 t ha^{-1} , $C=0.82$ e eficiência da modelagem de 34%.

Na Figura 2.3d é possível observar a relação entre a produtividade da água (WP) simulada pelo AquaCrop e a obtida no experimento para as variedades de cana-de-açúcar, na lâmina de 50%. A calibração das variedades obteve baixa acurácia ($d=0.32$), baixa precisão ($R^2=0.0004$), e o RQEM inferior a $1 \text{ kg de matéria seca m}^{-3}$ de água transpirada, resultando em $C=0.05$ e uma eficiência da modelagem negativa ($E=-9.39$), o que ocorre quando a média observada é um melhor preditor que o modelo ou, em outras palavras, quando a variação residual (descrita pelo numerador na expressão acima) é maior que a variação dos dados, confirmando que o modelo não consegue simular de forma confiável essa variável. Provavelmente o algoritmo de quantificação de chuvas e irrigações efetivas de modelo (lâmina de água que fica retida na zona radicular das plantas) precise ser aprimorado, para poder calcular com mais precisão a produtividade da água (WP) destas variedades na condição experimental analisada.

Figura 2.4. Relações entre a produtividade de colmos frescos (t ha⁻¹) (a), biomassa seca (t ha⁻¹) (b), o rendimento bruto de açúcar (t ha⁻¹) (c) e, a produtividade da água (kg m⁻³) (d), simuladas e observadas no ciclo de cana planta das 8 variedades de cana-de-açúcar avaliadas na validação para lâmina de irrigação de 50% da ET.

Segundo Steduto et al. (2009), o parâmetro WP* normalizado para o clima, pode ser considerado como uma quase constante para dada cultura não limitada por nutrientes minerais, independentemente de estresse hídrico, exceto para os casos extremamente severos. O parâmetro WP é normalizado para o clima e pode ser considerado como constante para dada cultura não limitada por nutrientes minerais, independentemente de estresse hídrico, exceto para os casos extremamente graves (STEDUTO et al., 2009). Para situações limitantes em nutrientes ocorre menores valores de WP. Para muitas espécies de culturas a WP aumenta ligeiramente com o aumento da concentração de CO₂.

A avaliação individual das simulações para as 8 variedades de cana-de-açúcar são apresentadas nas Figuras 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8. Em geral todas tiveram alta precisão e ótima acurácia ($d > 0.88$). O índice de eficiência da modelagem ficou acima de 95% para todas as variedades quanto a produtividade de colmos (Figura 2.5), os EAMs ficaram abaixo de 15 t ha⁻¹ o que revela um bom desempenho de todas as calibrações. Quanto a estimativa da biomassa seca (Figura 2.6), obteve-se ótima acurácia ($d > 0.90$) e eficiência da modelagem acima de 85%. No desempenho para estimativa do rendimento bruto de açúcar (Figura 2.7 os EAMs foram

inferiores a 3 t ha^{-1} , o índice de acurácia só não foi superior a 0.90 na calibração da CTC 17, esta mesma também teve baixo índice de eficiência de modelagem ($E=0.38$). Para a produtividade da água (Figura 2.8) como explicado anteriormente os índices demonstraram que o modelo não conseguiu prever os dados.

Alencar (2014) calibrando o AquaCrop para as cultivares de cana-de-açúcar RB92579, SP79-1011 e RB93509 na localidade de Rio Largo-AL, observou valores próximos para as simulações do ciclo da cana planta ($R^2=0,96$, $d=0,73$ e $RQEM = 1,69 \text{ t ha}^{-1}$). Oliveira (2010) parametrizou o método da zona agroecológica para estimar a produtividade a cultura da cana-de-açúcar em regiões produtoras de Minas Gerais, ele observou valores próximos para as simulações do ciclo da cana planta ($R^2 = 0,77$, $d = 0,94$ e $RQEM = 7,1 \text{ t ha}^{-1}$) e da cana soca ($R^2 = 0,89$, $d = 0,95$ e $RQEM = 8,4 \text{ t ha}^{-1}$).

Avaliando a parametrização para a cultivar padrão de cana-de-açúcar do modelo APSIM-Sugarcane (Q117) e para as calibrações existentes para as cultivares brasileiras RB 867515 (Marin et al., 2013; Marin et al., 2015) e a cultivar SP 801842 (Costa et al., 2014), Dias (2016) observou que todas as calibrações sem o fator de decaimento (k_{dec}) avaliadas apresentaram erros consideráveis ($EAM > 15 \text{ t ha}^{-1}$) e baixa precisão ($R^2 < 0,50$), embora algumas calibrações tenham apresentado razoável acurácia com índice d igual a 0,65 para a cultivar padrão e superior a 0,70 para as cultivares brasileiras. A única exceção é a calibração para cultivar RB86-7515 de Marin et al. (2015) que apresenta EAM inferior a $15,5 \text{ t ha}^{-1}$, que, no entanto, apresentou baixa precisão ($R^2 = 0,50$) e as produtividades. Com o uso do k_{dec} houve melhoria expressiva nos desempenhos de todas as calibrações, sendo que na maioria dos casos o EAM foi inferior a 16 t ha^{-1} , com exceção da calibração para a cultivar RB86-7515 de Marin et al. (2015), para a qual o uso do k_{dec} piorou o desempenho.

Figura 2.5. Relações entre a produtividade de colmos (t ha^{-1}) simuladas e observadas no ciclo de cana-planta nos 3 tratamentos de irrigação avaliados simultaneamente (100% da ET, 75 da ET e 50% da ET), para cada uma das oito variedades de cana-de-açúcar avaliadas no experimento.

Figura 2.6. Relações entre biomassa seca da parte aérea (t ha^{-1}) simuladas e observadas no ciclo de cana-planta nos 3 tratamentos de irrigação avaliados simultaneamente (100% da ET, 75 da ET e 50% da ET), para cada uma das oito variedades de cana-de-açúcar avaliadas no experimento.

Figura 2.7. Relações entre o rendimento bruto de açúcar (t ha^{-1}) simulados e observados no ciclo de cana-planta nos 3 tratamentos de irrigação avaliados simultaneamente (100% da ET, 75 da ET e 50% da ET), para cada uma das oito variedades de cana-de-açúcar avaliadas no experimento.

Figura 2.8. Relações entre a produtividade da água (kg de matéria seca. m^{-3} de água transpirada) simuladas e observadas no ciclo de cana-planta nos 3 tratamentos de irrigação avaliados simultaneamente (100% da ET, 75 da ET e 50% da ET), para cada uma das oito variedades de cana-de-açúcar avaliadas no experimento.

Nassif (2010) parametrizando o modelo DSSAT/CANEGRO para as cultivares brasileiras, simulou a biomassa seca da parte aérea para a cultivar RB867515 durante a terceira a quinta soca em Porto Feliz-SP, relatando haver superestimativa do modelo durante todo ciclo obtendo RQEM de 9,5 t ha⁻¹ e baixos valores do índice de concordância ($d = 0,66$ e $R^2 = 0,53$).

Marin et al. (2011) parametrizando e avaliando o modelo DSSAT/CANEGRO obtiveram para massa seca da parte aérea RQEM de 9,8 e 9,6 t ha⁻¹, respectivamente para as variedades RB72454 e SP83-2847. Scarpate (2011) simulando o crescimento da cana-de-açúcar com o modelo agro hidrológico SWAP/WOFOST encontrou bons valores na simulação da biomassa seca da parte aérea sendo os melhores resultados para o ciclo da cana soca ($R^2 = 0,94$, $d = 0,91$ e RQEM = 6,4 t ha⁻¹) em relação a cana planta ($R^2 = 0,91$, $d = 0,95$ e RQEM = 8,8 t ha⁻¹).

Dias (2016), avaliando a parametrização original para a cultivar NCo 376 no modelo DSSAT/CANEGRO, para as cultivares brasileiras RB86-7515 (MARIN et al., 2011, 2013, 2015; NASSIF et al., 2012), RB92-579 (SILVA, 2012), RB72-454 (MARIN et al., 2011), SP83-2847 (MARIN et al., 2011) e para um conjunto de cultivares de primeiro corte conduzidos em Piracicaba, SP, e Capim, PB (VIANNA e SENTELHAS, 2015), sem o fator de decaimento de produtividade (k_{dec}) obteve EAM variando de 35 t ha⁻¹, índice de acurácia abaixo de 0,7, eficiência da modelagem inferior a 0,2, e baixa precisão ($R^2 < 0,50$). Com o fator de decaimento de produtividade (k_{dec}) obteve EAM inferior a 13 t ha⁻¹, índice de acurácia acima de 0,8, eficiência da modelagem de 0,58, e boa precisão ($R^2 = 0,72$).

A boa simulação da biomassa seca pelo modelo também é importante, uma vez que cresce no Brasil a utilização da biomassa para produção de etanol de segunda geração. De acordo com resultados apresentados em estudos com outros modelos de simulação de crescimento para a cultura da cana-de-açúcar, pôde-se verificar que o modelo AquaCrop está apto a simulação da biomassa seca da parte aérea, com melhor resultado para a biomassa seca ao final do ciclo.

2.4. Conclusões

Com base na metodologia adotada, obteve-se boa calibração do modelo AquaCrop às diferentes cultivares de cana-de-açúcar no tratamento com 100% da reposição hídrica, com altos índices de acurácia, de concordância e eficiência da modelagem ($d, C \geq 0,85$ e $E \geq 0,7$). Os índices estatísticos ficaram compatíveis ou superiores aos resultados de outros autores que

trabalharam com AquaCrop ou com outros modelos. O modelo foi capaz apresentar boa calibração nas repostas de produtividade de colmos, rendimento bruto de açúcar e produção de biomassa seca da parte aérea para todas as variedades de cana-de-açúcar, o que proporcionou erro absoluto médio abaixo de 10 toneladas ha⁻¹.

No processo de validação o modelo simulou adequadamente (d, C e $E \geq 0.7$) as variáveis produtividade de colmos, rendimento bruto de açúcar e produção de biomassa seca das lâminas de 50 e 75% de reposição hídrica após a calibração das variedades na lâmina de 100%.

O modelo AquaCrop não simulou adequadamente a produtividade da água das variedades de cana-de-açúcar analisadas, apresentando índices estatísticos baixos, como índice de acurácia abaixo de 0,7, eficiência da modelagem negativa e o índice de concordância com valores próximos de zero. Provavelmente o algoritmo de quantificação de chuvas e irrigações efetivas do modelo AquaCrop (lâmina de água que fica retida na zona radicular das plantas) precise ser aprimorado, para poder calcular com mais precisão a produtividade da água (WP) deste modelo de simulação.

Referências

- ALENCAR, L. P. **Parametrização do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 133p, 2014.
- ANDRADE, C. L. T.; AMARAL, T. A.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; HEINEMANN, A. B.; GARCIA, A. G.; TOJO-SOLER, C. M.; SILVA, D. F.; HICKMANN, C.; SANTANA, C. B.; MOURA, B. F.; CASTRO, L. A. **Modelagem do crescimento de culturas: aplicações à cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. Documentos, 91.
- ASSENS, S.; EWERT, F.; ROSENZWEIG, C.; JONES, J.W.; HATFIELD, J.L.; RUANE, A.C.; BOOTE, K.J.; THORBURN, P.J.; ROTTER, R.P.; CAMMARANO, D.; BRISSON, N.; BASSO, B.; MARTRE, P.; AGGARWAL, P.K.; ANGULO, C.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; CHALLINOR, A.J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R.; HENG, L.; HOOKER, J.; HUNT, L.A.; INGWERSEN, J.; IZAURRALDE, R.C.; KERSEBAUM, K.C.; MULLER, C.; KUMAR, S.N.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.; OLESEN, J.E.; OSBORNE, T.M.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; RIPOCHE, D.; SEMENOV, M.A.; SHCHERBACK, I.; STEDUTO, P.; STOCKLE, C.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WALLACH, D.; WHITE, J.W.; WILLIAMS, J.R.; WOLF, J. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, London, v. 3, p. 827-832, 2013.
- BARROS, T. H. S. **Eficiência do uso da água em cana-de-açúcar irrigada por gotejamento com base em medições de trocas gasosas IRGA: fotossíntese e transpiração**. Dissertação

(Mestrado) – – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 109p, 2015.

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

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

COSTA, L.G.; MARIN, F.R.; NASSIF, D.S.P.; PINTO, H.M.S.; LOPES-ASSAD, M.L.R.C. Simulação do efeito do manejo da palha e do nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 5, p. 469-474, 2014.

DIAS, H. B. **Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil**. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 166p, 2016.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 139p. (Irrigation and Drainage paper, 33).

FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; STEDUTO P.; OWEIS, T. Y. “Parameterization and Evaluation of AquaCrop for Full and Deficit Irrigated Cotton,” **Agronomy Journal**, vol. 101, p. 469-476, 2009.

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

HENG, L.K.; HSIAO, T.C., EVETT, S.; HOWELL, T.; STEDUTO, P. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 488–498. 2009

HSIAO, T.C., HENG, L.K., STEDUTO, P., ROJAS-LARA, B., RAES, D., FERERES, E. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water III parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**. v.101, p. 448–459. 2009.

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

LEAL, D. P. V. **Parametrização do modelo CANEGRO (DSSAT) e caracterização biométrica de oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento**. Tese (Doutorado) – – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 238p, 2016.

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

LIZCANO, J. V. **Poder calorífico, energia e cinzas de biomassa de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, para diferentes variedades, lâminas e processos de maturação**. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 92p, 2015.

MABHAUDHI, T.; ALBERT T M.; YACOB, G.B. Parameterization and evaluation of the FAO-AquaCrop model for a South African taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) landrace. **Agricultural Forest Meteorology**. v.192. p.132–139. 2014.

MAGALHÃES, I. D.; LYRA, G. B.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; CAVALCANTE, C. A.; FERREIRA JUNIOR, R.A.; SOUZA, R. C. Physiology and Grain Yield of Common Beans under Evapotranspired Water Reposition Levels. **Irrigation and Drainage Systems Engineering**.v.6. p. 183-290. 2017.

MARIN, F.R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenário futuro baseado em simulações multimodelos**. 2014. 262p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

MARIN, F.R.; DE CARVALHO, G.L. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of Sao Paulo, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 149-156, 2012.

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

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G. Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. **Environmental Modelling and Software**, London, v. 72, p. 372–386, 2015.

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G.; REZENDE, A.S.; ANDRADE JUNIOR, A.S. Evaluation of APSIM-SUGAR and DSSAT-CANEGRO for widely grown brazilian sugarcane cultivar. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 28. , 2013. São Paulo. **Proceedings...** São Paulo, 2013.

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

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, p. 282-290, 1970.

NASSIF, D.S.P. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 92p. 2010.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; PALLONE, W.J.; RESENDE, R.S.; PELLEGRINO, G.Q. Parameterization and evaluation of the DSSAT/Canegro model for Brazilian sugarcane varieties. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 311-318, 2012.

Nations (FAO), 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-br244e.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2017.

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

OLIVEIRA, E.C.A. de; OLIVEIRA, R.I. de; ANDRADE, B.M.T. de; FREIRE, F.J.; LIRA JÚNIOR, M.A.; MACHADO, P.R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 9, p. 951-960, 2010.

OLIVEIRA, R. A. **Modelagem da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais**. Viçosa MG. Dissertação—(Mestrado), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 90p. 2010.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, New York, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

RACKL, M.; HANLEY, K. J. A methodical calibration procedure for discrete element models. **Powder Technology**, v. 307, p. 73-83, fev. 2017.

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

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual of AquaCrop (version 6.0): Annexes**. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2017.

RIBEIRO, N. L. **Eficiência nutricional e densidade radicular de oito variedades de cana-de-açúcar submetidas à irrigação por**. Dissertação (Mestrado) — Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 77p, 2016.

SALEMI H.; MOHD-SOOM, M. A.; LEE, T. S.; MOUSAVI, S.F.; GANJI, A. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. **African Journal Agricultural Research**. V.6: p2204–2215. 2011.

SANTOS, L. P. **Produção de biomassa e eficiência no uso da água para oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento em dois ciclos de cultivo**. Tese (Doutorado) — Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 195p, 2016.

SCARPARE, F.V. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST**. 2011. 163p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SILVA, R.F. da. **Calibração do modelo DSSAT/CANEGRO para cana-de-açúcar e seu uso para avaliação do impacto das mudanças climáticas**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 56p., 2012.

SMITH, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, p. 91-97, 2005.

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

STEDUTO, P.; RAES, D. HSIAO, T.C.; FERERES, E. AquaCrop: concepts, rationale and operation. In: **Crop Yield Response to Water**. Irrigation & Drainage paper vol. 66FAO, Rome, 2012.

STRICEVIC, R., COSIC, M., DJUROVIC, N., PEJIC, B., MAKSIMOVIC, L. Assessment of the FAO AquaCrop model in simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. **Agricultural Water Management**. v.98, p.1615–1621, 2011.

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

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

VIANNA, M. dos S.; SENTELHAS, P.C. Performance of DSSAT CSM-CANEGRO under operational conditions and its use in determining the ‘saving irrigation’ impact on sugarcane crop. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 17, p. 1-12, 2015.

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

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS DE CULTURA NO MODELO AQUACROP PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA E AÇÚCAR, E TRANSPIRAÇÃO

RESUMO

A análise de sensibilidade é fundamental para a compreensão e utilização de modelos matemáticos complexos pois garante a identificação de parâmetros de entrada mais relevantes que podem causar grandes alterações das variáveis resposta. Então, devido à importância e abrangência do uso da modelagem para a agricultura, teve-se por objetivo no presente estudo analisar o modelo AquaCrop para identificar entre os parâmetros densidade de plantas, coeficiente de crescimento do dossel (CGC), o coeficiente de declínio do dossel (CDC) e o coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{C_{Trx}}$), qual o mais sensível para a cultura da cana-de-açúcar. O parâmetro mais sensível às variações testadas foi o coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{C_{Trx}}$) seguido pelo coeficiente de crescimento do dossel (CGC), logo após o coeficiente de declínio da cultura (CDC) e por fim, a densidade de plantas. A redução do coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{C_{Trx}}$) proporcionou queda de até 50% na produtividade de colmos, rendimento bruto de açúcar e transpiração da cultura, enquanto a variação positiva proporcionou o aumento em até 5% dessas variáveis. No coeficiente crescimento do dossel (CGC) a redução no valor do parâmetro gerou diminuição de até 15% na produtividade de colmos e no rendimento bruto de açúcar e menos de 10% na transpiração da cultura ao mesmo tempo que o aumento do valor deste coeficiente não alterou mais que 5% estas variáveis. A variação do coeficiente de declínio da cultura (CDC) a diminuição no valor do parâmetro ocasionou um aumento de cerca de 1% na produtividade colmos e até 3% no rendimento bruto de açúcar e na transpiração da cultura. Na análise do parâmetro densidade de plantas a diminuição do valor do parâmetro ocasionou a redução de cerca de 3% na produtividade colmos e no rendimento bruto de açúcar e de cerca de 2% na transpiração da cultura.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Variáveis resposta; Modelagem; Parâmetros conservativos

ABSTRACT

Sensitivity analysis is fundamental for understanding and using complex mathematical models because it ensures the identification of the most relevant input parameters that can cause large changes in response variables. Therefore, due to the importance and scope of the use of modeling for agriculture, the objective of this study was to analyze the AquaCrop model to identify among the parameters plant density, canopy growth coefficient (CGC), canopy decline coefficient (CDC) and canopy full expansion coefficient ($K_{C_{Trx}}$), which is the most sensitive for sugarcane crop. The most sensitive parameter to the variations tested was the coefficient of the crop with complete expansion of the canopy ($K_{C_{Trx}}$) followed by the coefficient of growth of the canopy (CGC), right after the coefficient of decline of the crop (CDC) and finally, the density of plants. The reduction of the canopy growth coefficient ($K_{C_{Trx}}$) provided up to 50% drop in stalk productivity, raw sugar yield and crop perspiration, while the positive variation provided up to 5% increase in these variables. In the canopy growth coefficient (CGC) the reduction in the value of the parameter generated a decrease of up to 15% in the yield of stalks and raw sugar yield and less than 10% in the perspiration of the crop at the same time that the increase in the value of this coefficient did not change these variables more than 5%. The variation of the crop decline coefficient (CDC) and the decrease in the value of the parameter caused an increase of about 1% in stalk yield and up to 3% in raw sugar yield and crop transpiration. In the analysis of the density parameter of plants the decrease in the value of the parameter caused a reduction of about 3% in the stalk yield and raw sugar yield and about 2% in the transpiration of the crop.

Keywords: *Saccharum* spp.; Response variables; Modelling; Conservative parameters

3.1. Introdução

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

Os parâmetros envolvidos que descrevem as características resultantes dos dados de saída são responsáveis pela acurácia de um modelo. Assim a identificação dos parâmetros que mais influenciam os dados simulados é importante para reduzir as incertezas do resultado (ANDRIOLO et al., 2008; SALEMI et al., 2011). Os valores dos parâmetros de qualquer modelo estão sujeitos a alterações e erros (PANNELL, 1997).

A investigação das mudanças que podem ocorrer no processo de simulação é chamada de análise de sensibilidade. Logo, é a análise que avalia o impacto provocado na saída do modelo, o que ocorre por variações feitas nos dados de entrada do programa (MARSHALL, 1999; SILVA, 2002; ALMEIDA, 2013; LIEVENS, 2014). Consiste em alterar os valores dos parâmetros de maneira individual mantendo os demais fixos, verificando a influência das variáveis nos resultados de produtividade. Devem ser submetidas à análise as variáveis sensíveis à penalização da produtividade potencial da cultura.

Após a realização da análise de sensibilidade são obtidos os parâmetros mais sensíveis ao modelo, sendo estes na maioria das vezes utilizados no processo de calibração (BALTOKOSKI et al., 2010; CIBIN et al., 2010; XING et al., 2017). Com o ajuste dos parâmetros é possível obter o máximo da potencialidade do programa.

A literatura tem exemplos substanciais de modelos de simulação voltados ao planejamento de cultivos agrícolas. Dentre os inúmeros modelos recomendados, o AquaCrop tem obtido bons resultados em inúmeras situações experimentais (PIEKARSKI, 2017). O AquaCrop é um modelo de crescimento de culturas desenvolvido pela Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) e simula a resposta ao rendimento de culturas, é particularmente adequado para abordar condições em que a água é um fator chave limitante da produção agrícola (FAO, 2018). A principal vantagem do modelo é o menor número de

parâmetros de entrada necessários, sendo dados de fácil obtenção comparado aos demais como DSSAT e APSIM (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2012; PIEKARSKI, 2017).

Então devido à importância e abrangência do uso da modelagem para a agricultura, teve-se por objetivo no presente estudo analisar o modelo AquaCrop para identificar entre os parâmetros densidade de plantas, coeficiente de crescimento do dossel (CGC), o coeficiente de declínio do dossel (CDC) e o coeficiente de transpiração máxima da cultura ($K_{c_{Trx}}$), qual o mais sensível para a cultura da cana-de-açúcar.

3.2. Material e métodos

A partir das análises iniciais com a finalidade de calibração, utilizando-se os valores recomendados no Manual de Referência do AquaCrop (FAO, 2017), foi possível identificar os parâmetros mais sensíveis, que mereceriam maior atenção nas análises. Assim foram identificados e avaliados o coeficiente de crescimento do dossel (CGC), Coeficiente de declínio do dossel (CDC), Coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{c_{Trx}}$) e Densidade de plantas com avaliação da resposta do modelo para produção de biomassa fresca de colmos (TCH), produção de açúcar e transpiração. A sensibilidade dos parâmetros deve-se à sua participação nas principais equações que integram o AquaCrop.

Foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo AquaCrop alterando-se o valor de um parâmetro por vez e mantendo os demais inalterados, comparando o resultado em relação a condição padrão (base line), por meio da avaliação das variáveis de saída do modelo. A condição padrão utilizada foi gerada a partir da calibração para cada variedade de cana-de-açúcar, além dos dados meteorológicos monitorados em casa de vegetação durante o período experimental, considerando a lâmina de irrigação 100% da reposição hídrica, e com as características físico-hídricas do material de solo presente nas parcelas experimentais. Foram realizadas cerca de 400 simulações para obtenção dos dados necessários para esta análise.

Os valores iniciais do coeficiente de crescimento do dossel (CGC) e do coeficiente de declínio do dossel (CDC) foram 5.6 e 7.6, respectivamente, para todas as variedades em todas as lâminas.

Tabela 3.1. Valores iniciais dos parâmetros densidade de plantas e do coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{C_{Tx}}$).

CTC 15	CTC 17	RB 867515	RB 92579	RB 931011	RB 966928	IAC 955000	NCo 376
Densidade de plantas							
151115	146341	113333	136991	132175	118008	132175	141666
$K_{C_{Tx}}$							
1.50	1.30	1.20	1.50	1.50	1.22	1.50	1.00

3.3. Resultados e discussão

Na Figura 3.1 têm-se a resposta da variação do parâmetro de coeficiente crescimento do dossel (CGC) na produtividade de colmos frescos (TCH). Observa-se que com a redução em 50% do CGC a V6 teve a resposta mais significativa, com redução de cerca de 28 toneladas na produção de colmos, sendo uma diminuição de aproximadamente 15% na produtividade de colmos. A V3 e V4 tiveram a menor variação na produção de colmos, uma redução em torno de 13 toneladas. As variedades 7, e 1 tiveram redução da produção de colmos em torno de 20 toneladas quando se diminuiu em 50% o CGC. Quando houve o aumento do CGC a resposta na produção de colmos foi bem menos significativa com maior alteração para as variedades V2 e V3 com aumento em 50% do CGC, com redução da produção de colmos em 20 e 12 toneladas respectivamente. As demais variedades tiveram aumento ou redução próximos a zero.

Figura 3.1. Resposta da variação do parâmetro CGC na produtividade de colmos ($t\ ha^{-1}$) das variedades de cana-de-açúcar

Analisando o rendimento bruto de açúcar (Figura 3.2), a V6 teve redução em torno de 4 toneladas quando se reduziu em 50% o CGC, as demais tiveram redução entre 1 e 2

toneladas. Com o aumento do CGC o rendimento bruto de açúcar teve menor variação, com redução de cerca de 2 toneladas para V2, as demais tiveram redução de no máximo 1 tonelada.

Figura 3.2. Resposta da variação do parâmetro CGC para o rendimento bruto de açúcar ($t\ ha^{-1}$) das variedades de cana-de-açúcar

O impacto na transpiração total do ciclo da cultura pode ser observado na Figura 3.3. As maiores alterações ocorreram nas variedades 4, 5 e 6 que tiveram redução de 40 mm na transpiração em reposta a redução em 50% do parâmetro CGC. A variedades 2 teve redução na transpiração em torno de 35 mm quando se reduziu em 40% o CGC. Quando houve variação positiva do CGC somente as variedades 1, 5 e 7 não registraram redução na transpiração, com incremento de até 10 mm. A variedade 2 teve a maior redução na transpiração, cerca de 30 mm quando se aumentou em 50% o CGC. cerca de 25 mm para V2, V3, V4, V6 e V7, com 50% de aumento do CGC. A V6 registrou a menor variação na transpiração, uma redução de apenas 2 mm para o mesmo patamar de aumento do parâmetro.

Em termos gerais a transpiração é inversamente proporcional ao CGC, pois quanto maior o CGC mais tempo a cultura leva para atingir o máximo recobrimento do solo, e a cultura em menor estágio de desenvolvimento transpira menos.

Figura 3.3. Resposta da variação do parâmetro CGC na transpiração (mm) das variedades de cana-de-açúcar

Nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 têm-se a resposta da variação do parâmetro de coeficiente de declínio do dossel (CDC) na produtividade de colmos fresco (TCH), rendimento bruto de açúcar e transpiração, respectivamente. Comparado ao coeficiente de cobertura vegetal (CGC) o CDC teve menor impacto nas variáveis analisadas.

A V2 foi a mais sensível às alterações do CDC, observa-se que com a redução em 50% do CDC, ela teve uma redução de cerca de 10 toneladas ha^{-1} na produtividade de colmos, com exceção da V3 as demais variedades tiveram acréscimo na produtividade de colmos de até 3 toneladas ha^{-1} . Quando houve o aumento do CDC a resposta na produtividade de colmos foi negativa para todas as variedades com redução de cerca de 20 toneladas para V2. A V1 foi a menos sensível à variação positiva do CDC, com redução de 300 kg ha^{-1} na produtividade de colmos.

Figura 3.4. Resposta da variação do parâmetro coeficiente de declínio do dossel (CDC) na produtividade de colmos ($t\ ha^{-1}$) das variedades de cana-de-açúcar

Analisando o rendimento bruto de açúcar (Figura 3.5), a V2 teve redução cerca de 1 tonelada na produção, isso para variação -50% do CDC. A V1 foi a menos sensível a variação para todas as lâminas com acréscimo máximo em torno de 50 kg na produção de açúcar, quando a variação do CDC foi negativa. Quando a variação do parâmetro CDC foi positiva houve redução no rendimento bruto de açúcar, sendo a V2 e V3 foram as mais sensíveis a essa alteração com redução de cerca 1,5 ton ha^{-1} para a primeira e 800 kg para a segunda. As demais variedades tiveram redução em torno de 300 kg CDC no rendimento bruto de açúcar quando a se aumentou em 50% o coeficiente de declínio do dossel.

Figura 3.5. Resposta da variação do parâmetro coeficiente de declínio do dossel (CDC) para no rendimento bruto de açúcar ($t\ ha^{-1}$) das variedades de cana-de-açúcar

O impacto da variação do CDC na transpiração total do ciclo da cultura pode ser observado na Figura 3.6. A maior alteração ocorreu na variedade 2 que teve um aumento em cerca de 18 mm na sua transpiração total quando se variou o CDC em -50%, a variedade menos sensível a esta mesma alteração foi a V1, com 2 mm a mais transpirados. Quando a variação do CDC foi positiva houve redução na transpiração total em todas as lâminas. A V2 foi a mais sensível com redução de cerca de 28 mm quando a variação foi +50%. Assim como na variação negativa, a V1 também foi a menos sensível a alteração positiva do parâmetro.

O coeficiente de declínio do dossel (CDC) é um parâmetro que depende do cultivar e condições de campo em que a planta está inserida. O CDC controla o quão rápido o dossel senesce até o final do ciclo da cultura (ABENDIPOUR et al., 2012), dependendo, principalmente, da duração de cada estágio fenológico. O CDC se inicia um pouco mais tarde que o começo da senescência do dossel, devido à senescência iniciar-se geralmente nas folhas mais velhas, localizadas na parte inferior sombreada pela planta. Logo, o atraso ocorre porque as folhas mais velhas contribuem pouco à transpiração e fotossíntese. Desta forma, o começo da senescência da cultura no AquaCrop ocorre quando a transpiração do dossel e fotossíntese começar a declinar, quando a maturidade se aproxima (STEDUTO et al., 2009).

Figura 3.6. Resposta da variação do parâmetro coeficiente de declínio do dossel (CDC) na transpiração (mm) das variedades de cana-de-açúcar

Assim como o coeficiente de declínio do dossel (CDC), a variação na densidade de plantas (DP) teve menor impacto nas variáveis analisadas. Nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 têm-se a resposta da variação do parâmetro de coeficiente de declínio do dossel (CDC) na produtividade de colmos fresco (TCH), rendimento bruto de açúcar e transpiração,

respectivamente. A variedade 2 teve maior sensibilidade tanto quando a variação na densidade de plantas foi positiva quanto negativa para a variável resposta TCH. Houve redução de cerca 12 toneladas de colmos por hectare quando se reduziu em 50% a densidade de plantas. Quando houve variação positiva da densidade de plantas a produção de colmos por hectare teve redução de cerca de 10 toneladas ha^{-1} na variedade 2 e 8 toneladas ha^{-1} na variedade 3.

Figura 7. Resposta da variação do parâmetro densidade de plantas (DP) na produtividade de colmos (t ha^{-1}) das variedades de cana-de-açúcar

No rendimento bruto de açúcar (Figura 3.8), a V2 teve maior sensibilidade tanto para variação positiva quanto para a variação negativa da densidade de plantas, com redução de 1 t ha^{-1} de açúcar na variação -50% e na variação +50%. As demais tiveram reduções próximas a zero, com exceção da V3 que teve redução de cerca de 600 kg ha^{-1} com +50% do CDC e com -50% do CDC.

Figura 3.8. Resposta da variação do parâmetro densidade de plantas (DP) no rendimento bruto de açúcar ($t\ ha^{-1}$) das variedades de cana-de-açúcar

Na Figura 3.9 observa-se a resposta da variação da densidade de plantas na transpiração total das variedades de cana-de-açúcar. Quando se reduziu a densidade de plantas em até 50% a variação na transpiração das variedades oscilou entre a redução de até 8 mm e de acréscimo de até 5mm. Quando a variação da densidade de plantas foi positiva houve aumento na transpiração total em todas as lâminas. A V2 foi a mais sensível com aumento de cerca de 10 mm quando a variação foi +50%.

Segundo Oliveira (2018), a densidade de plantas é um parâmetro dependente do manejo praticado no local de cultivo. A população de plantas acima do considerado ideal, ocasiona competitividade entre elas e menor produção. Por outro lado, menor população proporciona maior exposição da superfície do solo e maior perda de água do solo por evaporação. Dois parâmetros são afetados diretamente pela densidade de plantas: o coeficiente de máxima cobertura do dossel (CC_x) e o coeficiente de cobertura inicial do dossel com 90% de emergência de plantas (CC_o), ambos importantes para determinar a máxima cobertura do dossel em ótimas condições (CC) no decorrer do ciclo da cultura, cada qual em seu momento.

Figura 3.9. Resposta da variação do parâmetro densidade de plantas (DP) na transpiração (mm) das variedades de cana-de-açúcar

Na Figura 3.10, 3.11 e 3.12, tem-se a resposta da variação do Coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{c_{Trx}}$) na produtividade de colmos, no rendimento bruto de açúcar e na transpiração, respectivamente, das 8 variedades estudadas. Diferentemente dos outros parâmetros analisados que tiveram alterações menos significativas nas variáveis respostas, a variação do $K_{c_{Trx}}$, principalmente negativa, causou a redução severa na produtividade de colmos, rendimento bruto de açúcar e transpiração total da cultura, redução na ordem de até 50%.

A variedade 2 teve maior redução na produtividade de quando a variação do $K_{c_{Trx}}$ foi negativa, cerca de 140 toneladas ha^{-1} , isso com redução em 50% do valor do $K_{c_{Trx}}$. A variedade menos sensível a variação negativa do parâmetro foi a 1, com redução de 70 toneladas ha^{-1} . Quando a variação do $K_{c_{Trx}}$ foi positiva houve incremento na produtividade de colmos para todas as lâminas e variedades, mas não ultrapassando as 15 toneladas ha^{-1} .

Figura 3.10. Resposta da variação do parâmetro de coeficiente da cultura com completa expansão do dossel (K_{cTrx}) na produtividade de colmos ($t\ ha^{-1}$) das variedades de cana-de-açúcar

No rendimento bruto de açúcar quando se reduziu o K_{cTrx} as variedades 2 e 5 foram as mais sensíveis (Figura 3.11), com diminuição de cerca de 12 toneladas ha^{-1} , uma redução de cerca de 50% no rendimento de açúcar, respectivamente, com variação -50%. A variedade menos sensível a redução do parâmetro foi a V8 e V7 com diminuição no rendimento de açúcar em torno de 7 toneladas ha^{-1} .

Quando a variação do K_{cTrx} foi positiva houve incremento no rendimento de açúcar. Todas as variedades tiveram comportamento semelhante, com aumento máximo de 1 tonelada ha^{-1} no rendimento de açúcar.

Figura 3.11. Resposta da variação do parâmetro de coeficiente da cultura com completa expansão do dossel (K_{cTrx}) no rendimento bruto de açúcar ($t\ ha^{-1}$) das variedades de cana-de-açúcar

Quanto a transpiração total do ciclo da cultura (Figura 3.12), como em todas as variáveis analisadas a maior alteração ocorreu quando se reduziu em 50% o valor do $K_{c_{Trx}}$. As variedades 1, 2 e 4 foram a mais sensível, com redução de cerca de 60 mm. A V8 e V5 tiveram a menor variação na transpiração entre todas as variedades, transpirando 360 mm a menos. Com a variação positiva do $K_{c_{Trx}}$ a transpiração da cultura teve menor alteração, a V2 teve um acréscimo de 100 mm na transpiração total com a variação +20.

Figura 12. Resposta da variação do parâmetro de coeficiente da cultura com completa expansão do dossel ($K_{c_{Trx}}$) na transpiração (mm) das variedades de cana-de-açúcar

O $K_{c_{Trx}}$ é um fator que indica quando a cultura apresenta expansão completa do dossel ($CC_x=1$) e não está em condição de estresse (STEDUTO et al., 2012). É um parâmetro conservativo e aproximadamente equivalente ao coeficiente basal da cultura na meia estação nos casos de completa expansão do dossel (RAES et al., 2012; DALLA MARTA et al., 2016).

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

Depois que a cobertura máxima do dossel (CC_x) é alcançada e antes do início da senescência, o dossel envelhece lentamente e sofre uma redução progressiva, embora pequena, na transpiração e na capacidade fotossintética. Isso é simulado pela aplicação de

um coeficiente de envelhecimento (f_{age}) que diminui Kc_{Trx} em uma fração constante e leve (por exemplo, 0,3%) por dia. Após o início da senescência, a transpiração e a capacidade fotossintética do dossel diminuem mais acentuadamente com o tempo (STEDUTO et al., 2012).

3.4. Conclusões

O parâmetro do modelo AquaCrop (FAO) mais sensível às variações testadas na análise de sensibilidade do modelo foi o coeficiente da cultura com completa expansão do dossel (Kc_{Trx}) seguido pelo coeficiente de crescimento do dossel (CGC), logo após o coeficiente de declínio da cultura (CDC) e por fim, a densidade de plantas.

A redução do coeficiente da cultura com completa expansão do dossel (Kc_{Trx}) proporcionou redução de até 50% na produtividade de colmos, rendimento bruto de açúcar e transpiração da cultura, enquanto a variação positiva proporcionou o aumento em até 5% dessas variáveis.

No coeficiente crescimento do dossel (CGC) a redução no valor do parâmetro gerou diminuição de até 15% na produtividade de colmos e no rendimento bruto de açúcar e menos de 10% na transpiração da cultura ao mesmo tempo que o aumento do valor deste coeficiente não alterou mais que 5% estas variáveis.

A variação do coeficiente de declínio da cultura (CDC) a diminuição no valor do parâmetro ocasionou um aumento de cerca de 1% na produtividade colmos e até 3% no rendimento bruto de açúcar e na transpiração da cultura.

Na análise do parâmetro densidade de plantas a diminuição do valor do parâmetro ocasionou a redução de cerca de 3% na produtividade colmos e no rendimento bruto de açúcar e de cerca de 2% na transpiração da cultura.

Referências

- ABENDIPOUR, M.; SARANGI, A.; RAJPUT, T. B. S.; SINGH, M.; PATHAK, H.; AHMAD, T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 110, p. 55-66, jul. 2012.
- ALMEIDA, A. T. **Processos de decisões nas organizações**: Construindo modelo de decisão multicritério. 1ª Edição. São Paulo: Atlas, 2013. 256 p.

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

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

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

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

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

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

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

OLIVEIRA, C. T. de. **Modelo AquaCrop: calibração, validação e uso para soja e milho na região dos Campos Gerais**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Curitiba, 2017.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4. APLICAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES REGIÕES DE CULTIVO BRASILEIRAS

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas agrícolas no Brasil. A expansão deste cultivo tem ocorrido em áreas antes ocupadas por pastagens degradadas principalmente, e em locais com considerável deficiência hídrica, como nas regiões centro-oeste e nordeste do Brasil. Assim o objetivo deste estudo foi aplicar o modelo AquaCrop para simulação da produtividade de cana-de-açúcar para diferentes localidades brasileiras, e estimar a lâmina de irrigação necessária para atingir produtividade máxima em cada localidade. O modelo AquaCrop mostrou-se eficiente na simulação da produtividade atingível de cana-de-açúcar em diferentes regiões do Brasil, podendo ser utilizado para auxiliar em pesquisa que visam o incremento da produtividade da cultura nas regiões. Houve superestimativa da produtividade em pelo menos metade das regiões estudadas, assim a introdução de um fator de correção da produtividade de colmos da cana-de-açúcar pode propiciar melhor estimativa da produtividade da cana-de-açúcar. O incremento da produtividade de colmos da cana-de-açúcar com uso da irrigação tanto nas regiões com boa distribuição de chuvas quanto nas regiões com distribuição inadequada, mostra que a prática da irrigação nesta cultura tem grande potencial de expansão nas áreas de cultivo brasileiras e fornece informações preciosas para o planejamento da agricultura irrigada. As regiões nordestinas foram as mais responsivas à irrigação, com incremento superior a 1000% na produtividade de colmos da cana-de-açúcar na região de Petrolina-PE e lâmina de irrigação necessária em torno de 1700 mm, e em Aracaju-SE o incremento na produtividade foi superior a 100% com lâmina média de irrigação inferior a 800 mm. A região de Jataí-Go e Paranaíba-MS também apresentaram incremento na produtividade superior a 80% para lâminas entre 500 e 600 mm.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Modelagem agrícola; Déficit hídrico; Irrigação

ABSTRACT

The sugarcane is one of the main agricultural crops in Brazil. The expansion of this crop has occurred in areas previously occupied by degraded pastures mainly, and in places with considerable water deficiency, such as in the center-west and northeast regions of Brazil. Thus, the objective of this study was to apply the AquaCrop model for simulating sugarcane yields for different Brazilian locations, and to estimate the irrigation blade needed to reach maximum yields in each location. The AquaCrop model presented satisfactory performance in estimating sugarcane yields in different regions of Brazil and can be used to assist in research aimed at increasing crop yields in the regions. There was overestimation of productivity in at least half of the regions studied, so the introduction of a sugarcane stalk productivity correction factor may provide a better estimate of sugarcane productivity. The increase in sugarcane stalks productivity using irrigation both in regions with good rainfall distribution and in regions with inadequate distribution, shows that the practice of irrigation in this crop has great potential for expansion in the Brazilian cultivation areas and provides precious information for the planning of irrigated agriculture. The Northeastern regions were the most responsive to irrigation, with an increase of more than 1000% in sugarcane stalks yield in the Petrolina-PE region and the required irrigation blade around 1700 mm, and in Aracaju-SE the increase in yield was more than 100% with an average irrigation blade of less than 800 mm. The region of Jataí-Go and Paranaíba-MS also presented an increase in productivity superior to 80% for blades between 500 and 600 mm.

Keywords: *Saccharum* spp.; Agricultural modeling; Water deficit; Irrigation

4.1. Introdução

O processo de validação do modelo ocorre após a parametrização deste e é realizado por meio de testes do modelo parametrizado em outros locais ou/e épocas em conjunto com estatísticas a fim de determinar se tal calibração é representativa. Arroio Jr (2016) citando Rykiel Júnior (1996) afirma que a validação é a comprovação de que um modelo dentro de seu domínio de aplicabilidade representa de forma compatível e satisfatória os resultados esperados pelo modelo. Neste contexto, em modelos de crescimento, como o AquaCrop, a validação testa assim a habilidade do modelo em simular tanto flutuações a curto prazo no crescimento quanto em produzir corretas estimativas no final do ciclo da cultura (ALENCAR, 2014).

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

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

Devido à grande variabilidade nos níveis de produtividade da cana-de-açúcar ao longo dos cortes e entre as regiões produtoras, estimações e previsões de produtividade de colmos e de sacarose são valiosas para o planejamento e para as tomadas de decisão no setor sucroenergético (LISSON et al., 2005; BEZUIDENHOUT et al., 2007; EVERINGHAM et al., 2009; BOCCA et al., 2015).

Para a cultura da cana-de-açúcar há diversos modelos de simulação, com destaque para os modelos mecanísticos sul-africano DSSAT/CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002) e australiano APSIM-Sugarcane (KEATING et al., 1999) que, embora desenvolvidos de maneira independente, apresentam origens similares (O'LEARY et

al., 2000). O modelo da Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO, DOORENBOS; KASSAM, 1979) é um modelo mais simples em estrutura (processos simulados e parâmetros) do que os demais supramencionados, contudo tem apresentado resultados satisfatórios para estudos agrometeorológicos para a cana-de-açúcar no Brasil (GOUVÊA et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2012; MARIN; CARVALHO, 2012; MONTEIRO; SENTELHAS, 2014).

O AquaCrop vem sendo utilizado para fins de zoneamento agroclimático e manejo da irrigação, uma vez que o manejo e o uso correto que vise complementar ou suplementar à demanda hídrica da cultura pode resultar em maiores produtividades (ÁVILA et al., 2010; SALES et al., 2017). O modelo AquaCrop necessita de 33 parâmetros relacionados a cultura, porém alguns desses parâmetros são de simples obtenção, sendo que alguns desses estão relacionados ao manejo da cultura. O uso de modelos de crescimento de culturas é crucial para a otimização das práticas agrícolas.

Assim o objetivo deste estudo foi aplicar o modelo AquaCrop na simulação da produtividade de cana-de-açúcar para diferentes localidades brasileiras, e estimar a lâmina de irrigação necessária em cada localidade.

4.2. Material e métodos

Para aplicação do modelo AquaCrop optou-se por utilizar os mesmos dados de algumas localidades utilizadas por Dias (2016) na estimativa da quebra de produtividade (yield gap) de colmos da cultura da cana-de-açúcar com base no uso do modelo DSSAT/Canegro, APSIM-Sugarcane e MZA FAO. A Tabela 4.1 apresenta as coordenadas geográficas de cada local, a fonte dos dados meteorológicos dessas localidades e uma breve caracterização agroclimática, em função dos valores anuais médios de temperatura do ar, chuva, deficiência hídrica e excedente hídrico. Foram utilizados dados dos anos 2006 a 2017.

Tabela 4.1 – Localidades empregadas no estudo da produtividade de colmos da cultura da cana-de-açúcar no Brasil e suas respectivas coordenadas geográficas, altitude, temperatura média anual (Tmed), precipitação pluviométrica anual média (P), deficiência hídrica anual média (DH) e excedente hídrico anual médio (EXC)*

Local	Latitude (graus e décimos)	Longitude	Altitude (m)	Tmed (°C)	P	DH ¹ (mm)	EXC ¹
Piracicaba, SP	-22,71	-47,42	580	22,3	1261	469	425
Jaú, SP	-22,28	-48,56	580	22,7	1203	468	563
Presidente Prudente, SP	-22,11	-51,38	436	24,2	1373	550	416
Ribeirão Preto, SP	-21,28	-47,80	621	23,0	1256	510	587
Andradina, SP	-21,00	-51,10	400	24,6	1258	599	367
Maringá, PR	-23,40	-51,91	542	23,0	1552	402	606
Paranaíba, MS	-19,75	-51,18	331	25,1	1287	664	505
Uberaba, MG	-19,73	-47,95	737	23,4	1345	599	704
João Pinheiro, MG	-17,70	-46,16	760	24,0	1210	833	559
Jataí, GO	-17,88	-51,71	663	23,9	1389	551	691
Pirenópolis, GO	-15,85	-48,96	740	24,3	1448	634	793
Petrolina, PE	-9,36	-40,46	370	27,3	441	1479	58
Aracaju, SE	-10,95	-37,04	5	26,3	893	923	363
Areia, PB	-6,97	-35,68	575	23,6	912	664	543

¹obtido pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), com evapotranspiração de referência calculada por Priestley e Taylor (1972) e capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, na escala de cálculo diária

*Adaptado de Dias (2016)

Toda a metodologia resumidamente aqui descrita sobre a obtenção dos dados agrometeorológicos e de solo resumidamente foi descrita e realizada por Dias (2016). Para maiores detalhes consultar a Tese de Doutorado do referido autor.

Segundo Dias (2016), os dados de PR de colmos da cultura da cana-de-açúcar para as diferentes localidades foram obtidos junto ao banco de dados de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016) para os anos de 1993 a 2012, correspondendo às safras de 1994/95 a 2013/14, totalizando 20 anos de dados. Para cada local considerado, o dado de produtividade de cada ano foi a média dos dados dessa localidade e dos municípios limítrofes, situados na mesma microrregião, desde que apresentassem séries históricas maiores do que 10 anos. Esse procedimento foi adotado para que discrepâncias observadas na série de dados fossem minimizadas.

Os dados meteorológicos de cada localidade (temperaturas máxima e mínima do ar, precipitação, radiação solar global ou insolação) foram obtidos das estações meteorológicas do INMET, INPE, CIIAGRO, ANA e ESALQ-USP. Quando da ausência de dados de radiação solar global, essa variável foi estimada a partir do método de Angström-Prescott, quando os dados de insolação estavam disponíveis, ou pelo método de Hargreaves, quando haviam apenas dados de temperatura do ar, conforme recomendações de Allen et al. (1998). As falhas de

temperatura nas séries de dados foram corrigidas da seguinte forma: i) falhas menores ou iguais a três dias - interpolação linear entre os dados dos dias anterior e posterior ao período faltante; e ii) falhas maiores do que três dias - preenchimento com dados do sistema NASA/POWER (<http://power.larc.nasa.gov>). As poucas falhas de chuva foram preenchidas com dados das estações pluviométricas da ANA, adotando-se o critério da estação mais próxima.

Como foram utilizadas localidades em diferentes regiões do país, nem sempre os perfis de solos, requeridos estavam disponíveis. Para representar um solo com baixa disponibilidade hídrica, foi utilizado o perfil de um Neossolo Quartzarênico, com disponibilidade hídrica de 0,56 mm água cm⁻¹ de solo. Já para um solo com média disponibilidade hídrica, foi utilizado um perfil de um Latossolo de textura média, com 0,88 mm cm⁻¹. Por fim, um perfil de Latossolo de textura muito argilosa, com 1,51 mm cm⁻¹, foi utilizado para representar um solo de alta disponibilidade hídrica. A Tabela 4.2 apresenta as principais características físico-hídricas dos três solos utilizados. Os valores da CAD utilizados foram de 56, 88 e 151 mm para representar respectivamente os solos com baixa, média e alta disponibilidade hídrica. Os valores do número da curva (do inglês, Curve Number) foram 61 para o Neossolo Quartzarênico, e 76 para os Latossolos.

O fator de enraizamento pode ser encontrado para cada tipo de solo e suas camadas na Tabela 4.3 Tal fator determina o crescimento das raízes em cada camada do solo e é calculado pelo DSSAT de acordo com as características físico-hídricas de cada perfil. O crescimento das raízes está diretamente relacionado a este fator de desenvolvimento das raízes, o que irá influenciar o potencial de absorção de água da planta e, portanto, a penalização da produtividade pela deficiência hídrica.

Tabela 4.2 – Características físico-hídricas dos solos empregados neste estudo com baixa (Neossolo Quartzarênico), média (Latossolo de textura média) e alta (Latossolo de textura muito argilosa) disponibilidade hídrica*

Prof. (cm)	Horiz -	Areia -----	Silte (%)-----	Argila -----	Ds ⁽¹⁾ (g cm ⁻³)	PMP ⁽²⁾ -----	CC ⁽³⁾ (cm ³ cm ⁻³)-----	θ _s ⁽⁴⁾ -----	Ksat ⁽⁵⁾ (cm h ⁻¹)	CAD ⁽⁶⁾ (mm)
Neossolo Quartzarênico										
0-6	Ah ₁	93	4	3	1,40	0,028	0,111	0,430	31,38	5,0
0-19	Ah ₂	95	3	2	1,48	0,025	0,093	0,408	43,05	8,8
19-50	Ah ₃	96	2	2	1,46	0,020	0,070	0,410	40,45	15,5
50-75	AC	96	2	2	1,53	0,021	0,090	0,394	43,40	17,3
75-150	C	94	3	3	1,57	0,030	0,080	0,360	51,92	37,5
Latossolo de textura média										
0-28	Ah	82	3	15	1,55	0,040	0,171	0,378	5,95	36,7
28-56	BA ₁	76	4	20	1,38	0,100	0,180	0,420	8,41	22,4
56-85	BA ₂	75	5	20	1,32	0,100	0,180	0,420	9,85	23,2
85-165	Bw	72	5	20	1,36	0,110	0,190	0,420	7,54	64,0
Latossolo de textura muito argilosa										
0-30	A	16	8	76	1,14	0,256	0,405	0,541	0,45	44,7
30-60	BA	12	11	77	1,21	0,236	0,388	0,519	0,45	45,6
60-150	Bw	13	10	77	1,26	0,236	0,388	0,507	0,38	136,8

(1) Densidade do solo; (2) Ponto de murcha permanente (-1500 kPa); (3) Capacidade de campo (-10 kPa); (4) Ponto de saturação medido; (5) Condutividade hidráulica saturada; (6) Capacidade de água disponível

* Adaptado de Dias (2016)

Tabela 4.3 – Fator de enraizamento dos solos empregados neste estudo, considerando-se baixa (Neossolo Quartzarênico), média (Latossolo de textura média) e alta (Latossolo de textura muito argilosa) disponibilidade hídrica*

Neossolo Quartzarênico		Latossolo de textura média		Latossolo de textura muito argilosa	
Prof. (cm)	Fator	Prof. (cm)	Fator	Prof. (cm)	Fator
0-6	1	0-28	1	0-30	1
0-19	1	28-56	0,43	30-60	0,41
19-50	0,5	56-85	0,24	60-150	0,12
50-75	0,29	85-165	0,08	-	-
75-150	0,08	-	-	-	-

* Adaptado de Dias (2016)

Como não se dispunha de informações do tipo e características físico-hídricas dos solos de cada localidade estudada, foi realizada uma avaliação visando a determinar a proporção de solos com baixa, média e alta disponibilidade hídrica para cada uma delas. Por meio de um Sistema de Informações Geográficas (*QuantumGis*®) foi realizado um “buffer” de 100 km em torno da localização geográfica das estações de estudo junto ao mapa de solos de textura do *RadamBrasil* (BRASIL, 1981) para verificar quais os tipos de solos existentes e determinar, a partir daí, a proporção de solos com baixa, média e alta disponibilidade hídrica. A proporção das classes de disponibilidade hídrica para cada localidade é apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Proporção de solos com baixa, média e alta disponibilidade hídrica para as localidades empregadas no estudo de quebra de produtividade da cana-de-açúcar no Brasil*

Local	Disponibilidade hídrica dos solos		
	Baixa	Média	Alta
Piracicaba, SP	0,16	0,44	0,40
Jaú, SP	0,17	0,47	0,36
Presidente Prudente, SP	0,15	0,54	0,31
Ribeirão Preto, SP	0,17	0,47	0,36
Andradina, SP	0,15	0,53	0,32
Maringá, PR	0,16	0,43	0,41
Paranaíba, MS	0,03	0,55	0,42
Uberaba, MG	0,00	0,50	0,50
João Pinheiro, MG	0,17	0,47	0,36
Jataí, GO	0,17	0,47	0,36
Pirenópolis, GO	0,00	0,57	0,43
Petrolina, PE	0,21	0,57	0,22
Aracaju, SE	0,22	0,62	0,16
Areia, PB	0,53	0,47	0,00

*Adaptado de Dias (2016)

De posse dos dados citados acima foram simulados a produtividade das variedades brasileiras CTC 15 (V1), CTC 17 (V2), RB 867515 (V3), RB 92579 (V4), RB 931011 (V5), RB 966928 (V6), IAC 955000 (V7) e a variedade NCO 376 (Sul-Africana) (V8), previamente calibradas em condições ótimas de cultivo (L100) (como descrito no Cap. 1 deste documento) no AquaCrop. Como o modelo foi avaliado com dados operacionais e em ótimas condições de manejo, o valor obtido foi considerado como o máximo econômico explorável para as regiões.

Para cada local e tipo de solo (baixa, média e alta disponibilidade hídrica) foram simuladas canas de 12 meses, com plantios no primeiro dia de cada mês. Para Aracaju-SE e Areia-PB foram consideradas as canas colhidas de setembro a março, visto que os meses mais chuvosos se concentram no outono e inverno no litoral nordestino. Para as demais localidades foram consideradas canas colhidas de abril a dezembro, período que corresponde à safra regular da cana-de-açúcar. Foi utilizada a mesma proporção de cana para cada mês de colheita, assim sendo, o valor estimado final foi considerado como a média aritmética dos meses de colheita considerados. Após essa etapa, foi realizada a ponderação mediante proporção de cada tipo de solo e obtido o valor final de produtividade para cada variedade.

Para avaliar o desempenho do modelo, foram utilizados os seguintes indicadores estatísticos: Erro médio (EM), raiz quadrada do erro médio (RQEM), erro absoluto médio (EAM) e seu percentual (EAMP), o coeficiente de determinação (R^2 índice de concordância ou acurácia (d) (WILLMOTT, 1985), índice de eficiência de modelagem (E) (NASH: SUTCLIFFE,

1970) e índice de confiança (C) (CAMARGO & SENTELHAS, 1997). As equações dos indicadores supramencionados são apresentadas a seguir:

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

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

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

$$R^2 = \frac{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n [(Est_i - \overline{Obs_i}) \times (Obs_i - \overline{Obs})]}{\left[\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (Est_i - \overline{Est})^2 \right] \times \left[\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (Obs_i - \overline{Obs})^2 \right]}$$

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

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Est_i - Obs_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Obs_i - \overline{Obs})^2}$$

$$C = \sqrt{R^2} \times d$$

em que: Est_i e Obs_i são respectivamente as produtividades de colmos estimada e observada ($t\ ha^{-1}$); $\overline{Est}$ e $\overline{Obs}$ são respectivamente as médias das produtividades de colmos estimada e observada ($t\ ha^{-1}$); n é o número de observações.

Também foi simulado no AquaCrop a produtividade potencial e a lâmina de irrigação necessária para o ciclo da cana-de-açúcar de 12 meses nas regiões de Aracaju-SE, Jataí-Go, Maringá-PR, Petrolina-PE, Piracicaba-SP, Paranaíba-MS e Ribeirão Preto-SP para as variedades RB 867515, RB 92579, RB 966928 e NCO 376. Sendo que o sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento e a irrigação seria realizada assim que a CAD reduzisse em 30%. Foram

realizadas em torno de 101 mil simulações para obtenção dos resultados apresentados a seguir.

4.3. Resultados e discussão

A Figura 4.1 apresenta os resultados da comparação entre a produtividade observada (PR estimada pelo IBGE) e a produtividade atingível simulada pelo AquaCrop para diferentes localidades e épocas de plantio em sequeiro para avaliação da calibração previamente realizada em condições ótimas de cultivo. O modelo teve desempenho mediano, com precisão abaixo do 50%, na simulação da produtividade de colmos o EAM foi superior a 25 t ha^{-1} e o RQEM ficou em 33 t ha^{-1} , o índice de acurácia (d) ficou abaixo de 0,65 e índice de confiança foi inferior a 0.5. O modelo acabou por superestimar a produtividade na maioria dos locais, como podemos observar nas Tabelas 5.1 e 5.2.

O modelo AquaCrop não simula perdas por manejo inadequado da cultura, como manejo inadequado de plantas daninhas, pragas, doenças, deficiência nutricional, isoporização por florescimento, compactação de solo, falha populacional na área entre outros, devido a isso a produtividade real informada pelo IBGE é sempre menor que a produtividade simulada, o que explica as diferenças observadas nos dados obtidos.

Os resultados encontrados são similares a estudos utilizando o modelo DSSAT/CANEGRO para a produtividade de colmos nas condições agroclimáticas brasileiras (NASSIF et al., 2012; MARIN et al., 2013, 2015; VIANNA; SENTELHAS, 2015) em termos de precisão e acurácia. Entretanto, os valores RQEMs são maiores ou semelhantes. Singels et al. (2010) obtiveram RQEM de $29,8 \text{ t ha}^{-1}$ para simulações com o DSSAT/CANEGRO para diversas cultivares em experimento conduzido nas condições de Piracicaba, SP.

Dias (2016), avaliando o modelo APSIM-Sugarcane para estimativa da produtividade de cana-de-açúcar em diferentes regiões brasileiras obteve REQM inferior a 20 t ha^{-1} , $R^2=0,57$, e índice de acurácia (d) acima de 0,85, sendo o RQEM encontrado similar ou menor aos encontrados em estudos utilizando esse modelo APSIM-Sugarcane para as condições agroclimáticas brasileiras (MARIN et al., 2013, 2015; COSTA et al., 2014), no entanto, a precisão e a acurácia foram ligeiramente inferiores.

Figura 4.1 – Relação entre a produtividade de colmos real (IBGE) e a produtividade atingível simulada pelo modelo AquaCrop das variedades de cana planta de 12 meses em diversas localidades brasileiras.

Na tabela 4.5 encontra-se os valores de produtividade média de colmos real (PR) e a produtividade atingível simulada pelo AquaCrop para variedades de cana-de-açúcar em diferentes localidades do Brasil. Houve superestimativa da produção pelo modelo para 13 das 14 regiões estudadas, por ordem de magnitude são elas: Areia-PB (119%), Maringá-PR (79%), Jataí-GO (69%), Piracicaba-SP (64%), Presidente Prudente-SP (62%), Jaú-SP (44%), Ribeirão Preto-SP (43%), Aracaju-SE (14%), Paranaíba-MS (12%), Andradina-SP (6%) e Uberaba-MG (5%), Nas outras 3 regiões houve subestimativa, as quais: Petrolina-PE (43%), João Pinheiro (9%), e Pirenópolis-GO (1%).

Como pode-se observar na Tabela abaixo a melhor estimativa da produtividade de colmos pelo modelo foi observada para a região de Pirenópolis-GO, onde a diferença média entre produtividade real e a produtividade estimada pelo AquaCrop das variedades ficou abaixo de 2 t ha⁻¹. As variedades NCO 376 e RB 867515 tiveram a maior diferença observada com subestimativa em cerca de 18% para a primeira e de 12% para a segunda, A variedade CTC 17 teve a melhor estimativa de produção com diferença positiva de apenas 130 kg ha⁻¹ em relação a produtividade de colmos real.

Para a região de Andradina-SP o modelo superestimou a produtividade de colmos das variedades em média em 6% (6 t ha⁻¹), com destaque para a variedade IAC 955000 que teve produtividade superestimada em 14% (13 t ha⁻¹), seguida pela variedade CTC 17 com 12% (11 t ha⁻¹), a variedade RB 867515 teve a melhor previsão de produção com diferença de apenas 200 kg entre a produtividade real e a produtividade estimada pelo AquaCrop,

Para a região de Areia-PB, houve superestimativa da produção pelo modelo para todas as variedades estudadas, em média 119% (45 t ha^{-1}). A variedade IAC 955000 teve a maior diferença entre a produtividade real e a estimada cerca de 32 toneladas o que representa uma produção 136% maior. Na região de Aracaju-SE o modelo subestimou em cerca de 14% a produtividade de colmos.

Na região de Jataí-GO também houve superestimativa da produtividade de colmos obtida via AquaCrop para as variedades analisadas, em média 69% (39 t ha^{-1}). A variedade CTC 15 teve a maior diferença com superestimativa acima de 85%. Na região de Jaú o modelo superestimou em média em 37 t ha^{-1} (44%) a produção das variedades, e a variedade CTC 15 teve a produção superestimada em 54% (45 t ha^{-1}) nesta região.

A validação do modelo para a região de João Pinheiro-MG foi a segunda melhor em termos de estimativa de produção de colmos, o modelo subestimou a produtividade de colmos em média em 9% (7 t ha^{-1}). A variedade NCo 376 obteve a maior diferença entre a produção real e a estimada pelo modelo, cerca de 14 t ha^{-1} de colmos a menos, enquanto isso a estimativa da produtividade da variedade IAC 955000 foi 2 t ha^{-1} menor. Na região de Uberaba a produtividade da variedade IAC 955000 foi superestimada em cerca de 45% (41 t ha^{-1}), enquanto as variedades RB 966928, RB 931011, RB 92579, CTC 17 e CTC 15 a produção estimada foi menos de 10% superior a real. Para as variedades RB 867515 e NCo 376 a produtividade foi subestimada em 6% para a primeira e 12% para a segunda.

Na região da Maringá-PR o AquaCrop superestimou a produtividade para todas as variedades em cerca de 78% (64 t ha^{-1}). A variedade NCo 376 teve produção superestimada de 39 t ha^{-1} e a variedade RB 92579 em 84 t ha^{-1} , representando os extremos para a região. A validação do modelo para a região de Paranaíba apresentou superestimativa máxima de 17 t ha^{-1} (21%) para a variedade IAC 95500, e mínima de 300 kg ha^{-1} (<0,5%) para a variedade NCo 376.

Para a região de Petrolina-PE o AquaCrop subestimou a produção da cana-de-açúcar em média em 43% (9 t ha^{-1}). As regiões de Piracicaba e Presidente Prudente no estado de São Paulo tiveram superestimativa da produção pelo modelo, cerca de 52% para a primeira e 47% para a segunda, representando em torno de 50 toneladas. A variedade CTC 15 teve a pior estimativa com produção superior 62 t ha^{-1} a produção real. Na região de Ribeirão Preto-SP o AquaCrop superestimou em cerca de 43% (33 ton ha^{-1}), a variedade NCo 376 teve a menor diferença entre a produtividade real e a estimada, 17 t ha^{-1} .

Tabela 4.5 – Produtividade real média de colmos de cana de açúcar (PR-IBGE) e produtividade atingível simulada pelo AquaCrop para variedades de cana-de-açúcar em diferentes localidades do Brasil

Local	CTC 15	CTC 17	RB 867515	RB 92579	RB 931011	RB 966928	IAC 955000	NCo 376	Média	PR
-----ton ha ⁻¹ -----										
Andradina, SP	101,57	95,63	90,20	99,63	97,67	97,87	103,03	85,30	96,36	90,40
Aracaju, SE	79,50	75,17	70,23	76,77	75,23	77,97	81,50	66,50	75,36	65,80
Areia, PB	88,70	82,93	76,67	84,90	82,77	83,67	89,20	72,43	82,66	37,80
Jataí, GO	105,07	94,40	85,13	100,73	97,40	92,90	100,73	80,23	94,57	55,90
Jaú, SP	127,60	117,63	111,10	125,27	122,47	120,60	127,03	104,40	119,51	82,60
João Pinheiro, MG	70,47	62,87	60,50	68,17	66,30	66,07	70,20	58,00	65,32	72,20
Maringá, PR	162,30	142,60	131,37	165,57	151,77	140,03	154,00	120,70	146,04	81,70
Paranaíba, MS	96,43	90,90	85,33	88,13	92,53	93,43	98,20	81,10	90,76	80,80
Petrolina, PE	11,77	11,90	12,00	11,83	11,67	13,60	12,73	12,43	12,24	21,60
Piracicaba, SP	146,53	132,17	122,43	142,70	138,70	131,83	143,10	113,77	133,90	81,70
Pirenópolis, GO	96,67	87,43	76,93	91,43	88,23	83,77	92,13	71,87	86,06	87,30
Presidente Prudente, SP	137,50	122,90	114,97	133,33	119,73	124,37	132,83	107,87	124,19	76,80
Ribeirão Preto, SP	119,83	111,57	102,33	116,63	113,80	111,37	119,93	95,80	111,41	78,10
Uberaba, MG	97,30	90,87	84,87	94,53	92,33	92,10	131,20	79,63	95,35	90,20
Média	102,95	94,21	87,43	99,97	96,47	94,97	103,99	82,15	95,27	71,64

Na tabela 4.6 tem-se a produtividade real (IBGE), a produtividade atingível simulada por Dias (2016) numa abordagem multimodelos utilizando os mesmos dados de solo e clima utilizados neste trabalho e a produtividade média atingível das variedades simuladas pelo AquaCrop. Observa-se que o AquaCrop obteve produtividade atingível (PA) um pouco inferior a produtividade atingível na abordagem de Dias (2016) para a maioria das localidades, exceto para localidade de Jaú, Maringá, Piracicaba, Presidente Prudente e Ribeirão Preto.

Dias (2016) constatou que as faixas de PA encontradas por sua abordagem multimodelos são similares às produtividades relatadas na literatura em condições experimentais sob cultivo de sequeiro nas regiões centro-leste (GUAZZELI; PAES, 1997; DALRI; CRUZ; 2002; COSTA et al., 2007; VITTI et al., 2007; GAVA et al., 2011; SILVA, 2008; SILVA et al., 2008; AMBROSANO et al., 2011; FERNANDES JUNIOR et al., 2013; FORTES et al., 2013; CRUSCIOL et al., 2014; CASTRO et al., 2014) e oeste/noroeste (DIAS et al., 1999; MAULE et al., 2001; BENETT et al., 2011; ZAMBROSI, 2011; FERNANDES JUNIOR et al., 2013) do estado de São Paulo e nos estados do Paraná (AQUINO; MEDINA, 2014; AQUINO et al., 2015), Pernambuco (OLIVEIRA et al., 2011a; SOUZA et al., 2011) e Paraíba (SILVA et al., 2013). O que também é observado neste estudo.

Tabela 4.6 – Produtividade média de colmos de cana-de-açúcar real (PR-IBGE) dos últimos 30 anos, produtividade média atingível simulada por Dias (2016) numa abordagem multimodelos e as produtividades atingíveis (PA) médias simuladas pelo AquaCrop para variedades de cana-de-açúcar em diferentes localidades do Brasil

Local	PR (IBGE)	Multimodelos (DIAS, 2016)	AquaCrop
		PA	PA
		-----t ha ⁻¹ -----	
Andradina, SP	90,40	97,60	96,36
Aracaju, SE	65,80	109,40	75,36
Areia, PB	37,80	94,10	82,66
Jataí, GO	55,90	118,10	94,57
Jaú, SP	82,60	112,20	119,51
João Pinheiro, MG	72,20	95,10	65,32
Maringá, PR	81,70	130,20	146,04
Paranaíba, MS	80,80	111,20	90,76
Petrolina, PE	21,60	42,40	12,24
Piracicaba, SP	81,70	112,50	133,90
Pirenópolis, GO	87,30	115,60	86,06
Presidente Prudente, SP	76,80	111,90	124,19
Ribeirão Preto, SP	78,10	106,60	111,41
Uberaba, MG	90,20	122,10	95,35
Média	71,64	105,64	95,27

Na Tabela 4.7 observa-se a diferença observada entre a produtividade atingível simulada por Dias (2016), a produtividade atingível simulada pelo AquaCrop e a produtividade real dada pelo IBGE. Nota-se que as simulações realizadas pelo AquaCrop resultaram em menor diferença na estimativa da produção atingível de colmos comparada a abordagem multimodelos adotada por Dias (2016) e a produção real do IBGE.

Tabela 4.7 - Diferença observada ($t\ ha^{-1}$) entre a produtividade média de colmos atingível simulada por Dias (2016) e simulada pelo modelo AquaCrop em relação a produtividade real do IBGE.

Local	Multimodelos (DIAS, 2016)	AquaCrop
	PA-PR	
	----- $t\ ha^{-1}$ -----	
Andradina, SP	7,2	5,96
Aracaju, SE	43,6	9,56
Areia, PB	56,3	44,86
Jataí, GO	62,2	38,67
Jaú, SP	29,6	36,91
João Pinheiro, MG	22,9	-6,88
Maringá, PR	48,5	64,34
Paranaíba, MS	30,4	9,96
Petrolina, PE	20,8	-9,36
Piracicaba, SP	30,8	52,2
Pirenópolis, GO	28,3	-1,24
Presidente Prudente, SP	35,1	47,39
Ribeirão Preto, SP	28,5	33,31
Uberaba, MG	31,9	5,15
Média	34,01	23,63
Máximo	62,20	64,34
Mínimo	7,20	-1,24

Na Tabela 4.8 tem-se as relações entre a produtividade média de colmos real calculada pelo IBGE e a atingível simulada pelo AquaCrop para variedades de cana-de-açúcar em diferentes localidades do Brasil. Onde é possível identificar mais facilmente as superestimativas ou subestimativas das simulações do modelo. É possível observar que a relação entre a produtividade média de colmos real (PR-IBGE) e a simulada em algumas situações são próximas de 1,00 e em situações mais extremas oscilam entre 0,54 e 2,25.

Tabela 4.8 – Relação entre a produtividade média de colmos de cana de açúcar real (PR-IBGE) e a produtividade atingível simulada pelo AquaCrop para as variedades de cana-de-açúcar em diferentes localidades do Brasil

Local	CTC 15	CTC 17	RB 867515	RB 92579	RB 931011	RB 966928	IAC 955000	NCo 376
Andradina, SP	1.12	1.06	1.00	1.10	1.08	1.08	1.14	0.94
Aracaju, SE	1.21	1.14	1.07	1.17	1.14	1.18	1.24	1.01
Areia, PB	2.35	2.19	2.03	2.25	2.19	2.21	2.36	1.92
Jataí, GO	1.88	1.69	1.52	1.80	1.74	1.66	1.80	1.44
Jaú, SP	1.54	1.42	1.35	1.52	1.48	1.46	1.54	1.26
João Pinheiro, MG	0.98	0.87	0.84	0.94	0.92	0.92	0.97	0.80
Maringá, PR	1.99	1.75	1.61	2.03	1.86	1.71	1.88	1.48
Paranaíba, MS	1.19	1.13	1.06	1.09	1.15	1.16	1.22	1.00
Petrolina, PE	0.54	0.55	0.56	0.55	0.54	0.63	0.59	0.58
Piracicaba, SP	1.79	1.62	1.50	1.75	1.70	1.61	1.75	1.39
Pirenópolis, GO	1.11	1.00	0.88	1.05	1.01	0.96	1.06	0.82
Presidente Prudente, SP	1.79	1.60	1.50	1.74	1.56	1.62	1.73	1.40
Ribeirão Preto, SP	1.53	1.43	1.31	1.49	1.46	1.43	1.54	1.23
Uberaba, MG	1.08	1.01	0.94	1.05	1.02	1.02	1.45	0.88
Média	1.44	1.32	1.23	1.40	1.35	1.33	1.45	1.15

Na tabela 4.9 tem-se o fator de correção obtidos para ajuste da produtividade simulada em relação a produtividade real dada pelo IBGE. Pode-se observar na média geral que a maioria das variedades necessita de fatores de correção inferiores a 1.

Tabela 4.9 – Fator de correção entre a produtividade atingível simulada pelo AquaCrop para as variedades de cana-de-açúcar e a produtividade média de colmos de cana de açúcar real (PR-IBGE) em diferentes localidades do Brasil

Local	CTC 15	CTC 17	RB 867515	RB 92579	RB 931011	RB 966928	IAC 955000	NCo 376	Média
Andradina, SP	0.89	0.95	0.00	0.91	0.93	0.92	0.89	1.06	0.82
Aracaju, SE	0.83	0.87	0.93	0.85	0.87	0.84	0.80	0.98	0.87
Areia, PB	0.42	0.45	0.49	0.44	0.45	0.45	0.42	0.52	0.46
Jataí, GO	0.53	0.59	0.65	0.55	0.57	0.60	0.55	0.69	0.59
Jaú, SP	0.65	0.70	0.74	0.66	0.67	0.68	0.65	0.79	0.69
João Pinheiro, MG	1.03	1.15	1.19	1.07	1.10	1.10	1.03	1.25	1.12
Maringá, PR	0.50	0.57	0.62	0.49	0.54	0.58	0.53	0.68	0.56
Paranaíba, MS	0.84	0.89	0.95	0.91	0.87	0.86	0.82	0.99	0.89
Petrolina, PE	1.84	1.81	1.80	1.83	1.85	1.59	1.70	1.73	1.77
Piracicaba, SP	0.56	0.62	0.67	0.57	0.59	0.62	0.57	0.72	0.62
Pirenópolis, GO	0.90	0.00	1.14	0.96	0.99	1.04	0.95	1.22	0.90
Presidente Prudente, SP	0.56	0.62	0.67	0.57	0.64	0.62	0.58	0.71	0.62
Ribeirão Preto, SP	0.65	0.70	0.76	0.67	0.69	0.70	0.65	0.82	0.71
Uberaba, MG	0.93	0.00	1.06	0.96	0.98	0.98	0.69	1.14	0.84
Média	0.80	0.71	0.83	0.82	0.84	0.83	0.77	0.95	0.82

Se estabelecido como critério para uma ótima simulação que a subestimativa ou superestimativa máxima aceitável da produtividade de colmos seja de 10 t ha^{-1} comparado a produtividade real, temos que as regiões de Areia, Jataí, Jaú, Maringá, Piracicaba, Presidente Prudente e Ribeirão preto não se encaixaram pois tiveram subestimativa ou superestimativa da produtividade superior a 10 t ha^{-1} comparado a produtividade real. Na região de Andradina as variedades CTC 17, RB 867515, RB 92579, RB 931011, RB 966928 e NCo 376 tiveram simulações que atenderam ao critério, Na região de Aracaju as variedades CTC 17, RB 967515, RB 931011 e NCo 376 também ficaram na faixa esperada. Para região de João Pinheiro apenas as variedades RB 867515 e NCo 376 não atenderam ao critério, ao contrário da região de Paranaíba em que apenas as variedades RB 867515, RB 92579 e NCo 376 tiveram estimativa dentro do critério

Através do critério acima foi possível estabelecer que nem todas as calibrações das variedades puderam estimar com elevada precisão as produtividades de colmos nas localidades estudadas, o que já era esperado devido ao fato de as calibrações terem sido realizadas com dados de experimento conduzido em condições ótimas de manejo, sendo que em campo as condições nutricionais, de restrição hídrica e de ocorrência de pragas e doenças impactam diretamente na produção da cultura e não são contempladas pelo modelo AquaCrop e nem pela abordagem multimodelos.

Na Tabela 4.10 tem-se os valores de produtividade potencial média de colmos simuladas pelo AquaCrop das variedades de cana-de-açúcar para algumas localidades do Brasil. O comportamento da estimativa da produtividade de colmos teve a variedade RB 92579 obtendo as maiores produtividades em todas as localidades, em média 231 t ha^{-1} , seguida pela RB 966928 com média de $174,70 \text{ t ha}^{-1}$, depois a RB 867515 com $171,94 \text{ t ha}^{-1}$ e a NCo 376 com produtividade potencial média de $149,58 \text{ t ha}^{-1}$.

Se analisada a média da produtividade potencial de colmos das variedades brasileiras temos a região de Aracaju-SE com média de 200 t ha^{-1} , a região de Jataí-GO e Paranaíba-MS com 195 t ha^{-1} , as regiões de Maringá-PR e Piracicaba-SP com 180 t ha^{-1} , a região de Ribeirão Preto-SP com 186 t ha^{-1} e a região de Petrolina com 210 t ha^{-1} , valores esses muito próximos ao encontrados por Dias (2016), estimando a produtividade potencial média de colmos de cana-de-açúcar pelos modelos de MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane nas mesmas localidades analisadas neste estudo obteve para as regiões de Aracaju-SE e Petrolina-PE cerca de 220 t ha^{-1} , para região de Jataí-Go 190 t ha^{-1} , na região de Maringá-PR 188 t ha^{-1} ,

na região de Paranaíba 200 t ha⁻¹, e nas regiões de Piracicaba-SP e Ribeirão Preto-SP 182 t ha⁻¹.

Gava et al. (2011) e Silva et al. (2014) encontraram valores similares aos das regiões de Ribeirão Preto-SP e Piracicaba-SP em experimentos com irrigação plena realizados em Jaú-SP. Araújo et al. (2016) encontraram produtividade de colmos para a cultivar CTC4 de cerca de 172 t ha⁻¹ em cana irrigada em Santo Antônio de Goiás, GO, na safra 2014/15, sendo esta cultivada em solo de média disponibilidade hídrica (Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média). Os resultados da PP do presente estudo são similares aos obtidos por simulações com o modelo MZA-FAO para o estado de São Paulo, realizadas por Monteiro e Sentelhas (2014), os quais encontraram PP entre 140 e 200 t ha⁻¹, e por Monteiro (2016) que obteve valores entre 140 e 180 t ha⁻¹ para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do referido estado. Vianna e Sentelhas (2015) obtiveram valores médios de PP simulados pelo modelo DSSAT/CANEGRO variando de 137 a 170 t ha⁻¹, para boa parte dos locais de estudo.

Tabela 4.10 – Produtividade potencial média de colmos de cana-de-açúcar nas safras 2006 a 2017 simulada pelo AquaCrop para variedades de cana-de-açúcar em algumas localidades do Brasil

Local	RB 867515	RB 92579	RB 966928	NCo 376
Aracaju, SE	174,60	241,20	183,00	156,10
Jataí, GO	170,40	235,37	178,60	152,33
Maringá, PR	159,60	219,93	167,30	142,67
Paranaíba, MS	169,50	234,57	178,00	151,83
Petrolina, PE	207,27	241,17	183,00	156,10
Piracicaba, SP	158,00	218,10	165,33	141,23
Ribeirão Preto, SP	164,20	226,77	167,67	146,80
Média	171,94	231,02	174,70	149,58

Na Figura 4.2 temos as lâminas de irrigação total estimada pelo AquaCrop para as variedades de cana-de-açúcar RB 867515, RB 92579, IAC 955000 e NCo 376 nas localidades de Aracaju, Jataí, Maringá, Paranaíba, Petrolina, Piracicaba e Ribeirão Preto. A variedade RB 92579 teve a maior lâmina de irrigação para todas as localidades, provavelmente pelo fato de o K_{CTR_x} desta ter sido o maior entre estas variedades aqui analisadas, assim essa variedade teria uma maior transpiração, o que resultaria em maior produção de biomassa, mas também gera maior demanda hídrica pela cultura.

A região de Petrolina teve a maior lâmina de irrigação estimada para todas as variedades, com lâminas acima de 1400 mm, a variedade RB 867515 registrou necessidade de 1780 mm e a variedade RB 92579 de 1960 mm.

A variedade RB 867515 teve lâmina de irrigação estimada próximo dos 800 mm na região de Aracaju-SE, na região de Jataí a lâmina encontrada foi de pouco mais de 500 mm, na região de Maringá 400 mm, na região de a lâmina foi de 360 mm. Na região de Piracicaba a lâmina estimada foi de 370 mm, e para região de Ribeirão Preto 385 mm.

As variedades RB 966928 e NCo 376 tiveram comportamentos próximos em quase todas as localidades com lâmina próximo a 800 mm na região de Aracaju, 550 mm em Jataí, 460 mm em Maringá, 630 mm em Paranaíba, 400 mm em Piracicaba e em Ribeirão Preto.

Figura 4.2 – Lâmina de irrigação total simulada pelo AquaCrop das variedades para cana planta de 12 meses (safras 2006 a 2017) em algumas localidades brasileiras

Sendo a deficiência hídrica um dos maiores fatores limitantes para a produtividade de colmos da cana-de-açúcar nas condições brasileiras, o uso da irrigação visando suprir a demanda hídrica da cultura, mesmo que parcialmente, é fundamental para aumentar a produção de cana-de-açúcar no Brasil sem que haja necessidade de se aumentar a área cultivada. Como o melhoramento genético requer alguns anos para liberar novas cultivares, a irrigação pode ser a prática adotada a curto e médio prazos para minimizar a quebra de produtividade devido à deficiência hídrica. Para locais mais secos, como o norte do estado de

Minas Gerais e na região nordeste do país, produtividades da ordem de 136 a 256 t ha⁻¹ foram obtidas em diversos experimentos irrigados, para lâminas variando de 470 a 1539 mm ciclo⁻¹ (OLIVEIRA et al., 2011a; OLIVEIRA et al., 2011b; ANDRADE JUNIOR et al., 2012; SILVA et al., 2013).

Em estudo no estado de Goiás, produtividades de colmos variando entre 109 e 170 t ha⁻¹ foram obtidas com irrigação suplementar da ordem de 50% da ETc (~ 370 mm ciclo⁻¹) (CAMPOS et al., 2014). Em outro estudo conduzido em Goiás, Araújo et al, (2016) obtiveram produtividades de colmos entre 168 e 173 t ha⁻¹ com suplementação hídrica próxima ao nível pleno. Mesmo em regiões tradicionais de cultivo da cana-de-açúcar, como no estado de São Paulo, onde a irrigação não é uma prática comum, diversos experimentos vêm mostrando produtividades de colmos variando entre 101 a 190 t ha⁻¹ para diferentes cultivares e ciclos sob suplementação hídrica (GUAZZELI; PAES, 1997; DALRI et al., 2008; GAVA et al., 2011; SILVA et al., 2014).

4.4. Conclusões

O modelo AquaCrop mostrou-se eficiente na estimativa da produtividade de colmos da cana-de-açúcar em diferentes regiões do Brasil, podendo ser utilizado para auxiliar em pesquisas que visem o incremento da produtividade desta cultura em condições de sequeiro e irrigada. Houve uma certa diferença entre a produtividade atingível simulada e a produtividade real em pelo menos metade das regiões estudadas. A introdução de um fator de correção propiciou a estimativa da produtividade real das variedades analisadas com base na produtividade atingível estimada pelo modelo AquaCrop.

O incremento da produtividade de colmos da cana-de-açúcar com uso da irrigação tanto nas regiões com boa distribuição de chuvas quanto nas regiões com distribuição inadequada, mostra que a prática da irrigação nesta cultura tem grande potencial de expansão nas áreas de cultivo brasileiras e fornece informações preciosas para o planejamento da agricultura irrigada.

As regiões nordestinas foram as mais responsivas à irrigação, com incremento superior a 1000% na produtividade de colmos da cana-de-açúcar na região de Petrolina-PE e lâmina de irrigação necessária em torno de 1700 mm, e em Aracaju-SE o incremento na produtividade foi superior a 100% com lâmina média de irrigação inferior a 800 mm. A região de Jataí-Go e

Paranaíba-MS também apresentaram incremento na produtividade superior a 80% para lâminas entre 500 e 600 mm.

Evidencia-se nos resultados e discussões apresentadas, que os modelos de simulação de crescimento de plantas analisados (AquaCrop, DSSAT, APSIM e MZA FAO) não conseguem prever diretamente a produtividade real da cana-de-açúcar no campo, uma vez que não apresentam algoritmos que possam penalizar a produtividade atingível simulada atualmente, em função de fatores externos depressores da produtividade como: pragas, ervas daninhas, doenças, níveis nutricionais inadequados de macro e micro nutrientes no solo, microbiologia do solo, compactação do terreno e danos mecânicos nas touceiras pela colheita mecanizada nas áreas. Estas limitações deverão ser objetos de pesquisas nos próximos anos para se possibilitar futuramente o uso destes modelos na estimativa da “produção real” no campo, uma vez que atualmente, só conseguem simular adequadamente a “*produtividade atingível*” da cana-de-açúcar no campo.

Referências

ALENCAR, L. P. **Parametrização do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 133p, 2014.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 291p. (FAO. Irrigation Drainage and Paper, 56).

AMBROSANO, E.J.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.B.; SCHAMMAS, E.A.; DIAS, F.L.F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P.C.O.; SACHS, R.C.C.; AZCÓN, R. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 810-818, 2011.

ANDRADE JUNIOR, A.S de; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q.; DUARTE, J.A.L.; BRAGA, D.L.; NOLETO, D.H. Irrigation, nitrogen and potassium levels under subsurface drip on sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 76-84, 2012.

AQUINO, G.S. de; MEDINA, C. de C. Produtividade e índices biométricos e fisiológicos de cana-de-açúcar cultivada sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 3, p. 172-180, 2014.

AQUINO, G.S. de; MEDINA, C. de C.; PORTEIRA JUNIOR, A.L.; SANTOS, L.O.; CUNHA, A.C.B.; KUSSABA, D.A.O.; SANTOS JÚNIOR, J.H. dos; ALMEIDA, L.A. SANTIAGO, A.D. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 12, p. 1150-1159, 2015.

ARAÚJO, R.; ALVES JUNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A.W.P. Variation in the sugar yield in response to drying-off of sugarcane before harvest and the occurrence of low air temperatures. **Bragantia**, Campinas v. 75, n. 1, p. 118-127, 2016.

ARRIO JR, P. P. **Aprimoramento das rotinas e parâmetros dos processos hidrológicos do modelo computacional Soil and Water Assessment Tool -SWAT**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 152p, 2016.

ÁVILA, M. R.; BARIZÃO, D. A. O.; GOMES, E. P.; FEDRI, G.; ALBRECHT, L. P. Cultivo do feijoeiro no outono/inverno associado à aplicação de bioestimulante e adubo foliar na presença e ausência de irrigação. **Scientia Agraria**, v. 11, n. 3, p. 221-230, 2010.

BENETT, C.G.S.; BUZETTI, S.; SILVA, K.S.; TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; GARCIA, C.M. de P.; MAESTELO, P.R. Produtividade e desenvolvimento da cana-planta e soca em função de doses e fontes de manganês. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1661-1668, 2011.

BEZUIDENHOUT, C.N.; SINGELS, A. Operational forecasting of South African sugarcane production: Part 2 - System evaluation. **Agricultural Systems**, Essex, v. 92, p. 39-51, 2007.

BOCCA, F.F.; RODRIGUES, L.H.A.; ARRAES, N.A.M. When do I want to know and why? Different demands on sugarcane yield predictions. **Agricultural Systems**, Essex, v. 135, p. 48-56, 2015.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SD.22 - Goiás, SD.23 - Brasília, SE.22 - Goiânia. (Levantamento de Recursos Naturais, 25, 29, 31). Rio de Janeiro. 1981.

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

CAMPOS, P.F.; ALVES, J.; CASAROLI, D.; FONTOURA, P.R.; EVANGELISTA, A.W.P. Response of sugarcane varieties to supplemental irrigation in Brazilian Savanna. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, p. 1139-1149, 2014.

CASTRO, S.G.Q. de; FRANCO, H.C.J.; MUTTON, M.A. Harvest managements and cultural practices in sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 299-306, 2014.

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

COSTA, L.G.; MARIN, F.R.; NASSIF, D.S.P.; PINTO, H.M.S.; LOPES-ASSAD, M.L.R.C. Simulação do efeito do manejo da palha e do nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 5, p. 469-474, 2014.

COSTA, M.C.G.; MAZZA, J.A.; VITTI, G.C.; JORGE, L.A. de C. Distribuição radicular, estado nutricional e produção de colmos e de açúcar em soqueiras de dois cultivares de cana-de-açúcar em solos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1503-1514, 2007.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L. Efeito da frequência de irrigação subsuperficial por gotejamento no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Irriga**, Botucatu, v. 7, n.1, p. 29-34, 2002.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L.; GARCIA, C.J.B.; DUENHAS, L.H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n.1, p. 1-11, 2008.

DIAS, F.L.F.; MAZZA, J.A.; MATSUOKA, S.; PERECIN, D.; MAULE, R.F. Produtividade da cana-de-açúcar em relação a clima e solos da região noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 627-334, 1999.

DIAS, H. B. **Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil**. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 166p, 2016.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 139p. (Irrigation and Drainage paper, 33).

EVERINGHAM, Y.L.; Smyth, C.W.; INMAN-BAMBER, N.G. Ensemble data mining approaches to forecast regional sugarcane crop production. **Agricultural and Foresty Meteorology**, Amsterdam, v. 149, p. 689-696, 2009.

FERNANDES JÚNIOR, A.R.; ANDRADE, J.A. da C.; SANTOS, P.C. dos; HOFFMAN, H.P.; CHAPOLA, R.G.; CARNEIRO, M.S.; CURSI, D.E. Adaptabilidade e estabilidade de clones de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 3, p. 208-216, 2013.

FORTES, C.; TRIVELIN, P.C.O; VITTI, A.C.; OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 1, p. 88-96, 2013. CRUSCIOL, C.A.; FOLTRAN, R.; ROSSATO, O.B.; MCCRAY, J.M.; ROSSETTO, R. Effects of surface application of calcium-magnesium silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1843-1854, 2014.

GAVA, G.J. de C.; SILVA, M.A.; Da SILVA, R.C.; JERONIMO, E.M.; CRUZ, J.C.S.; KÖLLN, O.T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 250-255, 2011.

GOUVÊA, J.R.F.; SENTELHAS, P.C.; GAZZOLA, S.T.; SANTOS, M.C. Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical Southern Brazil. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 66, p. 593-605, 2009.

GUAZZELLI, M.A.N.; PAES, L.A.D. Irrigação de cana-de-açúcar comercial. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1997. 11p.

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

INMAN-BAMBER, N.G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant and Soil**, Mount Edgecombe, v. 8, n. 2, p. 93-99, 1991.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema de recuperação automática (SIDRA)**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 25 Jan. 2016.

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

KEATING, B.A.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modelling sugarcane production system I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 61, p. 253-271, 1999.

LISSON, S.N.; INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 321-335, 2005

MARIN, F. R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenário futuro baseado em simulações multimodelos**. 2014. 262p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

MARIN, F.R.; DE CARVALHO, G.L. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of Sao Paulo, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 149-156, 2012.

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G. Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. **Environmental Modelling and Software**, London, v. 72, p. 372–386, 2015.

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G.; REZENDE, A.S.; ANDRADE JUNIOR, A.S. Evaluation of APSIM-SUGAR and DSSAT-CANEGRO for widely grown brazilian sugarcane cultivar. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 28. , 2013. São Paulo. **Proceedings...** São Paulo, 2013.

MAULE, R.F.; MAZZA, J.A.; MARTHA JUNIOR, G.B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 295-301, 2001.

MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Potential and actual sugarcane yields in Southern Brazil as a function of climate conditions and crop management. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, p. 264-276, 2014.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, p. 282-290, 1970.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; PALLONE, W.J.; RESENDE, R.S.; PELLEGRINO, G.Q. Parameterization and evaluation of the DSSAT/Canegro model for Brazilian sugarcane varieties. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 311-318, 2012.

O'LEARY, G.J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, p. 97-111, 2000.

OLIVEIRA, E.C.A. de; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, A.C. de; SIMÕES NETO, D.E.; DA ROCHA, A.T.; DE CARVALHO, L.A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 6, p. 617-625, 2011b.

OLIVEIRA, F.M. de; ASPIAZÚ, I.; KONDO, M.K.; BORGES, I.D.; PEGORARO, R.F.; VIANNA, E.J. Crescimento e produção de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e estresse hídrico. **Revista Trópica**, Chapadinha, v. 5, n. 1, p. 56-67, 2011a.

OLIVEIRA, R.A.; SANTOS, R.S.; RIBEIRO, A.; ZOLNIER, S.; BARBOSA, M.H.P. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE. R **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 549-557, 2012.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, New York, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

RYKIEL JR, E. J. Testing ecological models: the meaning of validation. **Ecological Modelling**, v. 90, p. 229-244, 1996.

SALES, R. A.; AMBROZIM, C. S.; POSSE, R. P.; OLIVEIRA, E. C.; POSSE, S. P. Índice de satisfação das demandas de água e produtividade do feijão em diferentes lâminas de irrigação em Colatina-ES. **Energia na Agricultura**, v. 32, n. 1, p. 81-87, 2017.

SILVA, M. de A. Interação genótipo x ambiente e estabilidade fenotípica de cana-de-açúcar em ciclo de cana-de-ano. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 109-117, 2008.

SILVA, M. de A.; JERONIMO, E.M.; LÚCIO, A.D. Perfilhamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 8, p. 979-986, 2008.

SILVA, M. de A.; SOARES, R.A.B.; LANDELL, M.G.A.; CAMPANA, M.P. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 656-661, 2008.

SILVA, M.A.; ARANTES, M.T.; RHEIN, A.F.L.; GAVA, J.C.; KÖLLN, O.T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 241-249, 2014.

SILVA, V. de. P.R. da; SILVA, B.B. da; ALBUQUERQUE, W.G.; BORGER, C.J.R.; SOUZA, I.F. de; DANTAS NETO, J. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 128, p. 102-109, 2013.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C.N. A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 78, p. 151-164, 2002.

SOUZA, A.E.R. de; OLIVEIRA, F.J. de; ANUNCIACÃO FILHO, C.J. de; MELO FILHO, P. de A.; MELO, L.J.O.T. de; TABOSA, J.N. Seleção de famílias RB visando à alta produtividade e precocidade na maturação em cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 788-795, 2011.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

VIANNA, M. dos S.; SENTELHAS, P.C. Performance of DSSAT CSM-CANEGRO under operational conditions and its use in determining the 'saving irrigation' impact on sugarcane crop. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 17, p. 1-12, 2015.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J. de C.; FRANCO, H.C.J.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 491-498, 2007.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

ZAMBROSI, F.C.B. Adubação com fósforo em cana-soca e sua interação com magnésio. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 3, p. 400-405, 2011.