

LEÔNIDAS PENA DE ALENCAR

PARAMETRIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP
PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A368p
2014 Alencar, Leônidas Pena, 1984-
Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a
cultura da cana-de-açúcar / Leônidas Pena Alencar. – Viçosa,
MG, 2014.
xiv, 117f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Everardo Chartuni Mantovani.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.101-114.

1. Engenharia de irrigação. 2. Água - Uso.
3. Cana-de-açúcar. 4. Modelo de crescimento. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 627.52

LEÔNIDAS PENA DE ALENCAR

PARAMETRIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP
PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 01 de julho de 2014.

Williams Pinto Marques Ferreira

Silvio Bueno Pereira

Vinicius Bof Bufon
(Coorientador)

Mauricio Bernardes Coelho

Everardo Chartuni Mantovani
(Orientador)

À minha esposa, Bruna

Ao meu filho, Arthur

Aos meus pais,

Aos meus irmãos,

Aos meus amigos.

Com amor

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao meu Senhor e Salvador, Jesus Cristo, pela saúde e equilíbrio, que foram fundamentais na conclusão desta etapa em minha vida. A Ele devo todo louvor, toda honra e toda glória.

Ao Professor Everardo Chartuni Mantovani, pela orientação, paciência, incentivo e amizade. Aos pesquisadores, Alexsandro Claudio dos Santos Almeida, Barbara Dos Santos Esteves, Emídio Cantídio de Oliveira Filho, Leila Cruz Da Silva, Thieres George Freire da Silva e Vinicius Bof Bufon que gentilmente cederam os dados para elaboração desta tese, sem eles não seria possível a conclusão da mesma. A estes os meus sinceros agradecimentos.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso.

À minha amada esposa, Bruna Cordeiro, companheira de todas as horas, que me agraciou com seu amor e o melhor de todos os presentes, meu filho Arthur.

Aos meus pais, Ruberval Barbosa de Alencar e Cristina Maria Ferreira Pena pelo grande apoio, por nunca terem medido esforços para me dar a melhor educação, pelos incentivos profissionais, pelo amor, força e amizade.

À minha querida sogra, Fátima Cordeiro, pelo apoio, suporte, carinho e amizade.

Ao professores Gilberto Sediyaama e Vinicius Bof Bufon, pela orientação, amizade e apoio profissional.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola José Galinari, Fátima, Délio, Claudenilson Filomeno, Dona Maria pelo carinho e por nunca terem hesitado em me ajudar.

Aos companheiros de pós-graduação, Enoque, Fábio, Glaúcio e Monalisa pela boa convivência e pelas contribuições no desenvolvimento deste trabalho. A todos os Professores do curso de Engenharia Agrícola, pelos valiosos conhecimentos transmitidos através de suas disciplinas com dedicação, profissionalismo e amizade.

A todos os demais professores, colegas e funcionários que participaram da realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE SÍMBOLO	IX
RESUMO	XI
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1.1. Descrição do experimento 1	39
3.1.2. Descrição do experimento 2	41
3.1.3. Descrição do experimento 3	43
3.1.4. Descrição do experimento 4	44
3.1.5. Descrição do experimento 5	46
3.1.6. Descrição do experimento 6	47
3.2 Parametrização e validação do modelo AquaCrop	49
3.3 Análise estatística do modelo	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1 Parâmetros conservativos do modelo	56
4.2. Parametrização e Validação do modelo AquaCrop	58
4.2.1 Cobertura do solo pelo dossel verde (CC)	58
4.2.2 Biomassa Seca	70
4.2.3 Índice de Colheita (HI)	85
4.3 Eficiência de uso da água	88
5. CONCLUSÕES	100
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclos da cana-de-açúcar e variações na temperatura do ar e precipitação na região Centro-Sul do Brasil.....	6
Figura 2 - Fases de desenvolvimento da cana.....	9
Figura 3 - Fluxograma do modelo aquacrop, indicando os principais componentes do contínuo solo-planta-atmosfera.....	25
Figura 4 - Exemplos dos coeficientes de estresse (Ks) em função da resposta a redução relativa do conteúdo de água no solo.	28
Figura 5 - Representação esquemática do desenvolvimento do dossel durante o crescimento exponencial e as fases de decaimento exponencial.	30
Figura 6 - Exemplo da variação da cobertura do dossel ao longo do ciclo da cultura sob condições sem estresse.....	32
Figura 7 - Representação esquemática do enraizamento profundo ao longo do tempo..	35
Figura 8 - Representação esquemática da resposta da cultura ao estresse hídrico.....	36
Figura 9 - Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação ocorrida no experimento de Silva (2007) na localidade de Coruripe-AL	40
Figura 10 - Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação ocorrida durante os experimentos de Almeida (2008), na localidade de Rio Largo-AL, durante o ciclo da cana planta (A) e cana soca (B).....	42
Figura 11 – Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação para o experimento de Oliveira (2008) na localidade de Carpina-PE.....	43
Figura 12 – Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação para o experimento de Silva (2009) para a localidade de Juazeiro-BA	45
Figura 13 – Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação para o experimento de Esteves (2011) para a localidade de Campos dos Goytacazes-RJ.....	47
Figura 14 – Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação para o experimento de Bufon (2012) para a localidade de Goianésia-GO	48
Figura 15 – Percentagem de cobertura do solo medida e simulada pelo modelo AquaCrop para a cultivar RB92579, na localidade de Juazeiro-BA.....	58
Figura 16 – Plotagem do valor de $-\ln(1-f_{\text{ra}})$ versus o IAF a cultivar RB92579, na localidade de Juazeiro-BA	59
Figura 17 – Variação da percentagem de cobertura do solo observada e simulada pelo modelo AquaCrop para as cultivares RB92579, RB93509, RB867515 e SP79-1011, na localidade de Coruripe-AL.....	62
Figura 18 – Precipitação pluviométrica e simulação do déficit de água no solo pelo modelo AquaCrop para a cultivar RB92579 na localidade de Coruripe-Al	63

Figura 19 – Variação da percentagem de cobertura do solo observada e simulada pelo modelo AquaCrop para a cultivar RB92579 na localidade de Rio largo-AL, no ciclo da cana planta (A) e da soca (B)	65
Figura 20 – Variação da percentagem de cobertura do solo observada e simulada pelo modelo aquacrop para a cultivar RB93509 na localidade de Rio Largo-AL, para o ciclo da cana planta (A) e soca (B)	66
Figura 21 – Variação da percentagem de cobertura do solo observada e simulada pelo modelo aquacrop para a cultivar SP79-1011 na localidade de Rio Largo-AL, para o ciclo da cana planta (A) e soca (B)	67
Figura 22 – Variação da percentagem de cobertura do solo observada e simulada pelo modelo aquacrop para a cultivar SP81-3250 na localidade de Campos dos Goytacazes-RJ	68
Figura 23 – Biomassa seca observada e simulada na parametrização da cultivar RB92579, na localidade de Juazeiro-BA	71
Figura 24 – biomassa seca observada e simulada na parametrização das cultivares RB92579, RB93509, RB867515 e SP79-1011, no ciclo da cana planta na localidade de Coruripe-AL.....	72
Figura 25 – Biomassa seca medida e simulada das cultivares RB92579, RB867515, SP79-1011 e SP81-3250 no ciclo da cana planta na localidade de Carpina-PE	77
Figura 26 – Biomassa seca observada e simulada na validação da cultivar SP81-3250 no ciclo da cana soca (3º corte) na localidade de Campos dos Goytacazes-rj.....	81
Figura 27 – Relação entre os valores observados e simulados para as cultivares RB92579, SP79-1011 e RB93509 nos ciclos da cana planta e soca, na localidade de Rio Largo-AL.....	81
Figura 28 – Biomassa seca observada e simulada na parametrização da cultivar CTC9, no ciclo da cana planta para localidade de Goianésia-GO	83
Figura 29 – Biomassa seca observada e simulada na validação da cultivar ctc9, no ciclo da cana planta para localidade de goianésia-go	84
Figura 30 – Relação entre a biomassa seca da parte aérea ao longo do ciclo da cultura com a evapotranspiração acumulada (ET) para diferentes regimes hídricos	93
Figura 31 – Relação entre a biomassa seca da parte aérea e a transpiração normalizada para as cultivares RB92579, RB867515, SP81-3250 e SP79-1011 para localidade de Carpina-PE	94
Figura 32 – Relação entre a biomassa seca da parte aérea e a transpiração normalizada para a cultivares RB92579, RB867515, e SP79-1011 para localidade de Coruripe-AL	95
Figura 33 – Relação entre a biomassa seca da parte aérea e a transpiração normalizada para a cultivar RB92579 para localidade de Juazeiro-BA	96
Figura 34 – Relação entre a biomassa seca da parte aérea e a transpiração normalizada para a cultivar SP81-3250 para localidade de Campos dos Goytacazes-RJ	96
Figura 35 – Relação entre a biomassa seca da parte aérea e a transpiração normalizada para a cultivar CTC9 em diferentes regimes hídrico para localidade de Goianésia-GO	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros da cultura utilizado pelo AquaCrop	50
Tabela 2 – Informações sobre os experimentos e sua utilização no presente estudo.....	52
Tabela 3 – Parâmetros conservativos da cultura obtidos na parametrização e utilizados na validação do modelo AquaCrop para as diferentes cultivares	57
Tabela 4 – Índice de colheita (%) observado para as algumas cultivares, em diferentes localidades.....	86
Tabela 5 – Valores de evaporação, transpiração evapotranspiração simulados pelo modelo AquaCrop para as diferentes cultivares estudadas em diversas localidades e eficiência de uso da água.....	89
Tabela 6 - Valores de produtividade da água (WP) e do coeficiente de crescimento do dossel (CGC) utilizados na parametrização e validação de todas cultivares	98

LISTA DE SÍMBOLO

- B – biomassa seca da parte aérea (kg);
- CC – percentagem de cobertura do solo pelo dossel (%);
- CC₀ – cobertura inicial do solo no tempo t = 0 (fração cobertura do solo);
- CDC - coeficiente de declínio do dossel (por dia ou graus-dias⁻¹);
- CGC - coeficiente de crescimento do dossel (aumento da fração da cobertura do solo por dia ou graus-dias);
- d – índice de concordância de Willmott;
- CC_x - cobertura máxima do solo, (%).
- D_{rel} – é a depleção relativa da água no solo;ash-Suctifle;
- EUA – eficiência de uso da água (kg.m⁻³)
- ET_a - evapotranspiração real (mm);
- ET_o – evapotranspiração de referência (mm);
- ET_c – evapotranspiração da cultura (mm);
- ET_m - evapotranspiração máxima (mm);
- f_{RFA} – fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (%);
- f_{shape} - fator forma da curva do coeficiente de estresse hídrico (adimensional);
- IAF – índice de área foliar (m² m⁻²);
- k – coeficiente de extinção da luz (adimensional);
- KC_{Trx} - é o coeficiente de transpiração máxima da cultura.
- Ks_{exp} - coeficiente de estresse hídrico para expansão foliar (adimensional);
- Ks_{sto} – coeficiente de estresse hídrico para condutância estomática (adimensional);
- Ks_{sen} - coeficiente de estresse hídrico para senescência foliar (adimensional);
- K_y – o coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (adimensional);
- r² - o coeficiente de determinação (%);
- REQM - raiz do erro quadrático médio;
- Tr - transpiração da cultura (mm);

TCH – tonelada de colmo por hectare ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$)

WP - Produtividade da água ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{mm}^{-1}$);

HI – índice de colheita (%);

Y - produção final (kg);

Y_a – rendimento real ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$);

Y_m – rendimento máximo ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$) sendo o rendimento máximo no qual não há estresse;

Z – é a profundidade efetiva das raízes após o plantio no tempo t (em dias);

Z_{ini} – é a profundidade de plantio na semeadura;

Z_x – é a profundidade efetiva máxima das raízes;

t - tempo (dias ou graus-dias);

t_o - é o tempo do plantio à emergência efetiva da cultura;

t_x - é o tempo após o plantio, quando Z_x é atingido; e

RESUMO

ALENCAR, Leônidas Pena de, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, julho de 2014. **Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar.** Orientador: Everardo Chartuni Mantovani. Coorientadores: Vinicius Bof Bufon e Gilberto Chohaku Sedyama.

Atualmente e, provavelmente, no futuro, a agricultura irrigada terá que se adequar à realidade da escassez de água. A falta d'água para irrigação será a regra e não a exceção. O foco do manejo da irrigação será distinto do atual, enfatizando a produção por unidade de área, para a maximização da produção por unidade de água consumida, o que já ocorre em diversas áreas. Para avaliar os efeitos do estresse hídrico e otimizar o uso da água, em condições limitantes, melhorando a sustentabilidade e rentabilidade da produção agrícola serão cada vez mais utilizados os modelos de simulação e crescimento de culturas. A organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), atenta à essa necessidade, desenvolveu um modelo de simulação de resposta de produção à necessidade hídrica das culturas (AquaCrop). No presente estudo, o AquaCrop foi parametrizado e validado para as cultivares RB92579, RB867515, RB93509, SP81-3250, SP79-1011 e CTC9 de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*), utilizando o conjunto de dados de seis experimentos realizados em diferentes regiões do Brasil. Em Coruripe-AL, a cultura foi conduzida sob sequeiro e, em Carpina-PE, Rio Largo-AL e Juazeiro-BA, a cultura foi conduzida com irrigação, sendo que em Goianésia-GO, por sua vez, foram utilizados diferentes regimes hídricos: sequeiro com aplicação de 100 mm de salvamento, irrigação correspondente a 50% da ITN e 100% da ITN. A avaliação do modelo foi feita utilizando o coeficiente de determinação (r^2), índice de Willmott (d), índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (E) e a raiz do erro quadrático médio (REQM), como indicadores estatísticos. Bons resultados

foram obtidos na parametrização e validação do modelo, apresentando pequenos erros na simulação da produção de biomassa seca da parte aérea e na biomassa final. Todavia, constataram-se os maiores erros na simulação da cobertura do solo pelo dossel, nas condições de sequeiro. O modelo não foi capaz de representar o fenômeno de aumento na produção de sacarose, no final do ciclo, com a acurácia e a precisão desejadas. A limitação do modelo advém do fato de que o mesmo não fornece a produção de colmo (TCH) nem a produção de sacarose, fazendo necessária a utilização de índices de umidade e particionamento da biomassa, para a conversão da biomassa seca total em TCH. Observou-se uma variação nos valores de produtividade da água (WP) entre cultivares, o que contradiz a premissa dos autores do modelo, de que este parâmetro pode ser aplicado a uma ampla gama de cultivares. A facilidade de uso do modelo AquaCrop, o pequeno número de parâmetros de entrada e os pequenos erros de estimativa da biomassa final fizeram o modelo atuar como uma valiosa ferramenta para estimar a produtividade da cultura sob condições de sequeiro e/ou irrigação com déficit, além de permitir diferentes estratégias de gestão da água na agricultura, visando a melhorar a eficiência do uso da água, pelas culturas.

ABSTRACT

ALENCAR, Leônidas Pena de, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, July of 2014. **Parameterization and validation of the AquaCrop Model for sugarcane.** Advisor: Everardo Chartuni Mantovani. Co-advisors: Vinicius Bof Bufon and Gilberto Chohaku Sedyama.

Currently, and probably in the future, irrigated agriculture will need to fit the reality of water scarcity. The lack of water for irrigation will be the rule and not the exception. The focus of irrigation management will change, emphasizing the production per unit of area for maximizing production per unit of water consumed, ie, water productivity, which already occurs in several areas. Simulation and crop growth models will be increasingly used to evaluate the effects of water stress and optimize the use of water in limiting conditions, improving the sustainability and profitability of agricultural production. The organization of the United Nations for Food and Agriculture (FAO), attentive to this need, developed a simulation model of yield response to crop water requirement (AquaCrop). In the present study, AquaCrop was parameterized and validated for RB92579, RB867515, RB93509, SP81-3250, SP79-1011 and CTC9 of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) cultivars using the data set from six experiments in different regions of Brazil. In Coruripe-AL, the culture was conducted under rainfed and Carpina-PE-AL Rio Largo and Juazeiro-BA, the culture was conducted under irrigation, and in Goianésia-GO different water regimes were used: rainfed with application of 100 mm of water, irrigation corresponding to 50% of total irrigation needed (ITN) and 100% of ITN. The evaluation of the model was made using the coefficient of determination (r^2), Willmott index (d), the efficiency index of Nash-Sutcliffe (E) and the root mean square error (RMSE) as statistical indicators. Good results were obtained in the parameterization and validation of the model, showing small errors in the

simulation of dry above ground biomass of and in the final biomass, but found the biggest mistakes in the simulation of ground cover by the canopy, in rainfed conditions. The model has not been able to represent the phenomenon of the increase in sucrose production by the end of the cycle with the desired accuracy and precision. The limitation of the model is that it does not provide the production of stem (TCH) and the production of sucrose. Therefore, it is necessary the use of humidity indexes and the partitioning of biomass for conversion of total dry biomass in TCH. There was a variation in the values of water productivity (WP) among cultivars, which contradicts the premise of the authors of the model, that this parameter can be applied to a range of cultivars. The ease of use of AquaCrop model, the small number of input parameters and small errors of estimative final biomass made the model serve as a valuable tool for estimating crop yield under rainfed conditions and/or irrigation deficit that enables different strategies for water management in agriculture, to improve the efficiency of water use by crops.

1. INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar é um dos destaques do agronegócio brasileiro, em virtude de fatores econômicos, sociais e ambientais. A discussão em torno das mudanças climáticas globais, alta nos preços do petróleo e a chegada dos veículos bicombustíveis ao mercado está entre os principais fatores que impulsionaram a expansão da cultura nas últimas décadas. Frisando-se que o setor sucroalcooleiro movimenta grande volume de capital, tecnologia, pessoas e informação (CARVALHO, 2009).

A busca por novas fontes de energia renováveis e menos poluentes beneficia a produção da cana-de-açúcar, visto que o etanol e o bagaço da cana são importantes fontes de energia alternativa de menor impacto ao meio ambiente. Com a expansão do setor, resultante da demanda por açúcar, etanol, plástico verde, energia entre outros derivados, há a necessidade do aumento da produção da cana-de-açúcar, através do aumento da área plantada e/ou da produtividade dos canaviais. Nesse quesito, a irrigação tem grande relevância.

De acordo com Job (2010), há necessidade de crescimento da área cultivada com a cana-de-açúcar, visto que o açúcar, obtido das indústrias de processamento da cana, é cada vez mais requerido por países que estão ampliando o poder de compra e o consumo de alimentos processados.

A necessidade do aumento da produção de diversas culturas tem gerado uma enorme pressão sobre a demanda de água pela agricultura. Em diversas localidades, a precipitação não é suficiente para suprir a necessidade hídrica da cultura. Assim, a irrigação é necessária.

Segundo dados da Agência Nacional de Águas (ANA), 72% das vazões outorgadas no Brasil são utilizadas na irrigação. O valor estimado de área irrigada para 2012 foi de 5,8 milhões de hectares, sendo a estimativa da área irrigável no Brasil da ordem de 29,6 milhões de hectares (ANA, 2013).

Os maiores acréscimos de demanda ocorrem principalmente nas Bacias dos Rios São Francisco e Tocantins-Araguaia, sendo que, em termos de vazão de retirada para irrigação no País, o aumento foi de 73%. Tal aumento ocorre em função da expansão da irrigação nessas bacias. Verificando a área atualmente irrigada e a possibilidade de expansão da mesma, torna-se necessário um planejamento com vista à futura adequação da oferta e demanda, para resolver os possíveis conflitos. Em 1970, a irrigação correspondia a apenas 2,3% da área cultivada, chegando a 6,0% em 1995 e alcançando o patamar de 8,3% em 2012 (ANA, 2013). Em contrapartida, outros países apresentam valores mais elevados de percentagem da área irrigada como Paquistão (78%), Índia (30%), México (39%), China (32%) (adaptado de CHRISTOFIDIS, 2002).

Segundo dados da FAO, o Brasil está entre os quatro países com maior área potencial para irrigação, embora apenas uma pequena parte seja utilizada. O grande potencial se deve tanto à extensão territorial quanto ao conjunto de fatores físico-climáticos, favoráveis ao desenvolvimento da atividade (FAO, 2014). Devido aos recentes aumentos na demanda de *commodities* agrícolas e à crise de alimentos em países pobres em desenvolvimento, a necessidade de melhorar a eficiência do uso da água na produção das culturas nunca foi tão evidente.

Estudar a resposta da produtividade da cultura, associada a diferentes lâminas de irrigação em campo e/ou experimentos controlados é trabalhoso e dispendioso. Considerando tais limitações, a modelagem de simulação de cultura pode ser uma ferramenta útil para estudar e desenvolver estratégias promissoras de déficit de irrigação, estimar a necessidade hídrica da cultura ao longo do ciclo, além de fornecer subsídio para uso da função de produção de água (BLUM, 2009; GEERTS & RAES, 2009).

Os modelos de culturas são formados por um conjunto de algoritmos organizados, que descreve processos físicos e fisiológicos, utilizado para estimar o crescimento, desenvolvimento e produção 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.

O AquaCrop, modelo recentemente desenvolvido por Raes et al. (2009) e Steduto et al. (2009), visa a 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. Sendo a maioria destes parâmetros explícitos ou intuitivos, podem 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), sob diferentes condições ambientais. 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 déficit e irrigação.

Todorovic et al. (2009), avaliando os modelos AquaCrop, WOFOST e CropSyst, para a cultura do girassol, concluíram que o modelo AquaCrop introduziu simplificações notáveis e exige menos parâmetros de entrada do que os outros dois modelos, sem afetar negativamente o seu desempenho, na predição da biomassa final, produtividade e eficiência de uso da água.

Desta maneira, buscou-se implementar o modelo, parametrizado 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, aumento do consumo de água.

Por tais razões, o objetivo do presente trabalho foi realizar a parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar, de modo a torná-lo aplicável na avaliação da produtividade, em função da necessidade de água, fornecendo uma ferramenta importante no estudo de déficit hídrico, bem como averiguar a eficiência de uso da água.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

2.1.1 Origem e importância

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma planta com metabolismo fotossintético C4, originária do Sudeste Asiático, na região centrada em Nova Guiné e Indonésia (MOZAMBANI et al., 2006). Através de migrações no período compreendido entre os anos 8000 a 6000 AC, expandiu-se para Nova Caledônia, Indonésia, Filipinas e norte da Índia, onde foram encontrados registros com mais de 8.000 anos. Posteriormente, atingiu a Europa, a África e as Américas, incluindo o Brasil (JAMES, 2004).

A cultura da cana-de-açúcar estabeleceu ciclos históricos de grande importância econômica, política e social para o Brasil desde sua introdução pelos portugueses na época colonial. Juntamente com o milho e a soja, são as culturas de maior importância econômica no Brasil.

O Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar do mundo, responsável por aproximadamente 20% da produção e 40% das exportações, segundo dados da União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA). De acordo com a UNICA (2014), o segmento atingiu na última safra, a 2013/14, o produto interno bruto (PIB) de US\$ 43,3 bilhões, sendo que o setor sucroenergético representou em 2013 1,3% dos empregos formais do Brasil, o que equivale a aproximadamente 613,2 mil postos de trabalho. Além disso, a qualificação da mão de obra local, o impacto na renda das famílias e no PIB dos municípios, o aquecimento do setor de serviços, que gira em torno desses negócios são uma consequência dessa expansão.

A área cultivada com cana-de-açúcar, colhida na safra 2013/14, e destinada à atividade sucroalcooleira foi de 8,81 milhões de hectares, sendo o estado de São Paulo o maior produtor da cultura, com 51,7% (4.552.040

hectares) da área plantada, seguido por Goiás, com 9,3% (818.390 hectares) e Minas Gerais, com 8,9% (779.830 hectares) (CONAB, 2014).

A área de cana-de-açúcar, destinada à produção neste ano safra, deve apresentar o crescimento de 3,8% ou 326 mil hectares em relação à safra anterior. Esse aumento está concentrado nos estados que apresentaram grande número de novas usinas e corresponde à consolidação da área ocupada pelas mesmas. São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais respondem pela maior parte desse crescimento (CONAB, 2014).

Segundo dados da UNICA, na safra 2012/2013 foram processadas aproximadamente 589 milhões de toneladas, na região Centro Sul, responsável por grande parte da produção nacional, sendo a produtividade média brasileira em torno de 69 ton.ha⁻¹, maior que as 67 ton.ha⁻¹ obtidas na safra 2011/12. Na safra 2013/14, foram moídas 596 milhões de toneladas. Deste total, foram processados aproximadamente 45% para a produção de açúcar e os restantes 55% para a produção de etanol (UNICA, 2014).

Apesar dos baixos valores de produtividade encontrados no Centro Sul do país, a produtividade do Brasil é a segunda maior no mundo, atrás apenas da Austrália, que apresentou uma produtividade média de aproximadamente 77 ton.ha⁻¹, para a safra de 2012/2013 (FAO, 2014).

O potencial de produtividade da cana-de-açúcar vai além dos valores de produtividade atualmente obtidos. Assim, a utilização da irrigação e variedades mais produtivas, entre outros seria uma solução para a expansão da produção da cana-de-açúcar. Contudo, num cenário de escassez de água, a utilização da irrigação poderá ser um empecilho. Desta maneira, o conhecimento das diferentes respostas da cultura à quantidade de água aplicada será de grande valia.

2.1.2 Cana planta e cana soca

O conhecimento do ciclo da cana-de-açúcar é primordial na modelagem do crescimento da cultura. O ciclo da cana, plantada pela primeira vez, oriunda de partes vegetativas e que receberá o primeiro corte, recebe o nome de ciclo da cana planta. Após o corte da cana planta, permanecem no solo as socas ou soqueiras da cana-de-açúcar, que geralmente apresenta uma redução na produtividade.

Devido à queda na produtividade, faz-se necessária a renovação dos canaviais, sendo que a longevidade dos canaviais depende de fatores como uso da irrigação, adubação entre outros. Segundo as estimativas da UNICA, a idade média dos canaviais, na região Centro Sul, na safra 2013/14, deve ficar em torno de 3 anos (UNICA 2014).

Para atingir alta produção de matéria seca e de sacarose, o manejo da época de plantio é importante. Assim, a planta se desenvolve, durante o período em que as condições de temperatura e umidade adequadas permitem o máximo crescimento na fase vegetativa e em que se inicia o acúmulo de sacarose nos colmos, o que é favorecido pelo intervalo em que há restrição hídrica ou térmica (TERAMOTO, 2003).

Geralmente, devido às condições do clima do Brasil, o plantio da cana-de-açúcar é realizado em épocas distintas, proporcionando cultivos conhecidos como sistema de ano e sistema de ano e meio (CARVALHO, 2009; SEGATO et al., 2006). Há, ainda, uma terceira terminologia: plantio de inverno.

O sistema de cana de ano também recebe a denominação de cana de 12 meses. A cana é normalmente plantada entre setembro e novembro (região Centro Sul), no início da estação chuvosa, com colheita após o ciclo médio de 12 meses (Figura 1).



Figura 1 - Ciclos da cana-de-açúcar e variações na temperatura do ar e precipitação na região Centro-Sul do Brasil. Fonte: Castro, (1999) adaptado de Scarpere, (2011)

Neste sistema, o canavial apresenta máxima taxa de crescimento entre novembro e abril, em virtude da maior radiação, alta temperatura e

disponibilidade hídrica, diminuindo após esse período, em razão das condições climáticas adversas, com possibilidade de colheita, dependendo da cultivar, a partir do mês de julho. (SEGATO et al., 2006). No Nordeste, o plantio da cana de ano ocorre entre setembro e fevereiro e a colheita vai de setembro a março.

Na região Centro Sul, a cana no sistema de ano e meio é plantada entre janeiro e março (na estação chuvosa e quente) e colhida entre maio e novembro do ano seguinte, dependendo da época de maturação e da cultivar utilizada, permanecendo em média de 14 a 18 meses no campo, daí sua designação sistema de ano e meio. Neste sistema, após seu estabelecimento, o canavial passa por um período de crescimento lento durante seu primeiro inverno, sendo cortado no inverno do ano seguinte (MARIN et al., 2009). Assim, como na cana-de-ano, o período de maior crescimento da cana-de-ano-e-meio também vai de novembro a abril, mas o canavial atinge este período mais desenvolvido, sendo capaz de responder em crescimento vegetativo mais rapidamente às condições ambientais favoráveis à cultura (SEGATO et al., 2006). No nordeste, a cana de ano e meio é plantada entre os meses de junho e setembro.

O plantio de inverno é estabelecido, do final de maio a agosto, sendo assim, designada por ser plantada nos períodos de menores temperaturas. A disponibilidade de água é sua maior limitação. Entretanto, apresenta menor período de utilização do solo (12-14 meses), em média.

O corte da cana-de-açúcar resulta na renovação da cultura, não só da parte aérea, mas também do seu sistema radicular. O sistema radicular apresenta-se mais superficial na soqueira do que na cana planta e cerca de 60% das raízes se encontram na camada de 0 a 30 cm (SEGATO et al., 2006).

As soqueiras da cana-de-açúcar têm o desenvolvimento semelhante ao observado na cana planta. Porém, apresentam diferenças específicas no processo de enraizamento e brotação da soca. Geralmente, apresentam queda de produtividade em relação à cana planta devido, sobretudo, ao menor vigor vegetativo da cultura, à menor população de colmo em decorrência da compactação do solo, à queda de fertilidade do solo sob uso contínuo de cana e utilização ineficiente de fertilizantes e problemas relacionados à colheita, como o pisoteio das soqueiras (MARIN et al., 2009).

2.1.3 Fenologia

A fenologia estuda as mudanças exteriores (morfologia) e as transformações que estão relacionadas ao ciclo da cultura, em relação às condições ambientais. Representa, portanto, o estudo de como a planta se desenvolve ao longo de suas diferentes fases: germinação, emergência, crescimento e desenvolvimento vegetativo, florescimento, frutificação, formação das sementes e maturação (BARBOSA, 2010).

O conhecimento das fases fenológicas da cultura é de fundamental importância, na modelagem do crescimento da mesma, uma vez que está diretamente relacionado à dinâmica do crescimento.

A formação do dossel desempenha papel fundamental, na demanda de água e nutrientes pela planta, na produção, interceptando a radiação solar, influenciando nos processos fotossintéticos e na transpiração da cultura, além de evitar o aparecimento de plantas daninhas, sendo considerado crucial na determinação da produtividade agrícola (SMIT & SINGELS, 2006).

Doorenbos e Kassam (1979) definem três fases para a cana-de-açúcar: a primeira é a de estabelecimento e período vegetativo, a segunda é a da formação da produção e a terceira é a da maturação. Almeida et al. (2008), avaliando o crescimento de quatro cultivares, separaram em três fases o ciclo de crescimento da cultura, sendo que a determinação das fases de crescimento foi realizada de acordo com as taxas de crescimento da cultura: fase 1 - estabelecimento taxas de crescimento entre 0,2 a 0,9 cm dia⁻¹, fase 2 - crescimento linear maior que 0,9 9 cm dia⁻¹ e fase 3 - maturação-menor que 0,2 cm dia⁻¹.

Santos et al. (2009), avaliando o crescimento da cultivar RB75126, separaram também em três fases de crescimento o ciclo de cana planta: 1ª fase – de intenso perfilhamento, até 120 dias após o plantio (DAP); 2ª fase – de grande crescimento em altura, estabilização do índice de área foliar (IAF) e intenso acúmulo de biomassa, de 120 a 240 DAP; e 3ª fase – de maturação dos colmos, entre 240 e 360 DAP.

Gascho e Shih (1983) definiram quatro fases de desenvolvimento ou fenológicas para a cultura da cana-de-açúcar: brotação e estabelecimento, perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação (Figura 2).

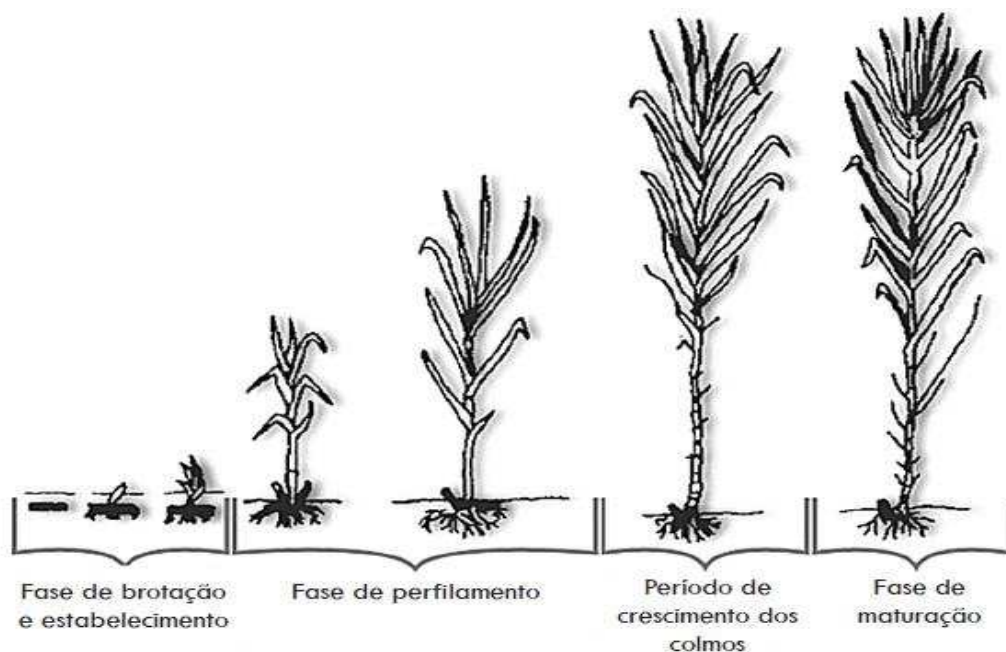


Figura 2 - Fases de desenvolvimento da cana (GASCHO & SHIH, 1983)

A fase de emergência e/ou brotação ocorre após o plantio dos toletes para cana planta e após a colheita para cana soca. Sob boas condições de solo e influenciada por fatores externos ao tolete (umidade, temperatura do solo e aeração) e por fatores internos (sanidade da gema, conteúdo de água e reservas do tolete) a brotação pode iniciar de sete a 10 dias e pode durar de 30 a 50 dias (PARANHOS, 1987).

Para uma mesma cultivar, a intensidade da brotação pode variar de acordo com a idade da gema, a idade da muda, o grau de umidade do tolete e a concentração de açúcares e nutrientes, sendo que algumas cultivares apresentam baixa brotação a partir do tolete, mas mostram ótimos resultados na brotação da soqueira (SEGATO et al., 2006).

Na fase inicial, o crescimento é lento, devido à dependência das reservas contidas nos toletes. Logo após o desenvolvimento do sistema radicular e a emergência das folhas, a planta tem um rápido crescimento através da retirada de água e nutrientes do solo e da atividade fotossintética (LUCCHESI, 1987).

Na fase de perfilamento, originam-se brotações do colmo primário, chamadas colmos secundários. Há, também, a possibilidade de haver brotações dos colmos secundários, denominadas colmos terciários. À medida que tais colmos vão aparecendo, o sistema radicular desses contribuem para a expansão do sistema radicular da touceira. Essa fase ocorre de 20 a 30 dias após o aparecimento do colmo primário. O número de perfilhos por unidade de

área é uma variável importante porque está associado à produtividade dos cultivos (SEGATO et al., 2006).

A fase de perfilhamento é governada inicialmente pela temperatura do ar e radiação solar, porém, também é afetada pelas características genéticas da cultivar, densidade de plantio, ciclo (cana planta ou cana soca) e disponibilidade de água e nutrientes. A cana-de-açúcar perfilha nos primeiros meses, após o plantio ou a rebrota, e esse perfilhamento intensifica-se à medida que as condições de temperatura e disponibilidade hídrica são favorecidas. Após este período, o número de perfilhos diminui até se estabilizar (SUGUITANI, 2006). Tokeshi (1986) verificou que é importante ressaltar que, na curva de perfilhamento da cana-de-açúcar, o seu ponto máximo ocorre, em geral, entre quatro e seis meses em cana planta.

Segundo Segato et al. (2006), no momento de máximo perfilhamento, algumas cultivares de cana-de-açúcar podem ter 25 ou mais perfilhos, por touceira. Uma vez atingido o máximo perfilhamento, a competição entre os perfilhos pelos fatores de crescimento torna-se elevada, resultando em redução do perfilhamento por meio da diminuição e paralisação deste processo, além da morte dos perfilhos mais jovens (CÂMARA, 1993)

A fase de crescimento dos colmos se caracteriza pelo crescimento e desenvolvimento em altura e diâmetro dos colmos, sobreviventes da fase de perfilhamento. Nessa fase, começa o acúmulo de sacarose, na base do caule; as folhas mais velhas secam e há o crescimento intenso do sistema radicular. Essa fase se inicia no auge do perfilhamento e vai até o início da maturação (SEGATO et al., 2006).

Na fase de maturação, ocorre o acúmulo intenso de sacarose nos colmos. Esse acúmulo é fortemente influenciado por condições ambientais, que desfavoreçam o crescimento vegetativo, como secas, temperaturas baixas (SEGATO et al., 2006).

A modelagem do crescimento do dossel da cana-de-açúcar, pelo AquaCrop, está baseada na porcentagem de cobertura do solo pelo dossel e assume uma grande importância no processo de simulação e ganho de biomassa. Desta maneira, o conhecimento das características das fases de crescimento da cultura é de grande relevância.

2.1.4 Exigências agrometeorológicas

A cana-de-açúcar é uma cultura bem adaptada às condições tropicais e subtropicais, que se caracterizam por alta disponibilidade de água e de radiação solar, sendo cultivada numa ampla faixa de latitude, desde 37°N a 30°S e em altitudes que variam desde o nível do mar até 1.700 metros (CARR & KNOX, 2011). A diversidade ambiental dessa ampla faixa de cultivo promove o crescimento e produtividades distintas, devido à variabilidade dos fatores edafoclimáticos (OLIVEIRA, 2008).

A cana apresenta alta taxa fotossintética e eficiência na utilização e resgate de CO₂ (gás carbônico), adaptada à alta intensidade luminosa, altas temperaturas e relativa escassez de água. Dado o longo período de cultivo, a cana-de-açúcar é influenciada pelas variações climáticas que ocorrem durante todo ano. O comportamento vegetativo da cana-de-açúcar é altamente dependente de fatores climáticos. As variações na disponibilidade térmica, pluviosidade, intensidade de luz exercem grande influência sobre o desenvolvimento fenológico da cultura, afetando sua produtividade (LIU et al., 1998; SMIT & SINGELS, 2006; UEHARA et al., 2009).

Segundo Sinclair et al. (2004), a temperatura do ar é um dos fatores mais importantes na produção da cana-de-açúcar e a determinação das temperaturas basal e ótima da cultura é de fundamental importância na modelagem do processo de crescimento, já que estes componentes estão diretamente relacionados com a taxa de crescimento.

Há um elevado número de publicações sugerindo limites térmicos para a cultura (MARIN et al., 2009). Verifica-se a inconsistência quanto à informação dos parâmetros térmicos, principalmente relacionados à temperatura basal.

Para dados obtidos em ambiente controlado, a temperatura basal é frequentemente calculada da relação linear entre o período de desenvolvimento e do intervalo de temperatura testado. No campo, a determinação dos parâmetros térmicos é ainda mais complicada porque não há temperatura constante, na qual a taxa de crescimento possa ser relacionada diretamente (LIU et al., 1998).

Sinclair et al. (2004) observaram diferentes limites de temperaturas mínimas para o desenvolvimento das folhas entre as cultivares, bem como a

temperatura basal, para o desenvolvimento das folhas, girava em torno de 10°C.

Para Barbieri et al. (1981), a temperatura basal para a emergência da cana é de 21°C e, segundo Suguitani (2006), temperaturas abaixo de 5°C paralisam o processo de perfilhamento da cana-de-açúcar.

Inman-Bamber (1994) e Robertson e Donaldson (1998) reportaram valores entre 8 e 15°C. Barbieri et al. (1981) determinaram, em condições de campo, que a temperatura basal para a cana-de-açúcar é de aproximadamente 20°C. Uma possível explicação para esta estimativa incompatível da temperatura basal é que, em condições de campo, temperaturas mínimas ou máximas diárias ultrapassam o valor da temperatura basal. Nestas condições, os métodos existentes influenciam normalmente o acúmulo da soma térmica (LIU et al., 1998).

Amplitudes térmicas diárias geram temperaturas máximas e mínimas distintas ao longo do período. Entretanto, podem ocasionar a mesma temperatura média. Este fato pode interferir na determinação da temperatura basal, gerando valores distintos para um mesmo local (CORRÊA, 2013). Outro agravante na determinação da temperatura basal é o processo de aclimação ao frio, desenvolvido pelas plantas. Numerosos efeitos fisiológicos e bioquímicos ocorrem, modificando a sensibilidade das plantas a baixas temperaturas e, por consequência, o crescimento pode ou não ser interrompido (XIN & BROWSE, 2000).

Dada essa grande variabilidade de dados, torna-se difícil inferir um valor exato sobre a temperatura basal, além do que, a cultura apresenta diferentes valores de temperatura basal para as fases de crescimento da cultura, que torna mais complexo o processo de simulação.

Segundo Doorenbos e Kassam (1979), a temperatura do ar ótima de crescimento ocorre entre 22 e 30°C, condições nas quais a cultura apresenta seu máximo desenvolvimento. Na fase de perfilhamento, Suguitani (2006) afirma que a temperatura ideal está entre 27°C e 32°C. Barbieri et al., (1981) verificou que a temperatura ótima de crescimento na fase de emergência é de 32°C.

Em relação à temperatura do ar máxima, alguns autores afirmam que o crescimento é nulo acima de 38°C (MAGALHÃES, 1987, MARIN et al., 2009,

BRUNINI, 2010), e outros citam temperaturas acima de 45°C (SUGUITANI, 2006)

A radiação solar é um fator climático importante na formação e crescimento dos perfilhos. O perfilhamento é favorecido pela radiação solar, sob condições de alta intensidade luminosa e durante os períodos em que o IAF é relativamente baixo. A variação da densidade de perfilhos, nestas fases, varia de acordo com a intensidade luminosa, sendo que, em condições de intensidade excessiva de radiação solar, a cultura pode promover a foto-oxidação do ápice, reduzindo o alongamento e aumentando o número de perfilhos. Por outro lado, a baixa luminosidade reduz drasticamente a emissão de novos perfilhos. Na fase final de perfilhamento, o auto-sombreamento induz inibição do perfilhamento por competição intraespecífica e acelera o crescimento do colmo principal (CÂMARA, 1993, CORRÊA, 2013)

A área foliar tem grande importância, para os valores da fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (f_{RFA}) (faixa espectral de 0,4 a 0,7 μm utilizada na fotossíntese), que pode ser afetada pelo espaçamento de plantio, tipo de ciclo (planta ou soca), data de início do ciclo e variedade (SINGELS & SMITH, 2002; SINGELS et al., 2005). A f_{RFA} fornece uma estimativa indireta da percentagem de cobertura do solo pelo dossel.

Singels et al. (2005), analisando os efeitos da data de plantio ou de início de soca (dezembro e junho) no desenvolvimento do dossel e na f_{RFA} da cana-de-açúcar, cultivada em Mount Edgecombe, África do Sul, verificaram que as variedades NCo376 e CP66/1043 atingiram valores de 80% de f_{RFA} mais rápidos, quando o ciclo teve início em dezembro. Quando comparado com o início em junho, estes autores observaram que a cana-de-açúcar, durante o ciclo de soca, atingiu 80% de f_{RFA} mais rápido do que a cana planta, uma vez que no início do ciclo da cana soca existe maior número de gemas, para promover a emissão de perfilhos.

Inman-Bamber (1994) verificou este mesmo comportamento, mostrando que o tempo, para a primeira soqueira alcançar 70% de interceptação da f_{RFA} , é afetado significativamente pela data de plantio. A cana plantada no inverno levou de duas a três vezes mais tempo para alcançar a interceptação de 70% desta radiação, em relação àquelas plantadas no verão. Verificou-se também que a segunda soqueira conseguiu atingir este patamar de interceptação mais

cedo do que a primeira soqueira, ambas iniciadas no mesmo ano e na mesma data.

Apesar da importância da radiação no desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar e da alta eficiência no uso da radiação, no modelo AquaCrop, a água é que assume a função primordial no processo de simulação. Ao contrário do que ocorre em outros modelos, como o DSSAT/CANEGRO e APSIM, em que a radiação assume o papel principal do modelo, a conversão da radiação é utilizada na produção de biomassa.

2.1.5 Necessidade hídrica da cana-de-açúcar

O consumo de água pela cultura varia em função da área foliar, do estágio fenológico, do ciclo da cultura (cana planta ou soca), das condições climáticas, da densidade do sistema radicular, da água disponível no solo, entre outros fatores (MARIN et al., 2009).

Além disso, a evapotranspiração da cana-de-açúcar pode ser influenciada por fatores inerentes às condições ambientais, técnicas agrícolas, sistema de irrigação, período de plantio, idade do corte e variedades, por isso, é comum encontrar valores diferenciados de requerimento hídrico da cultura.

Sobre o consumo de água da cana-de-açúcar, vários autores têm procurado determinar as necessidades hídricas da cultura, mas os resultados diferem significativamente em relação aos métodos de cálculo e às condições do experimento.

Pacheco et al. (1983) observaram valores de evapotranspiração acumulada para a cana-de-açúcar entre 1600 mm e 1800 mm, na Província de Matanzas, em Cuba; 1420 mm a 1650 mm, em Porto Rico; 1936 mm, na Argentina. Porém, estes valores tendem a diminuir com o ciclo da cultura (cana planta, primeira soca e segunda soca).

A disponibilidade hídrica é considerada como uma das principais causas da variação da produtividade agrícola (VAN DEN BERG et al., 2000). Segundo Doorenbos e Kassam (1979), dependendo do clima e do solo, a quantidade de água que a cana-de-açúcar necessita varia de 1500 e 2500 mm por ano. Porém, em muitas regiões do país, ocorre má distribuição, podendo chover até 70% do total anual em um curto período e somente 30% no restante do ano, o que pode coincidir com a fase de grande desenvolvimento da cana-de-açúcar com maior exigência hídrica, contribuindo para as baixas produtividades

(SOUZA et al., 2004). Santos et al. (2007) corroboraram com a assertiva de Souza et al. (2004) e verificaram que a cana-de-açúcar não teve suas necessidades hídricas atendidas, em regiões que apresentavam chuva média anual inferior a 1500 mm.

Lyra et al. (2007) estimaram a evapotranspiração da cultura (ETc), em cana planta, entre 1180 mm e 1950 mm no ciclo, utilizando, nos cálculos, Kc dual e único, respectivamente, para o estado de Alagoas.

Souza et al. (1999), em cultivo de cana-soca com idade de 13 meses e utilizando sistema de irrigação por aspersão, tipo canhão, encontraram para as variedades RB72454, RB76418 e SP70-1011, máximas produtividades em colmos da ordem de 155,8, 126,9 e 141,9 ton.ha⁻¹, com lâminas de água de 1568, 1424 e 1589 mm, respectivamente.

Maule et al. (2001) estudaram a produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar, em diferentes solos e épocas de colheita, no estado de São Paulo. Estes autores verificaram que a cultivar SP79-1011 obteve produtividades médias de 149, 154 e 170 ton.ha⁻¹, com lâminas totais de 1478, 1695 e 1829 mm, para ciclos de 14, 17 e 19 meses, respectivamente. Azevedo (2002) encontrou, para a mesma cultivar, cultivada nos tabuleiros costeiros da Paraíba, produtividades de 52, 79, 93 e 92 ton.ha⁻¹, para uma precipitação efetiva junto com a irrigação de 609, 761, 905 e 1043 mm, respectivamente, durante 12 meses de cultivo.

Oliveira et al. (2011), avaliando a eficiência de uso da água de 11 variedades de cana, observaram produtividade de 255 ton.ha⁻¹, para a variedade RB92579, aplicando uma lâmina total de 1396 mm, sendo que o tratamento de sequeiro apresentou uma produtividade de 90 ton.ha⁻¹, para uma precipitação de 1141 mm.

A associação da irrigação com cultivares adaptadas para diversas condições proporciona incrementos na produção de colmos. No Nordeste, na maioria das unidades da região, tem-se observado elevadas produtividade agrícola (média acima de 80 ton.ha⁻¹) e elevadíssima produtividade quando sob irrigação (média acima de 140 ton.ha⁻¹). Esses resultados, com o cultivo da RB92579, têm marcante contribuição para a competitividade de muitas empresas da região. Um exemplo é a usina Agrovale, na Bahia, em área de 60 ha com RB92579 sob irrigação, na qual foram obtidas 260 ton.ha⁻¹, um recorde

mundial de máximo comercial (CATÁLOGO NACIONAL DE VARIEDADES "RB" DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2010).

Em relação à ETc, Casagrande (1991) cita que Barbieri et al. (1981), utilizando um evapotranspirógrafo, encontraram valores entre 0,5 a 6,03 mm dia⁻¹ da emergência à fase de pico (novembro), decaindo para 2,8 mm dia⁻¹ no início da maturação.

Scarpore (2011) cita vários estudos, que apontam determinações de consumo hídrico, obtidas em campo para a cultura, em função de distintos métodos de cálculo da evapotranspiração e locais. O autor verificou valores de ETc mínimo variando de 0,5 a 4,1 mm dia⁻¹, e valores de ETc máxima variando de 2,8 a 8,6 mm dia⁻¹.

Verifica-se variação dos valores observados na literatura e algumas discrepâncias nos mesmos, que ocorrem devido ao uso de diferentes metodologias para o cálculo da ETc. Alguns trabalhos utilizam o tanque classe A (OLIVEIRA et al., 2011), evapotranspirógrafo (BARBIERI et al., 1981), outros, o método de Penman-Monteith (LYRA et al., 2007). Além disso, a demanda evapotranspirativa varia de acordo com as condições climática, por isso, as grandes diferenças dos valores relatados na literatura.

2.1.6 O déficit hídrico na cana-de-açúcar

O conhecimento do comportamento fisiológico da cultura em resposta ao déficit hídrico é essencial para a escolha da melhor cultivar e das práticas de manejo que visem aperfeiçoar a exploração dos recursos naturais. Podendo auxiliar os programas de melhoramento genético, pois a resistência ao déficit hídrico pode ser uma importante característica para seleção de cultivares.

O estresse hídrico geralmente é definido como um fator externo, que exerce influência negativa sobre a planta (SILVA & PINCELLI, 2010). Na cultura da cana-de-açúcar, a deficiência hídrica é um dos fatores ambientais responsáveis por maiores danos à produção, principalmente por afetar a cultura, mesmo nas estações mais chuvosas, em decorrência de veranicos. Na Austrália, estima-se que o estresse hídrico custe à indústria da cana-de-açúcar, em média, 260 milhões dólares, por ano, devido às perdas na produção (INMAN-BAMBER, 2007).

Em razão da diminuição da disponibilidade de água, é necessário o uso de estratégias de manejo que possibilitem economia de água sem prejuízos

significativos na produtividade. Vários estudos têm mostrado que uma das promissoras estratégias de irrigação pode ser a irrigação com déficit, em que a quantidade de água menor do que a necessária é aplicada durante determinado período de crescimento da cultura (FERERES & SORIANO, 2007; BEHERA & PANDA, 2009; BLUM, 2009).

Apesar do uso da irrigação com déficit, uma elevada produtividade ainda pode ser alcançada através do fornecimento da quantidade necessária de água de irrigação, na fase mais sensível do crescimento da cultura, e restringindo o estresse hídrico para estágios mais tolerantes de crescimento (BLUM, 2009; GEERTS & RAES, 2009). Promovendo assim o aumento na eficiência de uso da água pela cultura.

Segundo Inman-Bamber e Smith (2005), os efeitos do déficit hídrico no dossel da cana-de-açúcar podem levar a significativa redução da área foliar devido ao aumento da senescência das folhas e diminuição da taxa de emergência de folhas novas. Os autores relatam ainda que as folhas tendem a se acumular no cartucho durante períodos de estresse hídrico e boa parte dessas folhas retoma novamente o crescimento quando cessa o estresse hídrico.

A redução da formação de folhas verdes tem sido atribuída à estratégia para diminuir a superfície transpirante e o gasto metabólico para a manutenção dos tecidos (INMAN-BAMBER, 2004; INMAN-BAMBER & SMITH, 2005; INMAN-BAMBER et al., 2008; LANDELL et al., 2010). Inman-Bamber (2004) ressalta que os veranicos afetam negativamente o desenvolvimento do dossel da cana-de-açúcar diminuindo a formação de novos perfilhos e folhas, acelerando a senescência dos mesmos.

De acordo com Inman-Bamber e Smith (2005), algum grau de adaptação ao estresse hídrico foi observado para algumas cultivares de cana-de-açúcar. Estas cultivares mostraram peculiaridades para evitar o estresse hídrico, tais como: enrolamento da folha (reduzindo a projeção de área foliar e conseqüentemente a radiação incidente), fechamento precoce dos estômatos, a queda de folhas e área foliar reduzida, características estas que conferem tolerância à seca.

Na cana-de-açúcar, o déficit hídrico provoca a redução no acúmulo de biomassa com impacto na produtividade final (WIEDENFELD, 2000; INMAN-BAMBER, 2004). Inman-Bamber et al. (2012), relatam poucos estudos sobre a

natureza do estresse hídrico na senescência de colmos, mas a experiência mostra que o colmo entra em senescência quando submetido a estresse muito severo podendo, eventualmente, exigir um replantio. Inman-Bamber (2004) observou que a população de perfilhos de duas cultivares permaneceram inalteradas durante certo período sem irrigação, suficientemente longo para reduzir o acúmulo de biomassa em 70%, sugerindo assim a necessidade de um estresse extremamente severo para ocasionar a perda do colmo.

O grau de injúria devido o estresse hídrico depende consideravelmente do estágio fenológico da planta, da duração do estresse e do genótipo cultivado (SMIT & SINGELS, 2006, FARIAS et al., 2008). Thompson (1976) afirma que os períodos de deficiência hídrica podem ocorrer durante todo ciclo da cultura, mas seu efeito sobre a produtividade varia em função da interação entre época do ano em que ocorrem e a fase do ciclo fenológico da cultura. Já Doorenbos e Kassam (1979) afirmam que o efeito do estresse hídrico varia com o estágio de desenvolvimento da cana, e que o primeiro estágio é o mais sensível ao estresse.

Rosenfeld (1989) analisando os diferentes períodos crítico de deficiência hídrica para cana planta verificou que o início do estágio de máximo desenvolvimento da cana planta é o período mais sensível ao déficit hídrico. Pires et al. (2008) e Carvalho (2009) observaram que o período de maior suscetibilidade ao déficit hídrico é o de rápido desenvolvimento (fase de alongação dos colmos), quando as plantas apresentam grande área foliar e necessitam de maior quantidade de água para realizar as trocas gasosas

Apesar de não haver concordância entre os autores, fica claro que o déficit afeta a cultura de diferentes formas, de acordo com a fase de desenvolvimento e da intensidade do mesmo. Deve-se salientar que, estes autores apresentam resultados para diferentes cultivares e tipos de solo, e muitas vezes sem a observação dos valores de déficit de água no solo. Os mesmos apenas avaliam os efeitos do corte da irrigação, e suas implicações na cultura. Sendo que para uma melhor avaliação dos reais impactos do déficit hídrico na cultura, principalmente na produção, o mesmo deveria ser feita para as mesmas condições, ou seja, aplicando déficit de água no solo iguais nas diferentes fases do crescimento e avaliando os impactos na produção.

2.2 Modelagem de sistemas agrícolas

2.2.1 Modelos de simulação

Os modelos são geralmente definidos como simplificação ou abstração de um sistema real (LOOMIS et al., 1979). Este é particularmente o caso dos modelos de sistemas biológicos, como culturas, nas quais a realidade é composta por vasto número de componentes e processos que interagem sobre uma ampla gama de níveis de organização (SINCLAIR & SELIGMAN, 1996). Dada à complexidade deste sistema e ao estado incompleto do conhecimento presente, torna-se impossível representar plenamente o sistema em termos matemáticos e por isto, os modelos de cultura apresentam simplificações da realidade.

Especificamente, um modelo de cultura pode ser descrito como sistema quantitativo para prever o crescimento, o desenvolvimento e a produção de certa cultura, dado o conjunto de características genéticas e variáveis ambientais relevantes (MONTEITH, 1996).

Geralmente, os modelos são classificados como empíricos ou mecanísticos. Os modelos mecanísticos requerem que os processos simulados descrevam o sistema em termos dos mecanismos físicos, químicos e biológicos. Já os modelos empíricos consistem em analisar dados experimentais realizando algumas análises dos mesmos e ajustando equações matemáticas que possam representar o comportamento dos dados observados (MONTEITH, 1996).

Os modelos mecanísticos, devido a sua concepção, podem ser utilizados para explorar uma gama extensiva de tratamentos em locais diferentes que não seria possível com experimentação de campo, devido ao custo e o tempo requerido (MONTEITH, 1996).

Devido à complexidade do sistema agrícola, modelos com níveis organizacionais distintos são encontrados na literatura operando desde a escala de um país ou continente, passando obviamente pela escala regional, de bacia hidrográfica, lavoura, a escala de planta até a escala celular. A escala da planta, de modo geral, é o nível de maior interesse para o modelador agrícola, por associar as reações e inter-relações do nível de tecidos e órgãos à escala de planta, e extrapolando para escalas maiores (SCARPARE, 2011).

De acordo com Whisler et al. (1986), Boote et al. (1996); Suguitani, (2006), o uso dos modelos para sistemas agrícolas é uma ferramenta de pesquisa interdisciplinar que integra o conhecimento podendo sintetizar os dados de um ou mais experimentos além de auxiliar no melhoramento genético e aumento do rendimento potencial, simulando as características genéticas das plantas; permite, ainda, verificar o efeito da taxa fotossintética nas folhas; prever os rendimentos e eventuais quebras de safras; administrar a irrigação e a adubação; prever as respostas da cultura a diferentes espaçamentos e efeitos de mudanças climáticas na cultura; além de otimizar o planejamento de plantio e colheita; auxiliar pesquisadores e produtores no manejo cultura, bem como diminuir gastos com a experimentação

Segundo Argenton (2006), qualquer que seja a escala ou objetivo da modelagem, os modelos utilizados como suporte para a tomada de decisões geralmente contêm complexidade correspondente ao seu nível de detalhamento. Modelos de longo prazo (anuais ou maiores), e em grandes dimensões (planejamento nacional de safra), possivelmente são baseados em dados empíricos, geralmente oriundos de regressão entre o rendimento da cultura e outros fatores, como precipitação pluvial ou capacidade de armazenamento de água no solo. Por outro lado, existem modelos baseados em dados provenientes de processos que ocorrem no dossel das culturas, operando em base de dados diário, alimentados com rigor mecanicista.

2.2.2 Modelo FAO 33: origem e limitações

A complexidade das respostas da cultura ao déficit hídrico levou anteriormente o uso das funções de produção empíricas como a opção mais prática para avaliar o rendimento das culturas em resposta à disponibilidade hídrica. Entre os métodos mais utilizados com base nesta abordagem, encontra-se o boletim de Irrigação e Drenagem nº 33 da FAO, intitulado “Efeito da Água no Rendimento das Culturas” (DOORENBOS & KASSAM, 1979) utilizando a metodologia proposta por Stewart e Hagan (1973) e Stewart et al. (1977).

Doorenbos e Kassam (1979) formularam um modelo simples em que a produtividade e a evapotranspiração são consideradas em termos relativos, com respeito a seus valores máximos, quantificando o efeito do déficit de água

no solo sobre o decréscimo da produtividade potencial, ocorrida durante o ciclo da cultura.

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (1)$$

em que:

Y_a – é o rendimento real ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$);

Y_m – é o rendimento máximo ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$) sendo o rendimento máximo no qual não há estresse;

ET_a - é a evapotranspiração real (mm);

ET_m – é a evapotranspiração máxima (mm); e

K_y – é o coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (adimensional).

O coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (K_y) capta a essência das ligações complexas entre a produção e o uso da água por certa cultura. A relação tem mostrado notável validade e permitiu um procedimento viável para quantificar os efeitos do déficit hídrico sobre o rendimento das culturas (STEDUTO et al., 2012). Muitos processos biológicos, físicos e químicos estão envolvidos nessa constante, sendo que varia em função da espécie e variedade cultivada, do método de irrigação, manejo e da fase de crescimento quando o déficit ocorre, variando assim o valor de K_y (KIRDA, 2002).

Porém, a metodologia apresenta algumas limitações. O coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (K_y) foram validados e utilizados com sucesso por vários pesquisadores para previsão de safras em vários locais nos EUA, Índia, China, Coreia, etc (GHAHRAMAN & SEPASKHAH, 2004). No entanto, alguns sinais de anomalias foram observados na sua utilização. Por exemplo, Igbadun et al. (2007) obtiveram valores de K_y da ordem de 0,21, 0,86 e 0,49, para os estádios inicial, de desenvolvimento e final da cultura do milho, respectivamente, enquanto Doorenbos e Kassam (1979) apresentaram esses valores como 0,4, 1,5 e 0,5, respectivamente

Segundo Kaboosi e Kaveh (2012), o coeficiente (K_y) é dependente de cada localidade, por exemplo, Dehghanisani et al., (2009) apresentaram valores de K_y para o trigo de inverno em Mashhad e Karaj (ambos no Irã) como 1,03 e 1,23, respectivamente, enquanto Doorenbos e Kassam (1979) apresentam este com valor 1,0.

O coeficiente de sensibilidade (K_y) de resposta à produtividade depende do método de irrigação (KIRDA, 2002). Madanoglu (1997) relatou que os valores de K_y sazonal para o trigo irrigado por aspersão e sulco foram de 0,76 e 0,93, respectivamente, enquanto foi relatado como 1,0 e 1,5 para o trigo de inverno e primavera, respectivamente, por Doorenbos e Kassam (1979), independentemente do método de irrigação. Os diferentes valores do coeficiente K_y encontrados para diferentes sistemas de irrigação, ocorrem provavelmente por erros experimentais.

Ao se utilizar valores de K_y obtidos para outras localidades, é necessário prestar atenção ao número, à definição dos estádios de crescimento e aos métodos experimentais. O coeficiente K_y é provavelmente mais dependente dos métodos experimentais usados no cálculo do que de outros fatores. Por exemplo, Igbadun et al. (2007) dividiu o ciclo total do milho em 3 fases, enquanto Doorenbos e Kassam (1979) dividiu em 4 fases. Portanto, a aplicação deste K_y resulta em erro quando ele é utilizado para estimar o rendimento relativo em outros locais com diferentes número e comprimento dos estádios de desenvolvimento (KABOOSI & KAVEH, 2012).

Nesta abordagem, a ET_a é calculada pela equação de balanço de água no solo na zona radicular das plantas. Deve-se notar que o procedimento original para determinar a ET_a , como, apresentado no boletim nº 33 da FAO, não é amplamente seguido. A maioria dos modelos utilizam o método do balanço de água no solo, apresentado por Allen et al. (1998). Os valores de ET_a são obtidos através de simulações do balanço de água no solo, em que os erros nas estimativas de precipitação, perdas por percolação, precipitação efetiva, dependência do tempo de enraizamento, variações de umidade do solo em várias profundidades, contribuições de água no solo de chuvas anteriores, ascensão capilar e captação de água em camadas profundas do solo podem levar à uma sub ou superestimativa da ET_a . Portanto, o cálculo da ET_a sempre apresentam algumas incertezas (KABOOSI & KAVEH, 2012).

O método FAO33, o qual assume que há uma relação linear entre ET_a e Y_a , é ainda comumente aplicado em projetos de irrigação, e relatado na literatura científica (ISTANBULLUOGLU, 2009; PAYERO et al., 2009). Contudo, o boletim FAO33 foi a primeira publicação a fornecer valores de produtividade média da água, definidos como “eficiência de utilização de água” ($Y_a ET_a^{-1}$) para produção obtida, para mais de 25 culturas diferentes.

Nas últimas décadas, a produtividade da água ou eficiência de uso da água (EUA), tem se tornado um conceito mais amplo para desenvolver estratégias para maximizar a produtividade das culturas, como um meio de expressar a eficiência das plantas de usar determinada quantidade de água para produção de alimentos.

A crescente pressão sobre os recursos hídricos deu uma nova direção ao conceito de produtividade da água. Avanços teóricos e experimentais na relação água-planta foram obtidos a partir do boletim FAO33, que, juntamente com a forte demanda por melhoria da produtividade da água, como uma das principais abordagens para lidar com sua escassez, impeliram a FAO a rever o mencionado boletim. Como resposta a essas mudanças de estratégias, criaram o modelo AquaCrop.

2.2.3 Modelo AquaCrop

O AquaCrop é um modelo que considera o efeito da água no rendimento das culturas, ou seja, a água tem função principal no modelo, denominado "*water-driven model*". O modelo utiliza a equação original de Doorenbos e Kassam (1979) como ponto de partida e se desenvolve a partir dela por meio do cálculo da biomassa, com base na quantidade de água transpirada.

Mantendo o conceito original de uma relação direta entre o consumo de água pela planta e a produtividade da cultura, o modelo AquaCrop evoluiu a partir da abordagem de Doorenbos e Kassam (1979). 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. Sendo a evaporação especialmente importante quando a cobertura do solo é incompleta, assim a evaporação se torna o componente principal da evapotranspiração na fase inicial do ciclo da cultura.

A separação destes dois tipos de efeitos, que se diferem fundamentalmente, torna possível a introdução de ligações funcionais com base em processos fisiológicos subjacentes. A produção de biomassa é obtida diretamente a partir da transpiração da cultura real através de um parâmetro de produtividade da água. As equações 2 e 3 são equações principais do modelo de crescimento AquaCrop:

$$B = WP \times \sum Tr \quad (2)$$

e

$$Y = B \times HI \quad (3)$$

em que:

WP - Produtividade da água ($\text{kg m}^{-2} \text{mm}^{-1}$);

Tr – Transpiração da cultura (mm);

B – Biomassa seca da parte aérea (kg);

Y - Produção final (kg); e

HI – Índice de colheita (percentagem).

Passando da equação (1) para a equação (2) o modelo torna-se mais robusto e aplicável a várias condições climáticas, devido ao comportamento conservativo do parâmetro WP, quando normalizado para diferentes condições climáticas (STEDUTO et al., 2007).

A produção final é expressa como função da biomassa (B) e do índice de colheita (HI) para distinguir entre os efeitos do estresse ambiental sobre a biomassa (B) daqueles que ocorrem no índice de colheita (HI). Além disso, a escala de tempo da equação original é sazonal, ou para diferentes estágios de crescimento que podem ter duração de semanas ou meses, enquanto que a escala de tempo utilizada no AquaCrop é diária. Assim, o modelo pode representar melhor a dinâmica da água no solo, da evaporação, da transpiração da cultura e da temperatura do ar.

Outros refinamentos importantes incluem nova maneira de simular o crescimento do dossel, separando os efeitos do estresse hídrico sobre: o crescimento do dossel, condutância estomática, senescência das folhas, polinização e outros aspectos sobre índice de colheita.

Similarmente a outros modelos, 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, além de como estes fatores afetam o balanço

hídrico do solo, desenvolvimento da cultura e do crescimento. As relações funcionais entre os diferentes componentes do modelo são mostradas no fluxograma da Figura. 3.

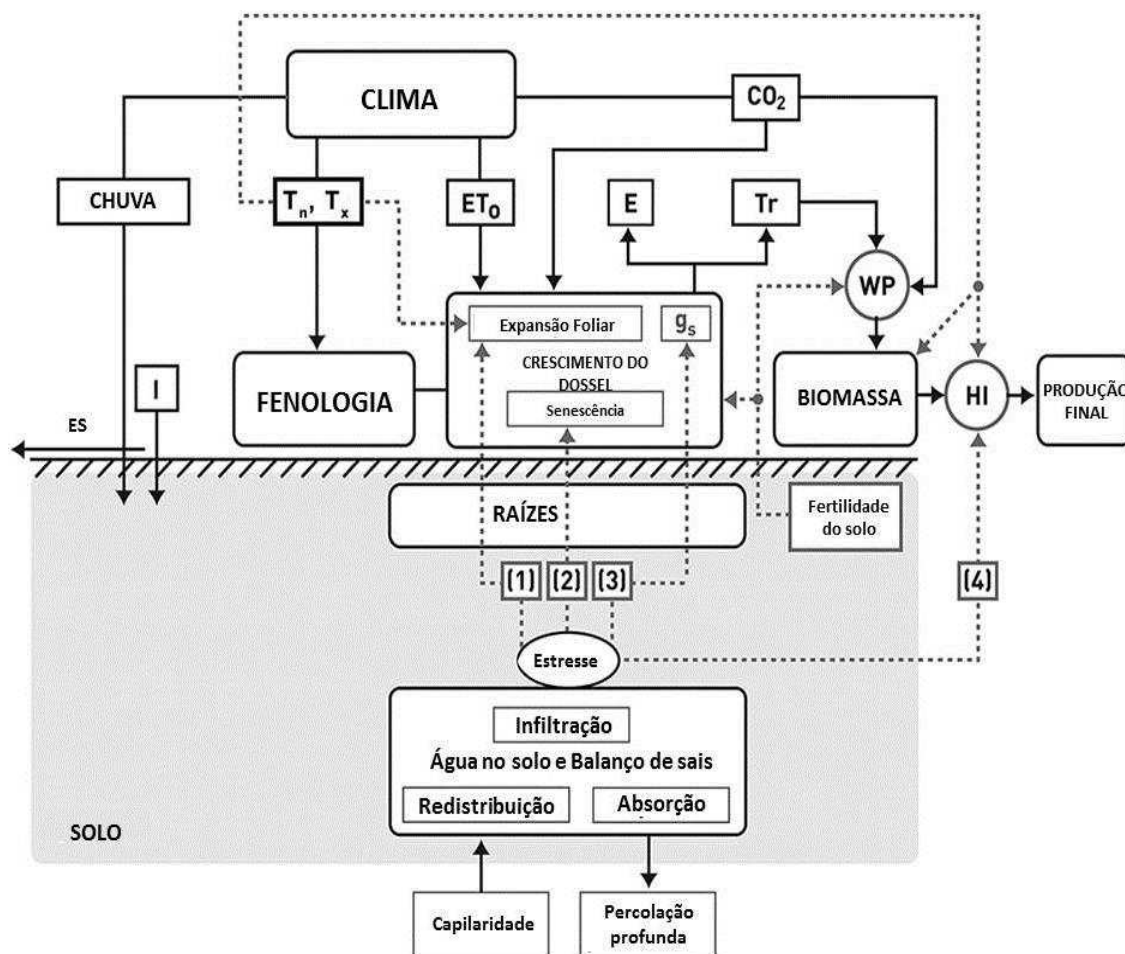


Figura 3 - Fluxograma do modelo AquaCrop, indicando os principais componentes do contínuo solo-planta-atmosfera e os parâmetros da fenologia de transporte, cobertura do solo pelo dossel, transpiração, produção de biomassa e produção final (I - irrigação; T_n - temperatura mín do ar; T_x - temperatura 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)

Segundo Hsiao et al. (2009), o modelo 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.

Os modelos mais utilizados para a simulação da cana-de-açúcar, como o APSIM e o DSSAT/CANEGRO, apresentam como desvantagens o grande

número de parâmetros de entrada, que muitas vezes não apresentam significado físico.

No modelo CANEGRO os parâmetros referentes à cultura são subdivididos em três tipos: ecótipos, com 31 parâmetros, 20 parâmetros de cultivares e 23 de espécie, porém, somente os parâmetros de ecótipo e cultivares devem ser ajustados pelo usuário do modelo (SINGELS et al., 2008). Já 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.

Esses 33 parâmetros estão disponíveis na parametrização do modelo, porém, após feita a validação do modelo, o programa trabalha com um conjunto limitado de dados, uma vez que os mesmos já foram definidos e validados. Assim, o usuário final deverá ajustar apenas os dados referentes ao estande planta, aos dias para emergência, dias para atingir a máxima cobertura do solo, percentagem máxima de cobertura do solo pelo dossel, dia para o início da senescência, a profundidade máxima das raízes entre outros, totalizando assim apenas quatro parâmetros.

Como a FAO é um organismo internacional, procurou-se um modelo que fosse simples após a parametrização, para sua aplicação mundial. Uma visão mais aprofundada dos componentes do modelo e do *software* são encontradas em Steduto et al. (2009) e Raes et al. (2009).

2.2.3.1 Atmosfera

O componente atmosférico que interfere na cultura é descrito no componente clima do modelo AquaCrop (Fig. 3), sendo 5 os componentes meteorológicos necessários: médias diárias de temperaturas máxima e mínima do ar, precipitação pluviométrica diária, demanda diária evaporativa da atmosfera, expressa em ETo 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 observatório de Mauna Loa no Havaí ou para diferentes cenários de mudanças climáticas.

A evapotranspiração de referência (ETo) deve ser calculada a partir dos dados de radiação solar diária, temperatura do ar, umidade relativa e

velocidade do vento seguindo os procedimentos descritos no boletim 56 da FAO (ALLEN et al., 1998).

Quando os dados meteorológicos diários não estão disponíveis, os registros de 10 dias ou mensais são 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 3, 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 CO₂ da atmosfera influencia na taxa de crescimento do dossel da cultura e na produtividade da água (WP).

O AquaCrop usa o tempo térmico (graus-dias) como padrão, e oferece um calendário como alternativa quando os dados não estão disponíveis para derivar os graus-dias necessários pela planta. O número de graus-dias é calculado seguindo o procedimento de McMaster e Wilhelm (1997), com a incorporação adicional de um limite superior de temperatura, acima do qual o desenvolvimento das culturas não aumenta com o aumento da temperatura do ar.

2.2.3.2 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.

2.2.3.3 Estresse Hídrico

O estresse hídrico pode ter grande impacto na produtividade, dependendo do tempo, gravidade 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 , sendo o indicador da intensidade relativa do efeito (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 (Figura. 4).

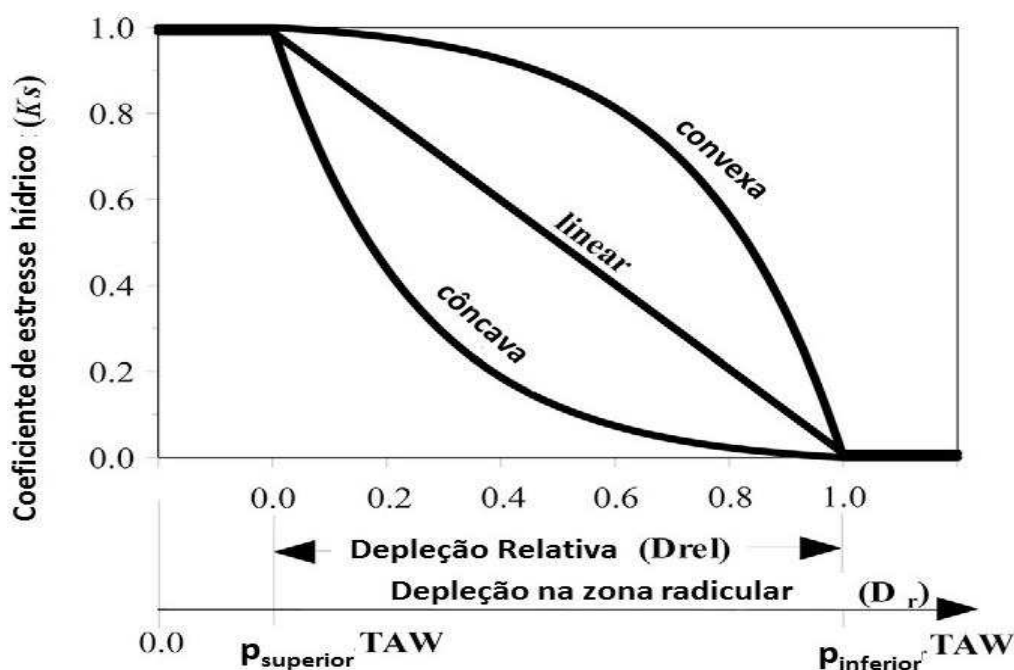


Figura 4 - Exemplos dos coeficientes de estresse (K_s) em função da resposta a redução relativa do conteúdo de água no solo. Fonte: Steduto et al. (2009)

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. A forma e o grau de curvatura das curvas de K_s em relação a depleção da água na zona radicular são descritos pela equação 4.

$$0 \leq K_s = 1 - \frac{e^{D_{rel} \times f_{shape}} - 1}{e^{f_{shape}} - 1} \leq 1 \quad (4)$$

em que:

D_{rel} – é a depleção relativa da água no solo;

f_{shape} - fator forma da curva.

A forma da curva pode ser linear ($f_{shape} = 1$) ou convexa ($f_{shape} > 1$) e, raramente côncava ($f_{shape} < 1$). Estudos mostram que, de maneira razoável, os

limites e as formas destas curvas podem ser considerados conservativos para determinadas culturas (HSIAO et al., 2009; HENG et al., 2009).

2.2.3.4 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)* – termo em inglês) 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 o CC 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, o 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 5).

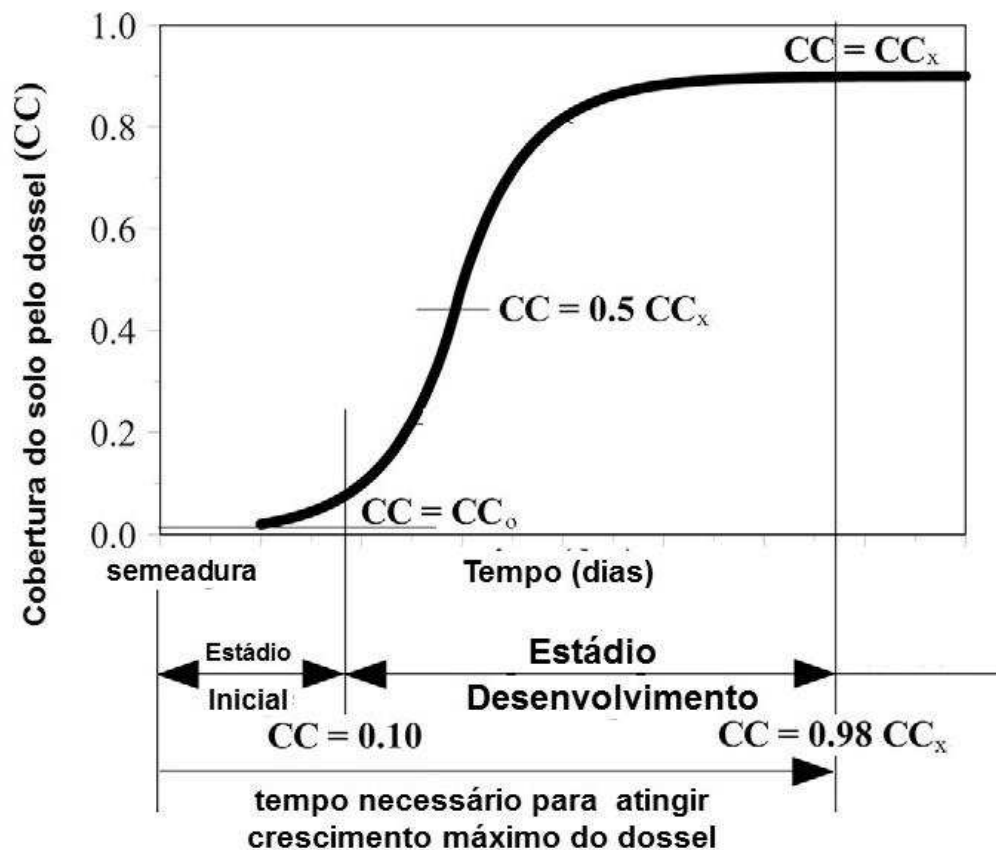


Figura 5 - Representação esquemática do desenvolvimento do dossel durante o crescimento exponencial e as fases de decaimento exponencial. CC_0 e CC_x são a cobertura do dossel inicial e máxima, respectivamente. Fonte: Steduto et al. (2009)

Em princípio, o crescimento exponencial do dossel é esperado depois que as plântulas da cultura se tornam autotróficas e não antes, sendo que a taxa de crescimento do dossel é proporcional ao tamanho do dossel existente. 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 dado pela equação 5.

$$CC = CC_x - (CC_x - CC_0) \times e^{-CGC t} \quad (5)$$

em que:

CC – cobertura do solo pelo dossel no tempo t (fração cobertura do solo);

CC_0 – cobertura inicial do solo no tempo $t = 0$ (fração cobertura do solo);

CGC - coeficiente de crescimento do dossel (aumento da fração da cobertura do solo por dia ou graus-dias);

t - tempo (dias ou graus-dias);

CC_x - cobertura máxima do solo, no tempo $t = \infty$ (fração cobertura do solo).

Matematicamente a cobertura máxima ocorre em $t = \infty$. 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”. Este efeito é calculado pela equação abaixo.

$$CGC_{ajus} = Ks_{exp} \times CGC \quad (6)$$

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.

Steduto et al. (2012) sugerem que a obtenção do valor de CGC deve ser realizada utilizando os dados de cobertura do solo logo após a emergência das plântulas até aproximadamente 60% da cobertura do solo pelo dossel.

Após o seu pleno desenvolvimento, o dossel pode ter uma duração variável antes de entrar na fase de senescência (Figura 6). Uma vez que a senescência começa no final do estágio de maturação, a cobertura do solo pela planta (CC) entra em fase de declínio, dada pela equação 7:

$$CC = CC_x \left[1 - 0,05 \left(e^{\frac{CDC}{CC_x}t} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

em que:

CC - cobertura do solo pelo dossel no tempo t (fração da cobertura do solo);

CC_x- cobertura máxima do solo pelo dossel no início da senescência (t = 0) (fração da cobertura do solo);

CDC - coeficiente de declínio do dossel (% dia⁻¹ ou graus-dias⁻¹); e

t - tempo (dias ou graus-dias).

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 (Ks_{sen}), com a seguinte equação:

$$CDC_{ajus} = (1 - Ks_{sen}^8) \times CDC \quad (8)$$

em que:

CDC_{ajus} - coeficiente de declínio do dossel ajustado em decorrência do estresse hídrico ($\% \cdot \text{dia}^{-1}$ ou graus-dias^{-1}); e

Ks_{sen} - coeficiente de estresse hídrico relacionado a senescência do dossel.

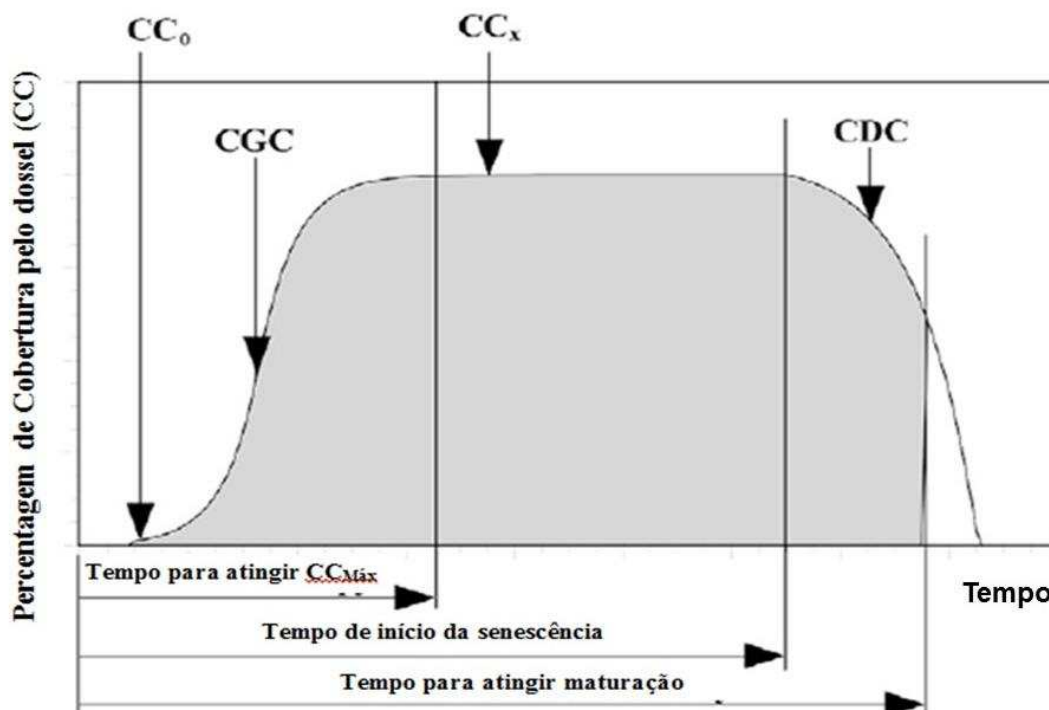


Figura 6 - Exemplo da variação da cobertura do dossel ao longo do ciclo da cultura sob condições sem estresse. CC_0 e CC_x são a cobertura inicial e máxima, respectivamente. Fonte: Steduto et al. (2009)

2.2.3.5 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 2, o rendimento da cultura é, então, obtido por meio da multiplicação da biomassa pelo índice de colheita (HI).

No AquaCrop, a normalização da WP para o clima é baseada na demanda evaporativa da atmosfera definida pela ET_0 e pela concentração de CO_2 da atmosfera. O objetivo é fazer com que o valor da WP no modelo seja específico para cada cultura aplicável à diferentes localidades e épocas do ano, incluindo cenários climáticos futuros. A equação para calcular a produtividade da água normalizada (WP^*) é dada pela equação 9.

$$WP^* = \left[\frac{B}{\sum \frac{Tr}{ET_0}} \right]_{[CO_2]} \quad (9)$$

O somatório assume intervalos de tempo sequenciais abrangendo o período em que a biomassa (B) é produzida. O índice [CO₂] fora do colchete indica que a normalização é para determinado ano, com a sua específica concentração média de CO₂ anual. A equação para ajustar a WP* variando com a concentração de CO₂ 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 permanecem entre os menos entendidos na fisiologia das culturas e são mais difíceis de modelar. 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).

2.2.3.6 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 (Equação 2). 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, conforme a equação 10.

$$CC^* = 1,72 \times CC - CC^2 + 0,3CC^3 \quad (10)$$

Na ausência de estresse hídrico, a transpiração no AquaCrop é proporcional à CC*, dado pela equação 11.

$$Tr = (CC^* \times K_{c_{Trx}}) \times ET_0 \quad (11)$$

em que:

K_{c_{Trx}} - é o coeficiente de transpiração máxima da cultura.

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 (Kc_{Tx}), por uma fração constante (por exemplo, $0,3\% \text{ dia}^{-1}$), resultando, assim uma redução no valor do coeficiente de cultura ajustado (Kc_{Tx}).

2.2.3.7 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 7), é descrita pela seguinte equação empírica.

$$Z = Z_{ini} + (Z_x - Z_{ini}) \times \sqrt[n]{\frac{(t - t_0)}{(t_x - t_0)}} \quad (12)$$

em que:

Z – é a profundidade efetiva das raízes após o plantio no tempo t (em dias);

Z_{ini} – é a profundidade de plantio na semeadura;

Z_x – é a profundidade efetiva máxima das raízes;

t_0 – é o tempo do plantio à emergência efetiva da cultura;

t_x - é o tempo após o plantio, quando Z_x é atingido; e
 n - é um fator de forma da função em graus-dias (ou dia).

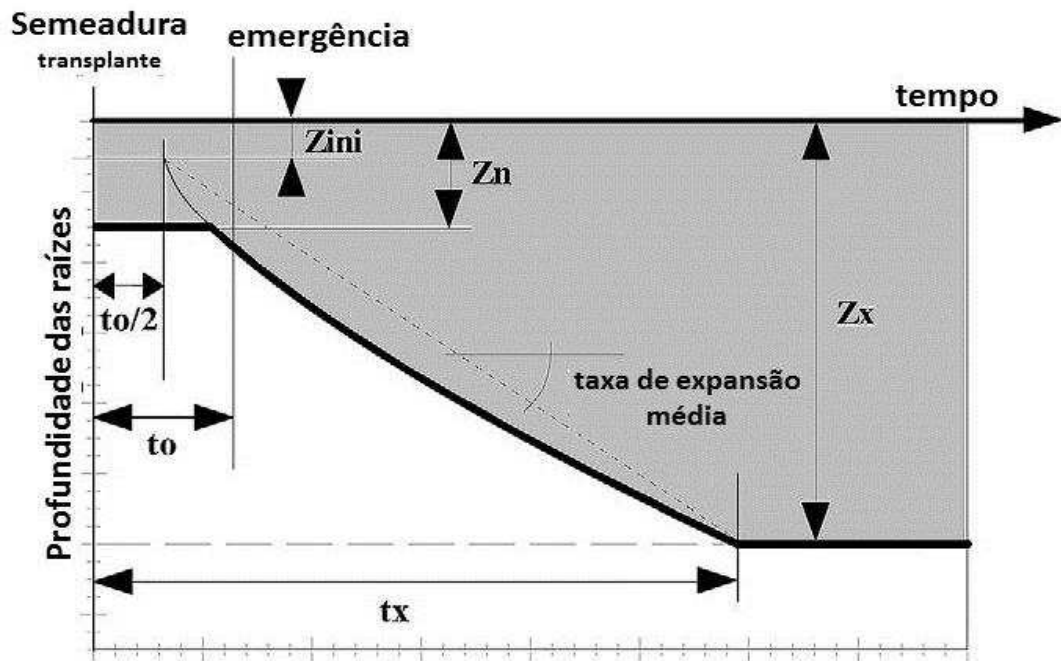


Figura 7 - Representação esquemática do enraizamento profundo ao longo do tempo.
 Fonte: Steduto et al. (2009)

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.

A expansão do sistema radicular é simulada considerando a raiz enésima no tempo, até quando a profundidade máxima de enraizamento é atingida (STEDUTO et al., 2009). A taxa de expansão média das raízes ($dZ dt^{-1}$) é reduzida somente após a depleção da água no solo exceder o limite superior para o fechamento dos estômatos. A redução é determinada pela magnitude do coeficiente de estresse para o fechamento dos estômatos (Ks_{sto}) e do fator de forma ($f_{shape} < 1$):

$$dZ_{ajus} = dZ \frac{e^{Ks_{sto} - f_{shape} - 1}}{e^{f_{shape} - 1}} \quad (13)$$

Em que:

$dZ dt^{-1}$ - taxa de expansão média das raízes;

f_{shape} - fator forma da curva; e

Ks_{sto} - coeficiente de estresse hídrico para o fechamento dos estômatos.

Uma representação esquemática da dinâmica da resposta da cultura ao estresse hídrico, como simulado pelo AquaCrop, é dada na Figura 8.

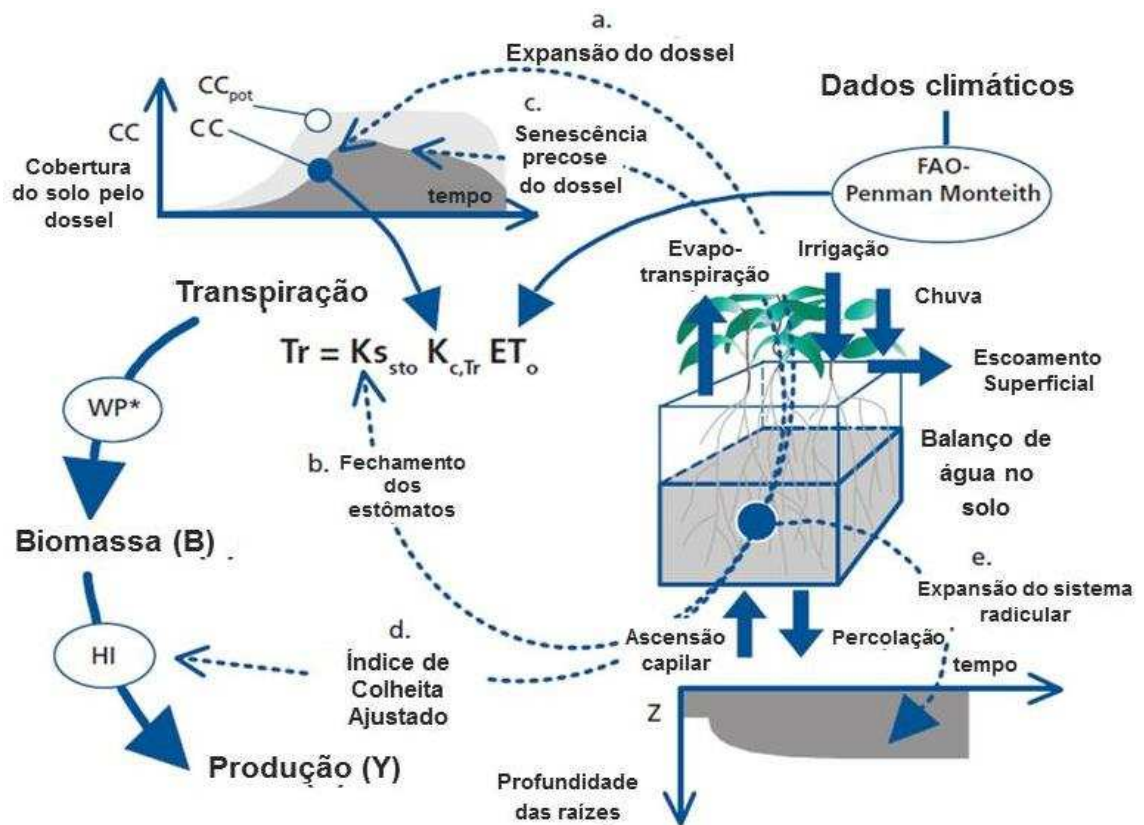


Figura 8 - Representação esquemática da resposta da cultura ao estresse hídrico, com indicação (setas pontilhadas) dos processos (a - e) afetada pelo estresse hídrico. CC é a cobertura do dossel simulado, CC_{pot} cobertura do dossel potencial, K_{S_{sto}} coeficiente de estresse hídrico para o fechamento 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)

2.2.3.8 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.

2.2.4 Parametrização e validação de modelos

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 parametrização, também chamado de problema de ajuste ou identificação de parâmetros é, por sua vez, 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 podem ser fruto do uso de diferentes métodos e equipamentos (sensores), os quais, podem também estar sujeitos a erros (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).

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 rodar o modelo e comparar o dado observado no trabalho de campo, para a área e a condição de interesse, com o dado gerado 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, 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. Devemos 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 ou medidos no sistema real.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Dados utilizados na parametrização e validação do modelo

Para realizar a parametrização e validação do modelo para a cultura da cana-de-açúcar, foram utilizados dados de seis experimentos de campo de diferentes localidades e cultivares.

Os dados utilizados para parametrização e validação do modelo foram:

- ✓ Clima: dados diários de: temperaturas máxima e mínima do ar, precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência (ET_o).
- ✓ Solo: umidade de solo na capacidade de campo, umidade de solo no ponto de murcha permanente, densidade do solo.
- ✓ Data e valor da lâmina de irrigação aplicada.
- ✓ Dados da cultura: espaçamento, data da coleta da biomassa seca e índice de área foliar

A descrição dos seis experimentos cujos dados foram utilizados para parametrização e validação do modelo AquaCrop encontram apresentados na sequência.

3.1.1. Descrição do experimento 1

Silva (2007) analisou o crescimento e acúmulo de nutrientes em diferentes cultivares de cana-de-açúcar em área pertencente à Usina Coruripe, no município de Coruripe/AL (09° 56' 21" S; 36° 05' 37" O e altitude média de 60 metros) na safra 2005/2006. O Município de Coruripe está situado na região do litoral do estado de Alagoas e de acordo com a classificação de Köppen, possui um clima tropical chuvoso com verão seco com temperatura média anual do ar de 24,4°C, sendo classificado pelo tipo As.

O experimento foi implantado em 18 de setembro de 2005 e foi conduzido até 20 de setembro de 2006. O sistema de plantio foi manual (convencional), e os colmos foram distribuídos dentro das linhas de plantio (sulcos), sendo colocados seis toletes com três gemas para cada metro (18 gemas por metro linear), totalizando assim 360 gemas para cada bloco experimental. O experimento foi demarcado em parcelas de seis linhas de cana de 10 m de comprimento, com espaçamento de um metro. Para avaliação das plantas, dentro dessa área, foram demarcados quatro linhas de cana de 5 m de comprimento.

Neste estudo foram avaliadas as cultivares: SP79-1011, RB72454, RB855113, RB867515, RB92579, RB93509 e Co997, e as medições do crescimento da cultura foram coletadas em seis datas diferentes, com intervalos de 60 dias, a partir de 60 dias após o plantio (DAP). O solo da área foi classificado como Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico, textura arenosa/argilosa.

Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos de uma estação meteorológica localizada na usina Coruripe e não houve irrigação na área, sendo a cultura conduzida na forma de sequeiro. Durante o experimento as temperaturas máximas e mínimas do ar apresentaram média de 30,1 e 21,4°C, respectivamente, sendo a precipitação total de 1590 mm. O comportamento das temperaturas máximas e mínimas do ar e da precipitação e a irrigação ocorrida ao longo do ciclo da cultura podem ser observadas na Figura 9.

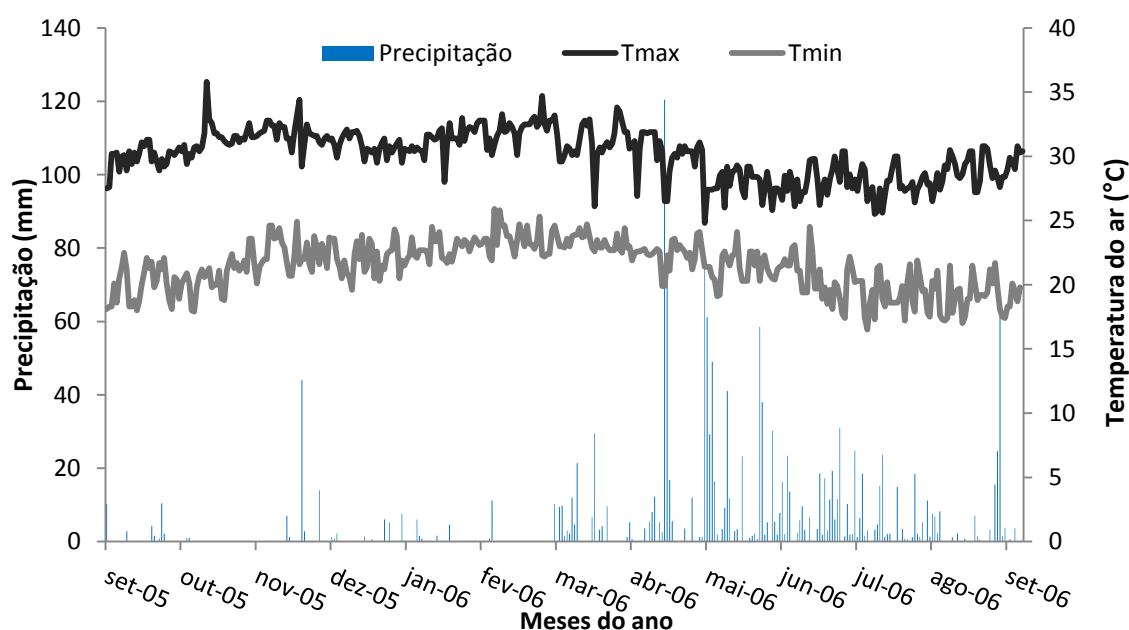


Figura 9 – Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação ocorrida no experimento de Silva (2007) na localidade de Coruripe-AL

Foram obtidos também dados do índice de área foliar, biomassa seca da parte aérea bem como também foram realizadas análises tecnológicas do caldo.

3.1.2. Descrição do experimento 2

O experimento de campo conduzido por Almeida et al. (2008), com objetivo de avaliar diferentes cultivares de cana-de-açúcar, quanto ao desenvolvimento vegetativo e a produção, foi conduzido em dois ciclos de cultivo, no período de outubro de 2003 a outubro de 2004 (cana planta), e fevereiro de 2005 a fevereiro de 2006 (cana soca). O trabalho foi desenvolvido na área experimental e Agrometeorologia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, Campus Delza Gitaí, Rio Largo (09° 28 02" S; 35° 49 43" O e altitude média de 127m), região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. O clima dessa região, segundo a classificação climática de Köppen, é tropical litorâneo úmido tropical chuvoso com verão seco (As).

O solo da área é classificado como Latossolo Amarelo coeso argissólico de textura média/argilosa, topografia amena e declividade inferior a 2%. As cultivares de cana-de-açúcar avaliadas foram a SP79-1011, RB92579, RB93509 e RB931530 plantada no espaçamento de um metro, para o ciclo da cana planta e da cana soca (2° ciclo).

O experimento foi conduzido numa área de 500 m², subdividida em parcelas de cinco linhas de cultivo com 4 metros lineares. A área recebeu uma calagem na base de duas toneladas de calcário dolomítico por hectare (PRNT= 85%). O preparo do solo constou de uma gradagem pesada mais duas gradagens niveladoras e sulcamento. O plantio foi realizado em outubro de 2003, com uma adubação de fundação de 70 kg de N ha⁻¹, 60 kg de P₂O₅ ha⁻¹ e 120 kg de K₂O ha⁻¹, sendo que a adubação da cana soca foi a mesma da cana planta.

Os dados meteorológicos foram coletados em uma estação automática de aquisição de dados. Por meio dos dados meteorológicos foi calculada a evapotranspiração de referência (ET_o) diária pelo método de Penman-Monteith-FAO. As irrigações realizadas nos dois ciclos foram baseadas na evapotranspiração da cultura (ET_c). Na cana planta a irrigação foi realizada utilizando a irrigação por aspersão e na cana soca o sistema utilizado foi sistema de gotejamento.

Durante o experimento, as temperaturas máximas e mínimas do ar apresentaram média de 29,4 e 19,6°C, respectivamente, sendo a precipitação total de 2120 mm sendo aplicada uma lâmina total 585 mm, para o ciclo da cana planta. No ciclo da cana soca, as temperaturas máximas e mínimas do ar apresentaram média de 29,7 e 20,9°C, respectivamente, sendo a precipitação total de 1443 mm sendo aplicada uma lâmina total 540 mm. O comportamento das temperaturas máximas e mínimas do ar, assim como, a precipitação ocorrida ao longo do ciclo da cana planta e da cana soca podem ser observadas na Figura 10 (A) e (B) respectivamente.

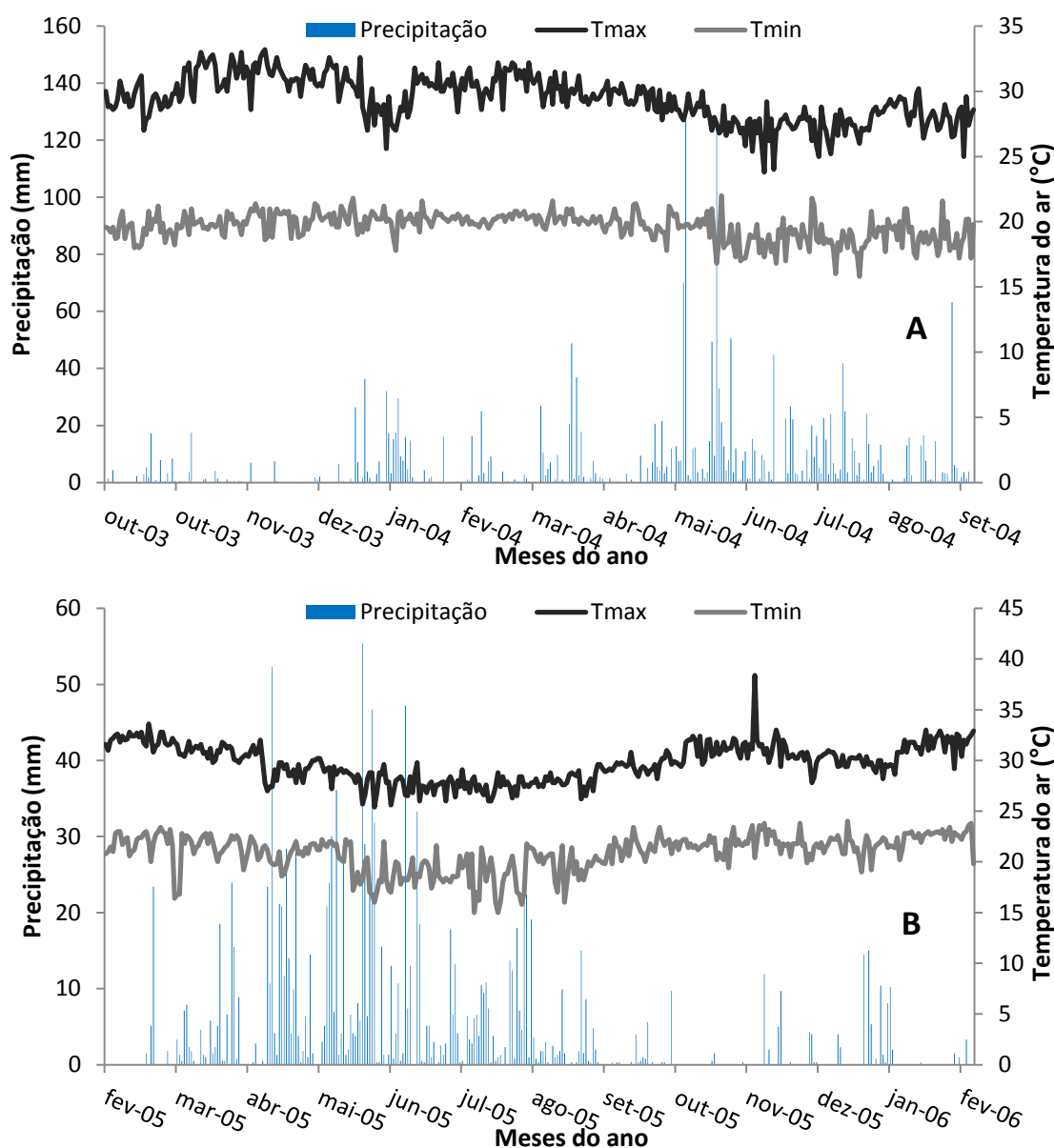


Figura 10 – Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação ocorrida durante os experimentos de Almeida (2008), na localidade de Rio Largo-AL, durante o ciclo da cana planta (A) e cana soca (B)

O IAF foi determinado ao longo do ciclo da cultura, utilizando a metodologia de Hermann e Câmara (1999). Para determinação da biomassa da cultura foi feita uma amostragem a partir da coleta de 1,5 metros lineares da cultura, com três repetições. Com esses resultados foi estimada a produção média de matéria seca ao final do ciclo.

3.1.3. Descrição do experimento 3

O experimento foi conduzido por Oliveira (2008), com objetivo de estudar diferentes cultivares de cana-de-açúcar, quanto ao crescimento em função do tempo de cultivo, no período de outubro de 2006 a outubro de 2007 (cultivo de verão). O experimento foi realizado em área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC), localizada no município de Carpina, na Zona da Mata Norte do Estado ($7^{\circ} 50' 45''$ S, $35^{\circ} 15' 18''$ O e altitude de média de 192 m). O clima da região, segundo a classificação climática de Köppen, é tropical litorâneo úmido com verão seco (As).

Durante o ciclo da cultura, as temperaturas máximas e mínimas do ar apresentaram média de $30,2$ e $21,9^{\circ}\text{C}$, respectivamente, sendo a precipitação total de 1176 mm e irrigação total de 830 mm. O comportamento das temperaturas máximas e mínimas do ar, assim como a precipitação ocorrida ao longo do ciclo da cultura, podem ser observadas na Figura 11.

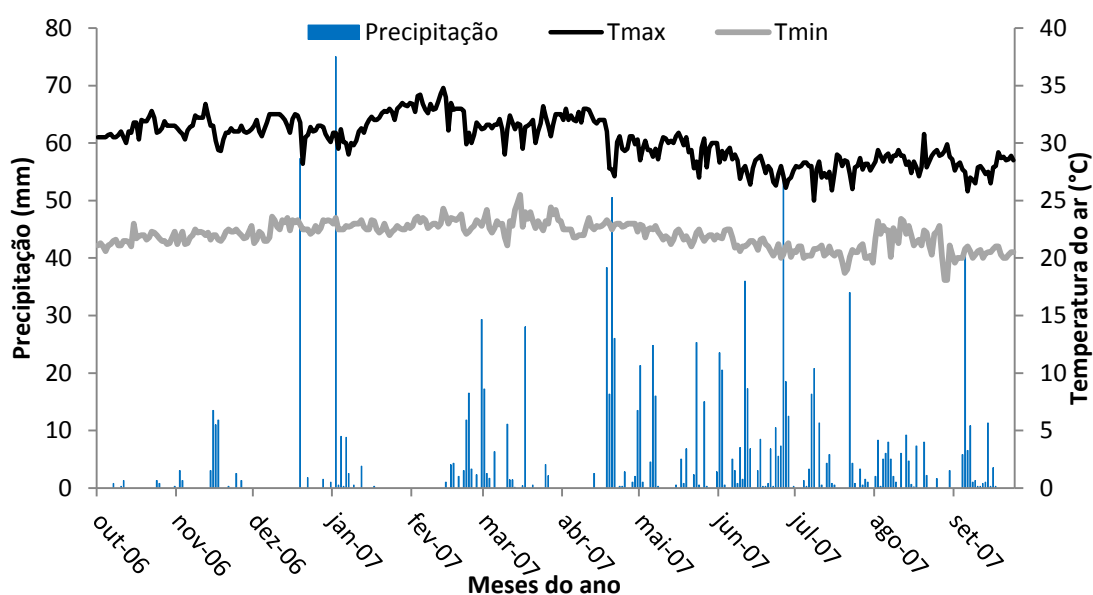


Figura 11 – Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação para o experimento de Oliveira (2008) na localidade de Carpina-PE

O solo, em que o experimento foi conduzido, foi classificado como Argissolo Amarelo Distrófico de textura franco-arenosa. Os tratamentos

consistiram de onze cultivares de cana-de-açúcar, identificadas quanto ao estágio de maturação (RODRIGUES, 1995).

O plantio foi realizado manualmente, objetivando a população de 18 gemas por metro O estudo foi implantado sob condições de irrigação plena aplicando-se a lâmina necessária para suprir a evapotranspiração da cultura, até os 300 DAP, utilizando um sistema de irrigação por aspersão via canhão. A ETo foi calculada utilizando o método do tanque classe A.

Foram utilizadas cinco variedades de maturação precoce (SP79-1011, SP81-3250, RB863129, RB872552, RB943365) e, seis variedades de maturação média a tardia (RB72454, RB763710, SP78-4764, RB813804, RB867515, RB92579). Essas variedades foram avaliadas em cinco períodos de cultivo: 120, 180, 240, 300 e 360 DAP, em amostragens destrutivas. Cada tratamento foi composto por quatro repetições, perfazendo um total de 44 parcelas experimentais, distribuídas em delineamento experimental de blocos ao acaso.

Cada parcela foi constituída de cinco linhas, espaçadas de 1,10 m entre si, com 10 m de comprimento, perfazendo a área total de 44 m². Na avaliação do material vegetal destrutivo, foi tomada uma sub-parcela para amostragem no tempo, composta pela primeira e quinta linha de cana-de-açúcar, com oito metros de comprimento.

Foi realizada a adubação aplicando no fundo do sulco de plantio: 30 kg.ha⁻¹ de N; 120 kg.ha⁻¹ de P₂O₅; e 70 kg.ha⁻¹ de K₂O. Aos 90 DAP realizou-se adubação de cobertura aplicando-se 50 kg.ha⁻¹ de N e 50 kg.ha⁻¹ de K₂O nas linhas de cana-de-açúcar, seguida de incorporação manual. Desta forma, o total de nutrientes aplicados foram 80 kg.ha⁻¹ de N; 120 kg.ha⁻¹ de P₂O₅; e 120 kg.ha⁻¹ de K₂O.

3.1.4. Descrição do experimento 4

O experimento de campo foi conduzido por Silva (2009), com objetivo de avaliar a eficiência de uso da água e o crescimento, utilizando a cultivar de cana-de-açúcar RB-92579, no ciclo de cana soca (segundo ciclo da cultura), na safra de 2007/2008. O experimento foi conduzido de 28 de maio até 20 de junho, totalizando 385 dias, sendo realizado em uma área de 12 ha de cana-de-açúcar, pertencente à Empresa Agrovale (Agroindústria do Vale do São

Francisco) localizada no município de Juazeiro, Bahia, no Submédio do Vale do São Francisco, na região Semi-árida do Nordeste (9° 28' 07" S; 40° 22' 43" O e altitude média de 386,5 m). O clima da região que compreende o pólo Petrolina-PE/Juazeiro-BA, segundo a classificação de Köppen, é do tipo BSw^h'. Este clima é caracterizado pela escassez e irregularidade de chuvas, assim como a alta evapotranspiração por conta das altas temperaturas

Durante a condução do experimento, a média das temperaturas máximas e mínimas do ar foram de 31,8 e 20,6°C, sendo a precipitação total de 571 mm e a irrigação total de 2500 mm. A variação das temperaturas máximas e mínimas do ar e da precipitação pluviométrica ao longo do experimento encontra-se na Figura 12.

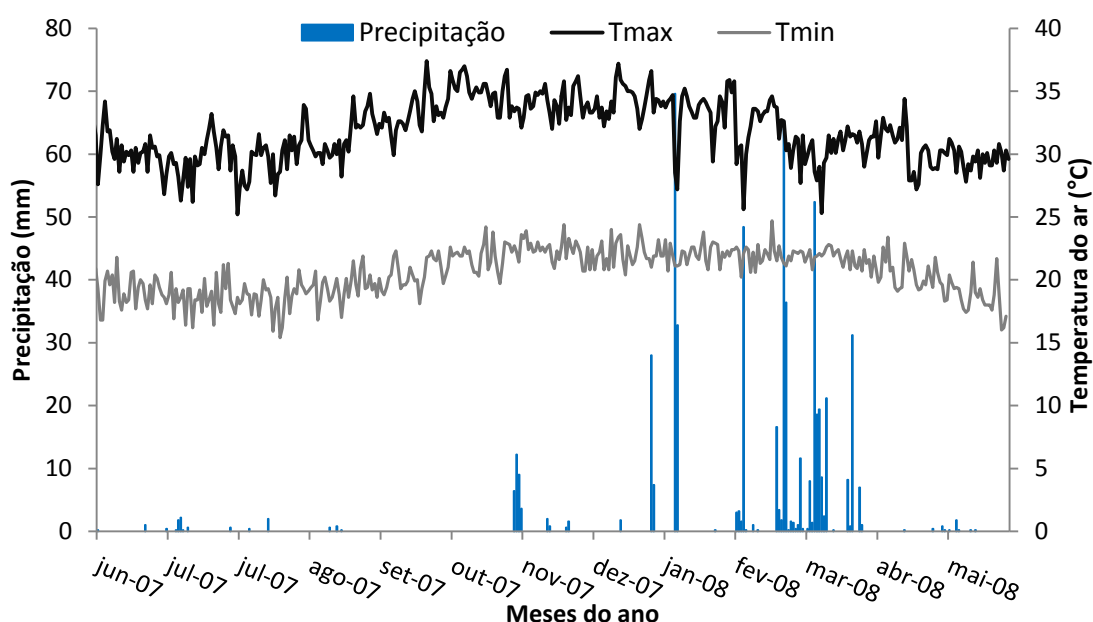


Figura 12 – Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação para o experimento de Silva (2009) para a localidade de Juazeiro-BA

O espaçamento entre as linhas de plantio da cultura foi de 1,5 m, e a irrigação foi do tipo superficial por sulcos, por meio de um sistema de condução em tubos janelados, tendo os eventos sido realizados com base no conteúdo de água no solo obtido por meio de uma sonda FDR (Frequency Domain Reflectometer), resultando numa frequência média de irrigação de 14 dias durante o período de maior demanda hídrica.

Os eventos de irrigação foram realizados sempre que o conteúdo de água no solo atingisse 50% da água disponível. As medidas agrometeorológicas, foram obtidas em uma estação meteorológica automática, instalada à 3 km de distância em relação à área experimental. Foram

realizadas, também, medições biométricas e de biomassa no intervalo de duas a seis semanas e de rendimento ao final do ciclo.

No experimento, foi obtida a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (f_{RFA}). Para sua estimativa foram utilizadas medições de radiação fotossinteticamente ativa realizadas abaixo e acima do dossel da cultura, sendo utilizado para a obtenção da percentagem de cobertura do solo pela cultura.

3.1.5. Descrição do experimento 5

O experimento de campo foi conduzido por Esteves (2011), com objetivo de o desenvolvimento e o balanço de energia para a cana-de-açúcar, foi conduzido de setembro de 2009 até junho de 2010, totalizando 287 dias, em uma área de 13 ha, em cultivo comercial de cana-de-açúcar na Fazenda Partido, da empresa Feliz Terra Agrícola, em Campos dos Goytacazes, RJ (21° 48' 17" S e 41° 16' 28" O e altitude média de 9m). Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é classificado como Aw, isto é, clima tropical úmido, com verão chuvoso, inverno seco e temperatura do mês mais frio superior a 18°C.

Na área do experimento foi instalada uma estação micrometeorológica, sendo que os dados meteorológicos foram coletados a cada minuto e armazenados em valores médios a cada 15 minutos por uma plataforma de armazenamento de dados (datalogger).

Durante o ciclo da cultura, a média das temperaturas máximas e mínimas foram de 31,3 e 22°C respectivamente, sendo a precipitação total de 745 mm. A variação das temperaturas máximas e mínimas do ar e da precipitação ao longo do ciclo da cultura encontram-se na Figura 13.

Depois do corte da cana, foram aplicadas três lâminas de 30 mm de vinhaça, diluído para concentração final de 2% de potássio, a cada 10 dias após o corte. Após o período inicial não houve outros eventos de irrigação, sendo o cultivo na forma de sequeiro.

A cultivar da cana-de-açúcar utilizada foi a SP81-3250, plantada com espaçamento de 1,5 m, estando no quarto ciclo de cultivo (3° corte). A área foliar foi determinada por meio de um integrador de área foliar LICOR 3100. Os dados de área foliar foram utilizados para o cálculo do índice de área foliar (IAF). Além da massa fresca, a massa seca foi determinada através de secagem em estufa de ventilação forçada, com temperatura de 70°C.

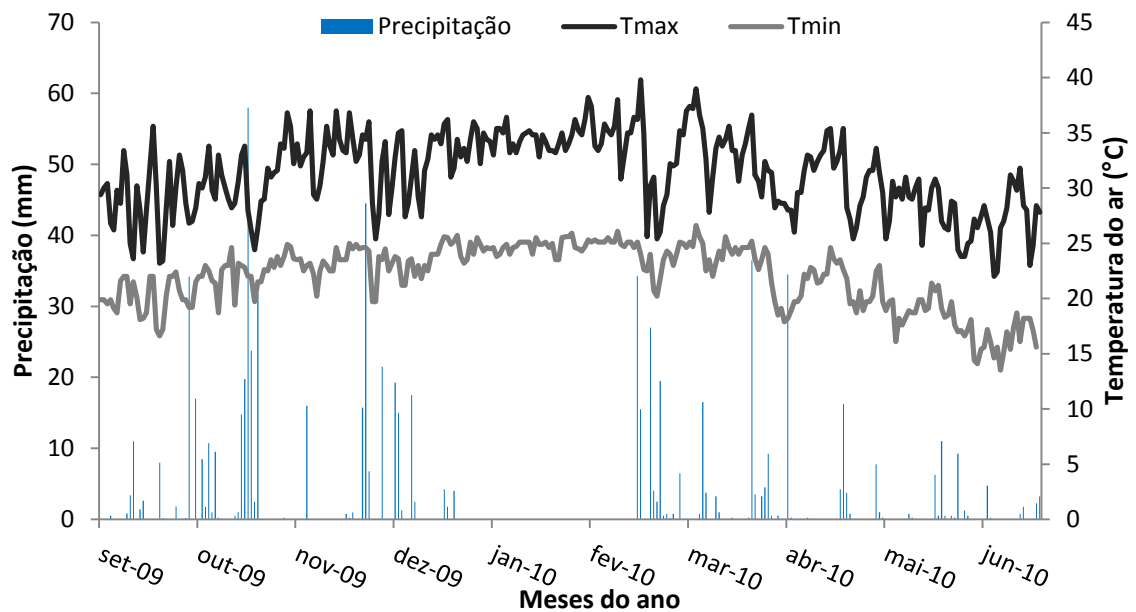


Figura 13 – Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação para o experimento de Esteves (2011) para a localidade de Campos dos Goytacazes-RJ

Para acompanhamento do cultivo foram feitas coletas de campo periódicas aos 85, 102, 128, 149, 174, 194, 215, 235, 255 e 280 dias após o corte (DAC). Em cada coleta foram obtidas amostras em 40 m² do cultivo, tomados de forma aleatória, sendo determinadas a cada metro as massas frescas totais de colmos e das folhas, para posterior estimativa por hectare.

3.1.6. Descrição do experimento 6

O trabalho foi desenvolvido na localidade de Goianésia-GO, na área pertencente à usina Jales Machado (15° 12' 52" S; 48° 59' 10" O e altitude média de 640m) foi conduzido no período de maio de 2012 a maio de 2013, com objetivo de avaliar a resposta da cultura da cana-de-açúcar para diferentes lâminas de irrigação. De acordo com a classificação de Köppen, a região de Goianésia possui clima Aw com chuvas de verão e inverno relativamente seco. A média de temperatura do ar fica entre 22 e 25 °C, sendo que nos meses mais frios do ano as mínimas ficam entorno de 18 °C

O experimento em parcelas subdivididas, delineados em blocos completos, foram estabelecidos, sendo a regime de irrigação o bloco principal, para as cultivar CTC9. As parcelas divididas individuais mediam 15 por 15m e eram compostas por 8 linhas de 15 metros de comprimento espaçadas em 1,5 metro.

O solo da área é um Latossolo Vermelho-Amarelo Álico, e a adubação foi realizada conforme análise do solo, sendo a mesma com 267 kg.ha⁻¹ de N, 527 kg.ha⁻¹ de P₂O₅, 444 kg.ha⁻¹ de K₂O, 4,9 kg.ha⁻¹ de Cu, 4,9 kg.ha⁻¹ de Mn, 8,2 kg.ha⁻¹ de Zn e 10 kg.ha⁻¹ de B. Também foi realizado a correção do solo, realizada em duas aplicações de 1420+3700 kg.ha⁻¹ para o gesso e 3000+1000kg.ha⁻¹ de calcário dolomítico.

Os tratamentos foram compostos de diferentes regimes de irrigação que foram: sequeiro com irrigação de salvação de 100 mm, 50 e 100% da irrigação total necessária (ITN), com quatro repetições.

Os elementos meteorológicos foram coletados em uma estação meteorológica. Por meio dos dados foi obtida a evapotranspiração de referência (ET_o) calculada pelo método de Penman-Monteith-FAO. Durante o experimento, a média das temperaturas máximas e mínimas foram de 31,1 e 19,4°C respectivamente, sendo a precipitação total de 1104 mm e a irrigação total de 100, 357 e 667 mm, para os tratamentos de sequeiro, 50% e 100 da ITN, respectivamente. As variações das temperaturas máximas e mínimas do ar e da precipitação pluviométrica ao longo do ciclo da cultura encontra-se na Figura 14.

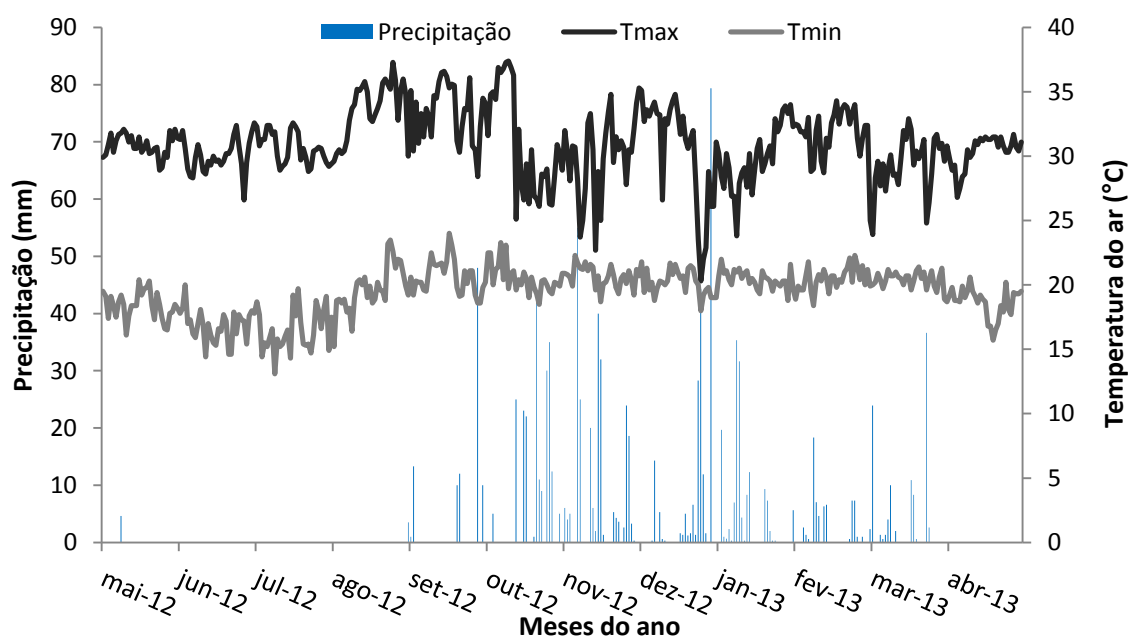


Figura 14 – Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação para o experimento de Bufon (2012) para a localidade de Goianésia-GO

O número de folhas verdes e secas, bem como massa fresca e seca de folhas verdes, folhas secas, perfilhos e colmo também foram medidos a cada dois meses, durante o período de crescimento da cultura.

3.2 Parametrização e validação do modelo AquaCrop

A parametrização de qualquer modelo envolve a operação de ajuste de alguns parâmetros para obter os melhores índices estatísticos entre os dados reais e dados simulados pelo modelo. Alguns parâmetros do modelo AquaCrop são conservativos, ou seja, assume-se que esses valores são considerados aplicáveis para a grande maioria das cultivares. Outros parâmetros são específicos de cada cultivar e do manejo da cultura. Na Tabela 1 encontram-se os parâmetros da cultura utilizados no modelo AquaCrop.

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 (Tabela 1).

A prática mais comum para parametrização é a de executar simulações com o modelo, começando com valores estimados provenientes da literatura ou de culturas com padrão de similaridade. Posteriormente, compara-se os resultados simulados pelo modelo com os dados obtidos experimentalmente, em seguida, ajusta-se os parâmetros e executa-se a simulação e compara-se, e assim sucessivamente, até que os índices estatísticos apresentem os melhores resultados.

O processo de parametrização do modelo foi desenvolvido por meio do método de tentativa e erro, sendo realizada para as cultivares SP79-1011, SP81-3250 RB93509, RB867515, RB92579. Para isto, foram utilizados os conjuntos de dados das localidades de Juazeiro (SILVA, 2009), Coruripe (SILVA, 2007) e Carpina (OLIVEIRA, 2008). Para a variedade CTC9, parametrizou o modelo utilizando os dados do tratamento com aplicação de 50% da ITN.

Utilizou-se os dados da localidade de Juazeiro na parametrização, porque apenas este experimento possuía os dados referentes a percentagem de cobertura do solo pelo dossel (CC). Estes dados foram obtidos diariamente, permitindo um melhor ajuste dos parâmetros referentes à velocidade de expansão do dossel (CGC).

Tabela 1 – Parâmetros da cultura utilizado pelo AquaCrop

Símbolo	Parâmetro	Tipo
Limites de temperatura do ar		
T_{base}	Temperatura basal (°C)	Conservativo ⁽¹⁾
T_{upper}	Temperatura máxima limite (°C)	Conservativo ⁽¹⁾
Desenvolvimento do dossel		
	Superfície do solo coberta por um indivíduo na emergência de 90% das plântulas (cm ² /planta)	Manejo ⁽³⁾ Conservativo ⁽²⁾
	Números de plantas por hectare	Manejo ⁽³⁾
	Tempo do plantio até a emergência (dias ou graus-dias)	Manejo ⁽³⁾
CGC	Coefficiente de crescimento do dossel (fração da cobertura do solo por dia ou graus-dias)	Conservativo ⁽¹⁾
CCx	Cobertura máxima do solo pela cultura (%)	Manejo ⁽³⁾
	Tempo do plantio até o início da senescência (dias ou graus-dias)	Cultivar ⁽⁴⁾
CDC	coeficiente de declínio do dossel (fração da cobertura do solo por dia ou graus-dias)	Conservativo ⁽¹⁾
	Tempo da sementeira até maturação, ex ciclo da cultura (dias ou graus-dias)	Cultivar ⁽⁴⁾
Desenvolvimento da zona radicular		
Z_n	Profundidade efetiva mínima das raízes (m)	Manejo ⁽³⁾
Z_x	Profundidade efetiva máxima das raízes (m)	Manejo ⁽³⁾
-	Fator forma da curva de crescimento das raízes	Conservativo ⁽¹⁾
-	Tempo da sementeira até a atingir a profundidade máxima das raízes (dias ou graus-dias)	Ambiente ⁽³⁾ Cultivar ⁽⁴⁾
Transpiração da cultura		
K_{cb_x}	Coefficiente de cultura quando o dossel está completo, mas antes de senescência	Conservativo ⁽¹⁾
f_{age}	Declínio do coeficiente de cultura (% dia ⁻¹) como resultado do envelhecimento, a deficiência de nitrogênio, etc	Conservativo ⁽¹⁾
	Efeito da cobertura do dossel na redução da evaporação do solo no final do ciclo	Conservativo ⁽¹⁾
Produção da biomassa e do produto final		
WP*	Produtividade de água da cultura normalizada para a ETo e CO ₂ (gramas/m ²)	Conservativo ⁽¹⁾
Índice de colheita		
HI ₀	Índice de colheita de referência	Cultivar ⁽⁴⁾
Estresse hídrico		
$P_{exp, upper}$	Limites da depleção da água no solo para a expansão do dossel - Limite superior	Conservativo ⁽¹⁾
$P_{exp, lower}$	Limites da depleção da água no solo para a expansão do dossel - Limite inferior	Conservativo ⁽¹⁾
-	Fator forma para o coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel	Conservativo ⁽¹⁾
P_{sto}	Limites da depleção da água no solo para controle estomático- Limite superior	Conservativo ⁽¹⁾
-	Fator de forma para o coeficiente de estresse hídrico para controle estomático	Conservativo ⁽¹⁾
P_{sen}	Limites da depleção da água no solo para a senescência do dossel - Limite superior	Conservativo ⁽¹⁾
-	Fator de forma para o coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel	Conservativo ⁽¹⁾
Estresse devido a fertilidade do solo		
Calibração		
Estresse devido a temperatura do ar		
	Mínimo de graus-dias necessários para a produção de biomassa total (C - dia)	Conservativo ⁽¹⁾

(1) Conservativo de aplicação geral, (2) Conservativo para uma espécie dada, mas pode ser um cultivar específico (3) dependente do meio ambiente e/ou manejo (4) Cultivar específico

O AquaCrop permite a visualização gráfica da progressão do dossel (CC) ao longo do ciclo da cultura, desta maneira definiu-se o tempo necessário para a cultura cobrir o solo e posteriormente comparou-se com os dados medidos em campo com os simulados. Definiu-se o valor do coeficiente de expansão do dossel (CGC), quando foram obtidos os melhores índices estatísticos.

Para obtenção dos parâmetros referentes ao estresse hídrico, fez-se necessário utilizar os dados de Coruripe (SILVA, 2007), uma vez que o mesmo foi conduzido na forma de sequeiro. Para calibrar as funções de resposta ao estresse hídrico por tentativa e erro, as opções foram tanto os limites superior e inferior ou a forma da curva, ou ambos. Assim, procurou-se observar o início do estresse na planta para se estabelecer os limites e a forma da curva, comparando a CC e a biomassa seca simulada e observada. O parâmetro Ks referente a expansão foliar e a senescência das folhas foram determinados a partir da observação da progressão do dossel e redução do dossel, respectivamente. Para determinação do parâmetro Ks referente ao fechamento dos estômatos, a observação foi realizada na produção biomassa seca, procurando aproximar os valores de biomassa observados e simulados desde o início até o final do ciclo.

Para obtenção do valor de temperatura basal considerou-se inicialmente os valores comumente encontrados na literatura. Este parâmetro tem influência direta na produção de biomassa. Assim, por tentativa e erro comparou-se a produção de biomassa seca simulada com aquela observada ao longo do ciclo da cultura. O modelo AquaCrop trabalha com uma temperatura basal constante ao longo do ciclo da cultura.

A validação do modelo para as cultivares SP79-1011, SP81-3250 RB93509, RB867515, RB92579, foi realizada utilizando os dados dos experimentos realizados em Campos dos Goytacazes (ESTEVES, 2011), Rio Largo (ALMEIDA et al., 2008) e Goianésia. Para a validação do modelo para cultivar CTC9 foram utilizados os dados referentes aos tratamentos de sequeiro e 100% da ITN.

Na Tabela 2 encontra-se o resumo dos dados utilizados no presente estudo, mostrando as variáveis coletadas, as cultivares a localidade em que foram realizados e a utilização dos mesmos no presente trabalho.

Tabela 2 – Informações sobre os experimentos e sua utilização no presente estudo

Experimento	Autor	Cultivares	Utilização	Local
1	Silva (2007)	RB92579, SP79-1011, RB867515, RB93510	Parametrização	Coruripe AL
2	Almeida et al., (2008)	RB92579, SP79-1011, RB867515, RB93509	Validação	Rio Largo AL
3	Oliveira (2008)	RB92579, SP79-1011, RB867515, RB93509, SP81-3250	Parametrização	Carpina PE
4	Silva (2009)	RB92579	Parametrização	Juazeiro BA
5	Esteves (2011)	SP81-3250	Validação	Campos RJ
6	Bufon (2012)	CTC9	Parametrização e Validação	Goianésia GO

Para cada simulação na parametrização e na validação do modelo foram utilizados os dados meteorológicos, características físico hídrica, do solo, lâminas de irrigação, a progressão do dossel, data de plantio, espaçamento, profundidade de enraizamento máximo estimado e o tempo de desenvolvimento da cultura. Como a profundidade do sistema radicular não foi obtida em nenhum dos experimentos, buscou-se dados na literatura para suprir a falta dessa informação.

Em alguns experimentos não foram observados dados de cobertura do solo pelo dossel, assim, o índice de área foliar foi convertido para a obtenção desse, utilizando a equação 14.

$$CC = 100(1 - e^{(-k IAF)}) \quad (14)$$

em que:

CC - Percentagem de cobertura do solo pelo dossel (%);

k - coeficiente de extinção da cana-de-açúcar; e

IAF - índice de área foliar.

O coeficiente de extinção (k , adimensional) é um indicador da interceptação de radiação fotossinteticamente ativa (f_{RFA}) pelas plantas, influenciado por uma série de fatores morfológicos e estruturais das plantas, tais como crescimento, estrutura, ângulo foliar e disposição das folhas no dossel (KINIRY et al., 2005). O valor do coeficiente de extinção foi calculado com base nos dados de f_{RFA} e do IAF, conforme a seguinte expressão, resultante da Lei de Beer.

$$k = \frac{\ln(1-f_{RFA})}{IAF} \quad (15)$$

Dada a grande variação dos valores de biomassa observados pelas diferentes cultivares, para uma mesma localidade com mesma condição de clima, solo, adubação, irrigação entre outras, procurou-se identificar um parâmetro que representasse as diferenças entre variedades, que no caso foi a produtividade da água (WP).

3.3 Análise estatística do modelo

A análise de desempenho do modelo na parametrização e na validação foi realizada comparando-se os valores observados de biomassa seca e de percentagem de cobertura do solo no campo, com aqueles simulados pelo modelo. Os índices estatísticos usados foram a raiz do erro quadrático médio (REQM), o coeficiente de determinação (r^2), o índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT, 1982) e o índice de eficiência (E) (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

$$r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right)} \quad (16)$$

$$REQM = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_i| - |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (18)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (19)$$

em que:

P_i – valores simulados pelo AquaCrop;

O_i - valores observados;

n - número de observações;

\bar{O} - é a média dos valores observados; e

\bar{P} - é a média dos valores simulados.

O coeficiente de determinação (r^2) descreve a proporção da variância total dos dados observados que pode ser explicada pelo modelo. Os valores de r^2 variam de zero a um, sendo que quanto mais próximo de um melhor o ajuste. Porém, essa estatística não é muito adequada para medir desempenho de modelos, pois ela é altamente sensível a valores espúrios (outliers). Entretanto, o r^2 foi incluído nas análises realizadas no presente estudo para permitir comparações com resultados encontrados na literatura que utilizam esse coeficiente. O índice de concordância (d) tem um intervalo variando entre 0 e 1 sendo que, valores próximos a 1, mostram uma concordância perfeita. O índice de eficiência expressa o quanto do desvio global entre os valores observados e simulados afasta do desvio global entre os valores observados do seu valor médio. A REQM é uma medida de erros usados para representar as diferenças médias entre os valores preditos pelo modelo (P) e os valores observados (O).

Um dos grandes problemas na utilização de modelos é a subjetividade na realização da classificação dos mesmos. Não encontra-se na literatura um valor de referência, mostrando os erros aceitáveis para uma determinada aplicação do modelo, sendo que esta situação aplica-se ao presente trabalho.

O departamento de agricultura americano (United States Department of Agriculture-USDA) para ajudar os usuários a avaliar a confiabilidade de suas previsões, utilizam a raiz do erro quadrático médio (REQM), baseado no desempenho dos últimos 20 anos. No relatório de safra do USDA do ano de 2013, observou-se um REQM de 1,4% para o milho e 3,3% para algodão. Considerando o nível de confiança de 95%, o levantamento considera que a produção será mais ou menos 2,8% do valor observado para o milho e mais ou menos 6,6% do valor observado para o algodão (USDA, 2014).

Na ausência dos dados referentes aos erros de previsão de safra realizadas pelo IBGE e pela CONAB, procurou-se dados junto a ÚNICA. Analisando os dados da união da indústria de cana de açúcar (UNICA), observa-se que na comparação do primeiro levantamento da safra 2010/2011 a produção estimada era de 595,9 milhões de toneladas, mas foi moído apenas 556,9 milhões, gerando o erro de estimativa de 7%. Na safra 2011/2012 a produção estimada foi de 568,5 milhões de toneladas e o observado foi 493,1 milhões, gerando o erro de estimativa de 15,3%. Para o primeiro levantamento

das safras 2012/2013 e 2013/2014 o erro de estimativa foi de 4,3% e 2,8%, respectivamente.

Utilizando a metodologia do USDA para a cultura da cana-de-açúcar, considerando um erro médio de 8%, ao nível de confiança de 95%, os erros tolerados devem ser de mais ou menos 16% em relação ao valor observado. Assim, este valor pode servir como referência na avaliação de modelos que estimam a produção da cana-de-açúcar.

3.4 Eficiência de uso da água

A produtividade da água (WP) ou eficiência de uso da água (EUA) são indicadores úteis para quantificar o impacto das decisões de irrigação em relação à gestão da água, como por exemplo a irrigação por déficit. A EUA é usada para definir a relação entre a produção vegetal em relação à quantidade de água utilizada pela cultura, expressa em kg.m^{-3} (GEERTS & RAES, 2009). No AquaCrop, a EUA refere-se à relação entre o rendimento final (produto comercializável) em relação ao volume de água consumida pela cultura (ET). Neste trabalho considerou a biomassa seca produzida pela cultura, sendo o cálculo da EUA dada pela equação 20.

$$EUA = \frac{B}{\sum ET} \quad (20)$$

em que:

B - biomassa final produzida (kg)

ET - evapotranspiração real (mm)

A evapotranspiração real (ET) refere-se a água perdida por evaporação do solo com a transpiração da cultura durante o ciclo da cultura. Dado que não há uma maneira fácil de distinguir esses dois processos em campo, eles são geralmente combinados sob o termo de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

Os valores de EUA relatados na literatura variam a medida que os autores expressam o denominador como a quantidade de água aplicada (a soma de chuvas e de irrigação) ou como a quantidade de água transpirada (a perda de água pela evaporação do solo não é levada em conta) ou até mesmo o custo financeiro associado a irrigação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Parâmetros conservativos do modelo

Os parâmetros obtidos na parametrização e na validação do modelo AquaCrop para cultura da cana-de-açúcar estão apresentados na Tabela 3. Estes parâmetros incluem: o coeficiente declínio do dossel (CDC); coeficiente de cultura para a transpiração com dossel completo (K_{cbx}); limites de depleção da água no solo para a inibição do crescimento foliar, da condutância estomática e da senescência do dossel entre outros.

Após ajustar os parâmetros repetidamente depois de comparar os resultados simulados com os medidos em campo, chegou-se ao conjunto de valores para os parâmetros conservativos que parecem ser válidos para a maioria das condições simuladas (Tabela 3).

A concepção do modelo assume que esses parâmetros são aplicáveis a uma ampla gama de condições e não são específicos para uma cultivar. Há certamente 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, possa ser amplamente aplicável sem calibração para cada cultivar (HSIAO et al., 2009).

Os valores da temperatura basal e temperatura máxima encontram-se dentro dos limites sugeridos na literatura. O coeficiente do fator forma que descreve o estresse hídrico refere-se a aclimação da cultura ao estresse, desta forma quanto maior o valor, maior sua resistência ao estresse hídrico. A descrição dos parâmetros e sua influência no processo de simulação encontram-se ao longo do texto.

Tabela 3 –Parâmetros conservativos da cultura obtidos na parametrização e utilizados na validação do modelo AquaCrop para as diferentes cultivares

Símbolo	Descrição	Cultivar	Valor	Unidade ou Significado
T _{base}	Temperatura basal		17,5	°C
T _{upper}	Temperatura máxima	*	38	°C
-	Área foliar por plântula na emergência de 90%	*	20	(cm ²)
K _{c Tr}	Coefficiente de cultura para transpiração quando CC= 100%	*	1,1	Transpiração em relação à ETo quando dossel está completo
CDC	Coefficiente de declínio do dossel	*	4,0	Redução na CC relativo a CCx (%.dia ⁻¹)
f _{age}	Coefficiente de redução do coeficiente de cultura para transpiração	*Cana Planta	0,3	Declínio em função do envelhecimento foliar
		*Cana Soca	0,4	
p _{exp, upper}	Limite da depleção da água no solo para a expansão do dossel - Limite superior	*	0,25	Acima deste limite o crescimento foliar não é inibido
p _{exp, lower}	Limite da depleção da água no solo para a expansão do dossel - Limite inferior	*	0,57	A expansão foliar cessa neste valor.
-	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	*	5	
-	Fator forma da curva de crescimento do sistema radicular		1,3	
-	Mínimo de graus-dias necessários para a produção total biomassa total	*	10	(°C.dia ⁻¹)

* Parâmetros aplicáveis para todas as cultivares estudadas.

4.2. Parametrização e Validação do modelo AquaCrop

4.2.1 Cobertura do solo pelo dossel verde (CC)

O modelo foi parametrizado utilizando os dados coletados nas localidades de Juazeiro (SILVA 2009), Coruripe (SILVA, 2007) e Carpina (OLIVEIRA, 2008) e validado utilizando os dados de Rio Largo (ALMEIDA et al., 2008) e Campos dos Goytacazes (ESTEVES, 2011), para as cultivares RB92579, RB93509, RB867515, SP79-1011 e SP81-3250. Como a cultivar RB867515 não foi avaliada no estudo de Rio Largo, realizou-se parametrização da mesma com os dados da localidade de Coruripe e validou para os dados da localidade de Carpina. A parametrização da cultivar CTC9 foi realizada com os dados do tratamento referente a 50% da ITN e validada com os dados dos tratamentos de sequeiro e 100% da ITN, conduzido na localidade Goianésia.

Na parametrização do modelo, primeiramente, foi realizada a simulação da variação da porcentagem de cobertura do solo pelo dossel verde (CC) e os resultados para a cultivar RB92579 são apresentados na Figura 15. A porcentagem de cobertura do solo pelo dossel chegou a 95% próximo aos 180 dias após o corte (DAC), tendo o valor observado de IAF de 2,92 para 182 DAC. Nota-se uma boa concordância entre os dados simulados pelo modelo e os observados, representando bem a dinâmica do crescimento do dossel ($r^2 = 0,99$, $d = 0,99$ e $E = 0,99$) mostrando que o modelo simulou bem (REQM = 1,9%) a CC.

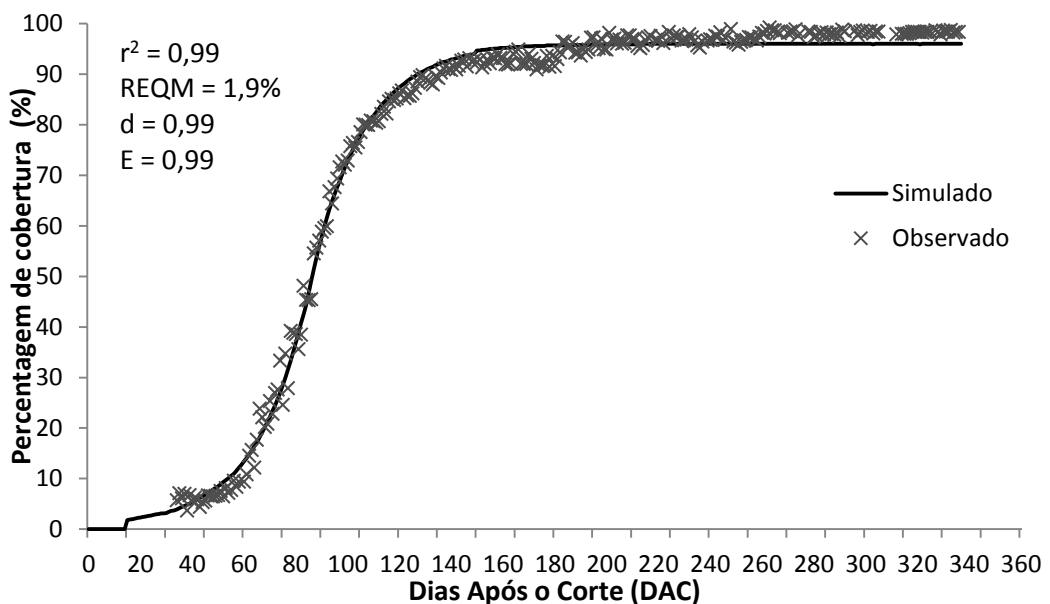


Figura 15 – Percentagem de cobertura do solo medida e simulada pelo modelo AquaCrop para a cultivar RB92579, na localidade de Juazeiro-BA

A maioria dos experimentos com cana-de-açúcar não se tem a medição da cobertura do solo e sim o índice de área foliar, sendo o mesmo coletado ao longo do ciclo da cultura. Como o ciclo da cultura é extenso, geralmente não se faz medições frequentes, o que acaba prejudicando o estudo do crescimento do dossel no início e ao longo do ciclo. Em virtude do uso dos dados diários de f_{RFA} foi possível a obtenção dos ótimos resultados na simulação.

A conversão do IAF para CC não é direta e necessita do valor do coeficiente de extinção. Desta maneira, foram plotados os valores do logaritmo neperiano (\ln) da fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (f_{RFA}) versus os valores de IAF medidos, sendo o coeficiente angular o coeficiente de extinção da luz (Figura 16). De acordo com o gráfico, o valor do coeficiente de extinção obtido para a variedade RB92579 foi de 0,55, sendo este valor utilizado para a conversão do IAF em CC para todas as cultivares estudadas.

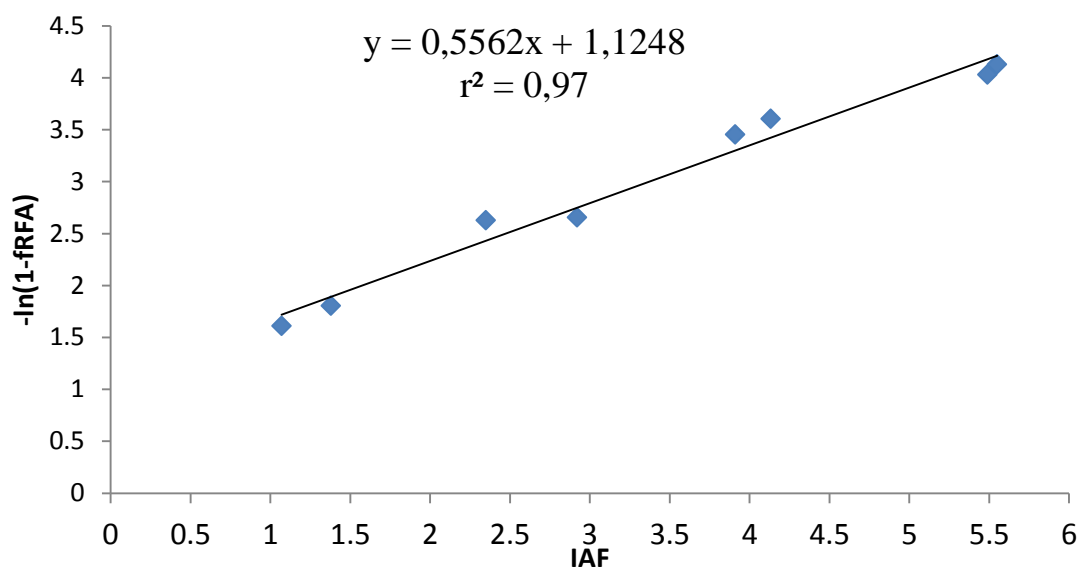


Figura 16 – Plotagem do valor de $-\ln(1-f_{RFA})$ versus o IAF a cultivar RB92579, na localidade de Juazeiro-BA

Na literatura, o coeficiente de extinção para a cana-de-açúcar apresenta diferentes valores para as diversas condições e cultivares. De Silva e De Costa (2012) em experimento realizado no Sri Lanka, observaram que o coeficiente de extinção era menor para cana irrigada (0,25) em relação à cana de sequeiro (0,41). Park et al., (2005), avaliando a eficiência de uso da radiação para 5 cultivares de cana-de-açúcar na costa leste da Austrália, obtiveram o coeficiente de extinção médio de 0,40. Muchow et al. (1994), avaliaram a

interceptação da radiação em cana irrigada, e obtiveram o coeficiente de extinção de 0,38.

Segundo Ferreira Junior (2013), as pesquisas citadas usaram tubos solarimétricos para medir a irradiância solar transmitida, esses sensores mensuram na faixa espectral entre os comprimentos de ondas de 0,35 a 2,5 micrometros (μm). A transmitância no interior das plantas é maior quando as medidas são baseadas na radiação solar global ($\lambda = 0,35$ a $2,5 \mu\text{m}$) do que quando feitas com sensores que medem na faixa fotossintética (sensor quantum, $\lambda = 0,4$ a $0,7 \mu\text{m}$), resultante dos diferentes valores de coeficiente de absorção pelas folhas, dos respectivos fluxos radiantes (MONTEITH, 1993; BONHOMME, 2000). Assim, o coeficiente de extinção quando é determinado utilizando dados de irradiância com espectro completo apresentará valores menores, ou seja, maior transmitância do fluxo radiativo. No estudo de Silva (2009), as medidas da transmitância foram feitas com sensores que medem na faixa espectral fotossintética (sensor quantum).

Outros autores que também usaram sensores com faixa espectral fotossintética encontraram valores do coeficiente de extinção mais elevados. Como Ferreira Junior (2013), que estudando a eficiência no uso da radiação para a cultivar RB98710 em diferentes espaçamentos, observou que, o coeficiente de extinção variou entre 0,36 e 0,53 aos 85 e 214 DAP, respectivamente para o espaçamento único. Inman-Bamber (1994) observou o coeficiente de extinção variável ao longo do dia entre 0,55 e 0,58 para a cultivar NCo376.

Segundo Scarpate (2011), observações de campo indicam que o coeficiente de extinção também varia com o desenvolvimento; inicialmente um valor baixo em torno de 0,47 e próximo ao pico do IAF um valor de 0,58 é observado (ZHOU et al., 2003). Scarpari (2007) ressalta que o uso de valores variáveis do coeficiente de extinção em modelos de cultura é recomendado, melhorando a simulação, minimizando erros na estimativa da produtividade de diferentes cultivares.

No modelo CANEGRO (SINGELS et al., 2008) o coeficiente de extinção varia com o desenvolvimento da cultura e é calculado em função do número total de folhas por perfilho, variando de 0,58 a 0,84. No AquaCrop, a água tem papel fundamental na simulação (*water-driven model*), desta maneira o coeficiente de extinção não tem relação direta com o modelo, apesar de ter

grande importância nos modelos de simulação em que a radiação tem o papel principal na simulação (*radiation-driven model*).

Após a obtenção do coeficiente de extinção, converteu o IAF em CC, e procedeu a parametrização para as outras cultivares. Com os dados da localidade de Juazeiro foi possível à obtenção do coeficiente de crescimento do dossel (CGC), sendo que este valor não é comumente encontrado na literatura. O valor obtido para o CGC de 5,1% para RB92579, significa que o dossel se expande à uma taxa de 5,1% em relação à percentagem atual da cobertura do solo.

Na Figura 17 encontram-se os gráficos e os resultados da parametrização da cobertura do solo (CC) para as cultivares RB92579, RB93509, RB867515 e SP79-1011 para a localidade de Coruripe, sendo que as barras inferior e superior indicam os valores mínimo e máximo observados, respectivamente.

Observa-se o mesmo padrão da curva da CC obtida para as cultivares na localidade de Coruripe, apresentando bons valores do coeficiente de determinação ($r^2 = 0,95-0,97$) e do índice de concordância ($d = 0,86-0,96$). Nota-se um elevado erro para todas as cultivares (REQM = 12,1-21,5%). O mesmo padrão de crescimento do dossel, ocorre uma vez que todas as cultivares estavam expostas as mesmas condições. As cultivares diferiram entre si apenas pela sua velocidade de crescimento do dossel.

A cultivar RB92579 apresenta velocidade de crescimento lenta e bom fechamento na entrelinha (CATÁLOGO NACIONAL DE VARIEDADES "RB" DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2010). No catálogo observa-se que as cultivares RB93509 e RB867515 apresentam velocidade de crescimento regular e rápida, respectivamente e ambas apresentam bom fechamento na entrelinha. Desta maneira procurou estabelecer valores de CGC superiores ao encontrado para a cultivar RB92579, que foi de 5,1%, utilizando valores de CGC de 5,6% para a cultivar RB93509 e 6,1% para a cultivar RB867515 na parametrização e validação.

Os dados referentes a velocidade de crescimento do dossel para as cultivares SP79-1011 e SP81-3250, não se encontram no catálogo da RIDESA (CATÁLOGO NACIONAL DE VARIEDADES "RB" DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2010). Assim, procurou-se informação sobre a velocidade de crescimento do dossel na literatura e com profissionais da área.

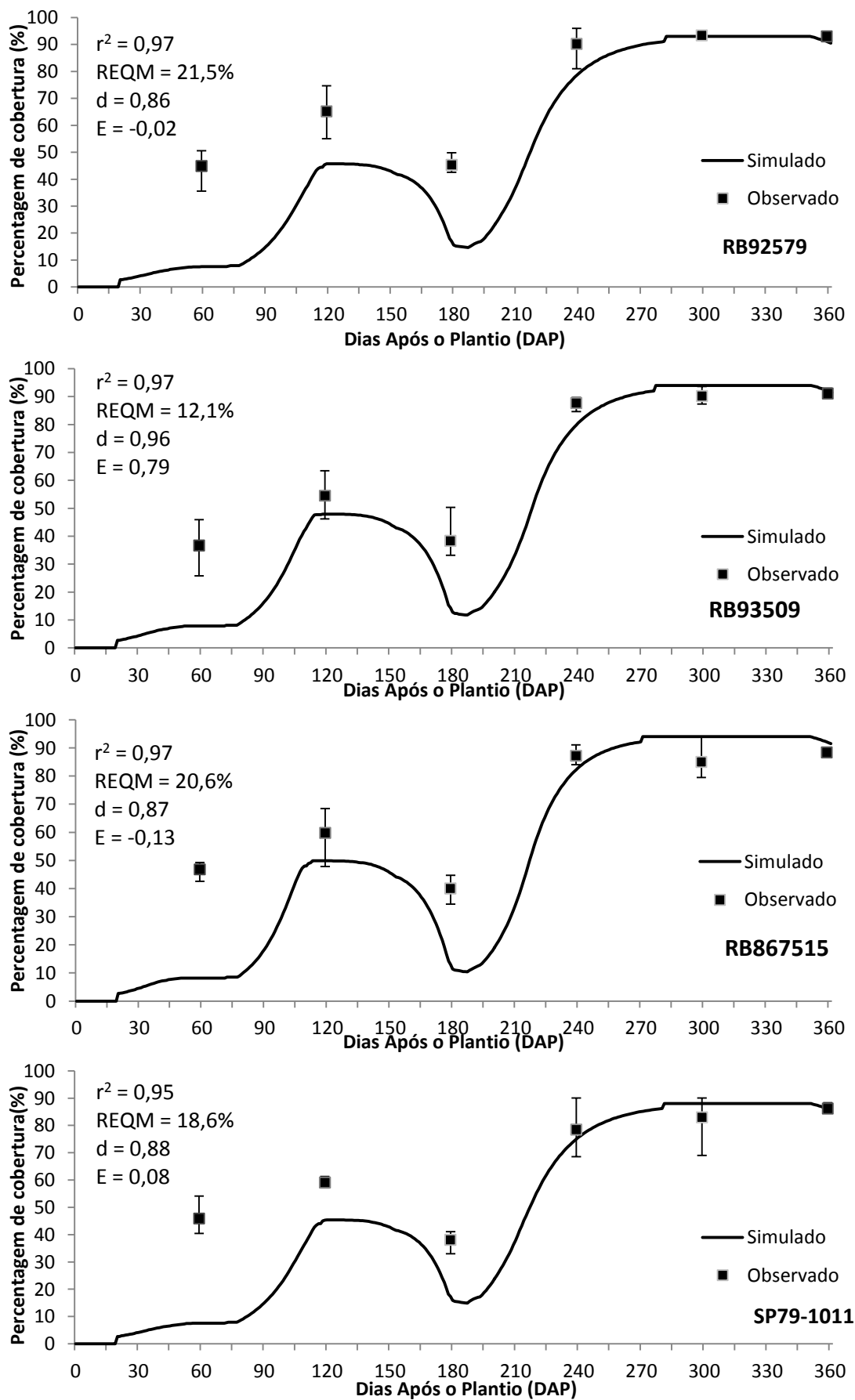


Figura 17 – Variação da percentagem de cobertura do solo observada e simulada pelo modelo AquaCrop para as cultivares RB92579, RB93509, RB867515 e SP79-1011, na localidade de Coruripe-AL

Segundo Pereira (2011), a cultivar SP81-3250 apresenta crescimento inicial rápido. Barbosa et al. (2013) avaliaram a dinâmica de infestação de plantas daninhas em algumas cultivares de cana-de-açúcar, tendo observado que a cultivar SP81-3250 apresentou um elevado índice de velocidade de emergência, desta maneira obteve-se um valor de CGC de 5,6% para esta cultivar e, um CGC de 5,1% para a cultivar SP79-1011.

Na localidade de Coruripe, a precipitação total ao longo do ciclo da cultura foi da ordem 1600 mm, porém durante os 80 dias iniciais da cultura ocorreram apenas 32 mm, tendo o modelo não simulado bem a cobertura do solo para as condições de sequeiro (REQM = 21,5%, E = -0,02), principalmente no início do ciclo, apesar da boa concordância entre os dados medidos e simulados ($r^2 = 0,97$, $d = 0,86$). No início do cultivo (60 DAP), a cultura apresentou um IAF médio de 1,58 correspondendo a um CC de aproximadamente 45%, sendo o valor simulado próximo a 5%. Nesta localidade o modelo subestimou a CC até próximo os 240 DAP. Os baixos valores de cobertura do solo observados nesta época ocorreram em virtude da baixa precipitação acumulada até a segunda quinzena de março (180 DAP), que foi de apenas 154 mm, com a ETo acumulada de 757 mm neste mesmo período. A combinação de baixa precipitação e alta evapotranspiração geraram grandes déficit de água no solo (-120 mm), acarretando impactos na cultura. Os valores de déficit de água no solo simulado pelo modelo, para a cultivar RB92579, encontram-se na Figura 18.

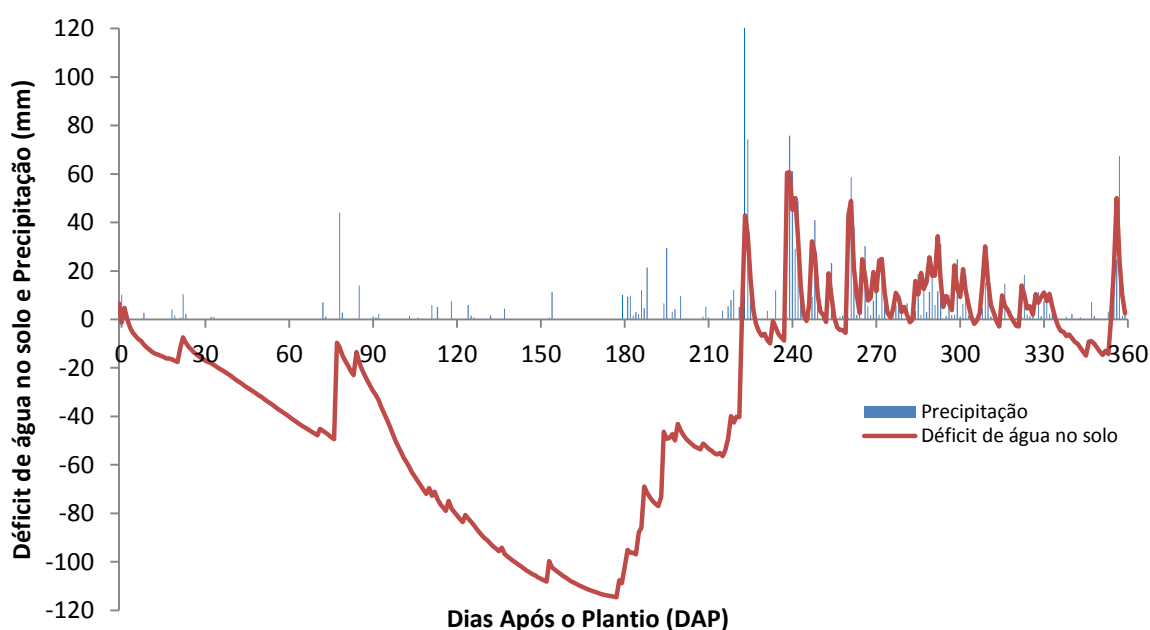


Figura 18 – Precipitação pluviométrica e simulação do déficit de água no solo pelo modelo AquaCrop para a cultivar RB92579 na localidade de Coruripe-AL

Nota-se, nas simulações da CC na localidade de Coruripe (Figura 17), que o AquaCrop não simulou bem a fase de desenvolvimento dossel, devido ao efeito inibitório do déficit hídrico no crescimento do mesmo, o qual foi subestimado pelo modelo. Inman-Bamber e Smith (2005) relataram que o número de folhas pode se recuperar rapidamente após o término do estresse. O retorno das chuvas ocorreu próximo aos 200 DAP (Figura 18), notando-se claramente a recuperação do crescimento foliar pela cultura.

Os erros observados nesta localidade podem estar associados ao conteúdo de água no solo no início do ciclo da cultura. Além disso, nesta localidade foram utilizados dados das características físico hídrica do solo de outra área localizada próximo ao local do experimento, porém que apresentava características semelhantes à área do experimento. Como o balanço de água no solo é fundamental no processo de simulação do AquaCrop, essas incertezas influenciaram na modelagem do mesmo.

Apesar do modelo não estimar com precisão os valores de CC, o mesmo conseguiu simular as respostas da cultura ao estresse hídrico, como a senescência do dossel. Segundo Inman-Bamber (2004), a senescência é responsável pelo declínio nas folhas verdes por colmo em decorrência do aumento do déficit hídrico no solo, como observado para a cultura (Figura 18). Este autor, estudando as respostas fisiológicas da cana-de-açúcar ao estresse hídrico, observou que a perda de folhas verdes por colmo devido à senescência foliar foi rápida quando o déficit de água no solo ultrapassou os 100 mm, sendo que a taxa de aparecimento foliar foi reduzida com déficits de 36 mm.

Heng et al. (2009), validando o modelo AquaCrop para a cultura do milho, verificaram piores resultados na simulação do dossel sob condições de sequeiro. Estes autores concluíram que o modelo necessita de uma avaliação mais aprofundada em condições de estresse mais severo.

Os gráficos da evolução da CC da cultivar RB92579 e os resultados da validação do modelo para localidade de Rio Largo, para o ciclo da cana planta (A) e da cana soca (B) encontram-se na Figura 19.

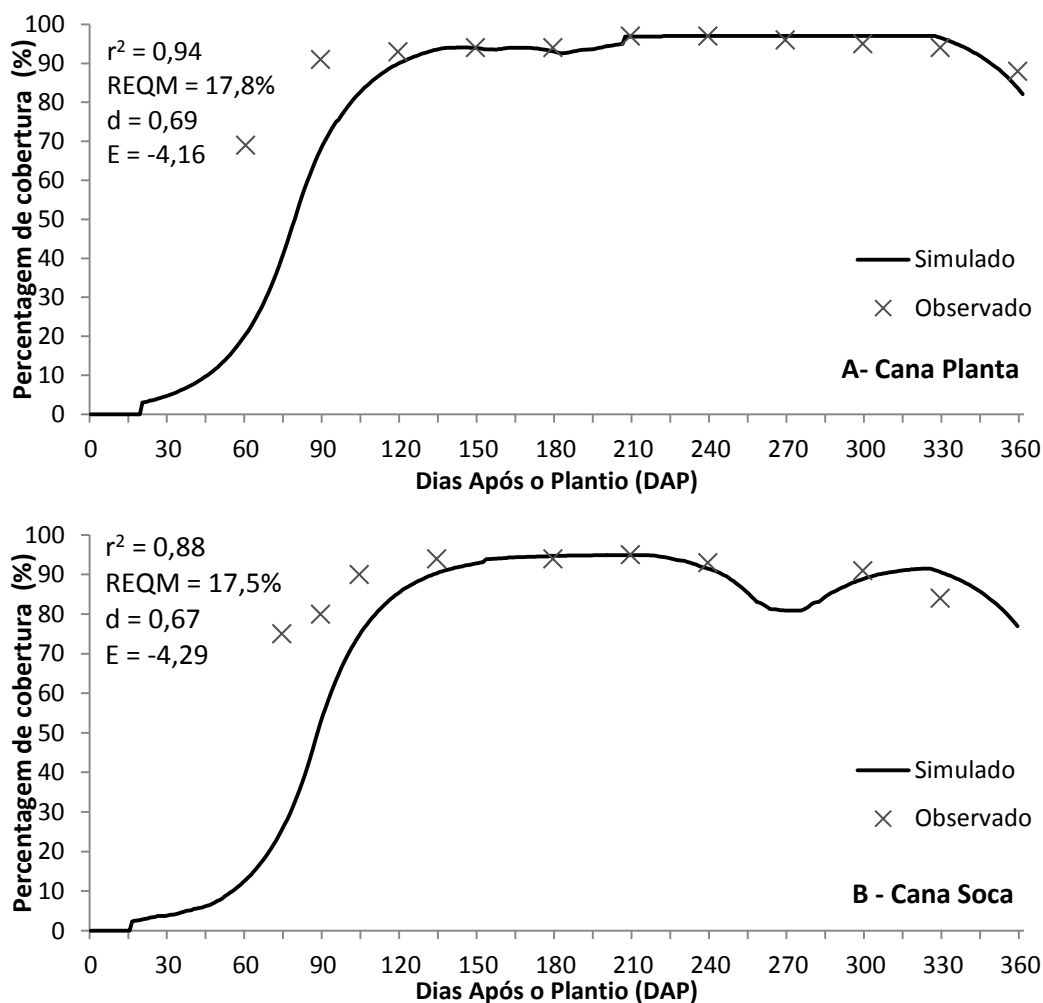


Figura 19 – Variação da percentagem de cobertura do solo observada e simulada pelo modelo AquaCrop para a cultivar RB92579 na localidade de Rio Largo-AL, no ciclo da cana planta (A) e da soca (B)

Para a cultivar RB92579, o modelo apresentou um melhor desempenho para o ciclo da cana planta ($r^2 = 0,94$, $REQM = 17,8\%$, $d = 0,69$ e $E = -4,16$) em relação a cana soca ($r^2 = 0,88$, $REQM = 17,5\%$, $d = 0,67$ e $E = -4,29$) para localidade de Rio Largo, e erros menores aos observados na localidade de Coruripe ($REQM = 21,5\%$) que apresentou melhores índices de concordância ($r^2 = 0,97$, $d = 0,86$).

No experimento de Rio Largo, a cana planta foi irrigada até aos 110 DAP, sendo aplicada uma lâmina total 585 mm e a precipitação durante o ciclo da cultura foi de 2120 mm. Aos 90 DAP a cultura apresentou o IAF médio de 3,5 (85% de CC). No ciclo da cana soca foi aplicada uma lâmina total de 540 mm, ocorrendo uma precipitação de 1468 mm durante o ciclo.

Os resultados das simulações da CC na validação do modelo para cultivar RB93509, na localidade de Rio Largo encontram-se na Figura 20.

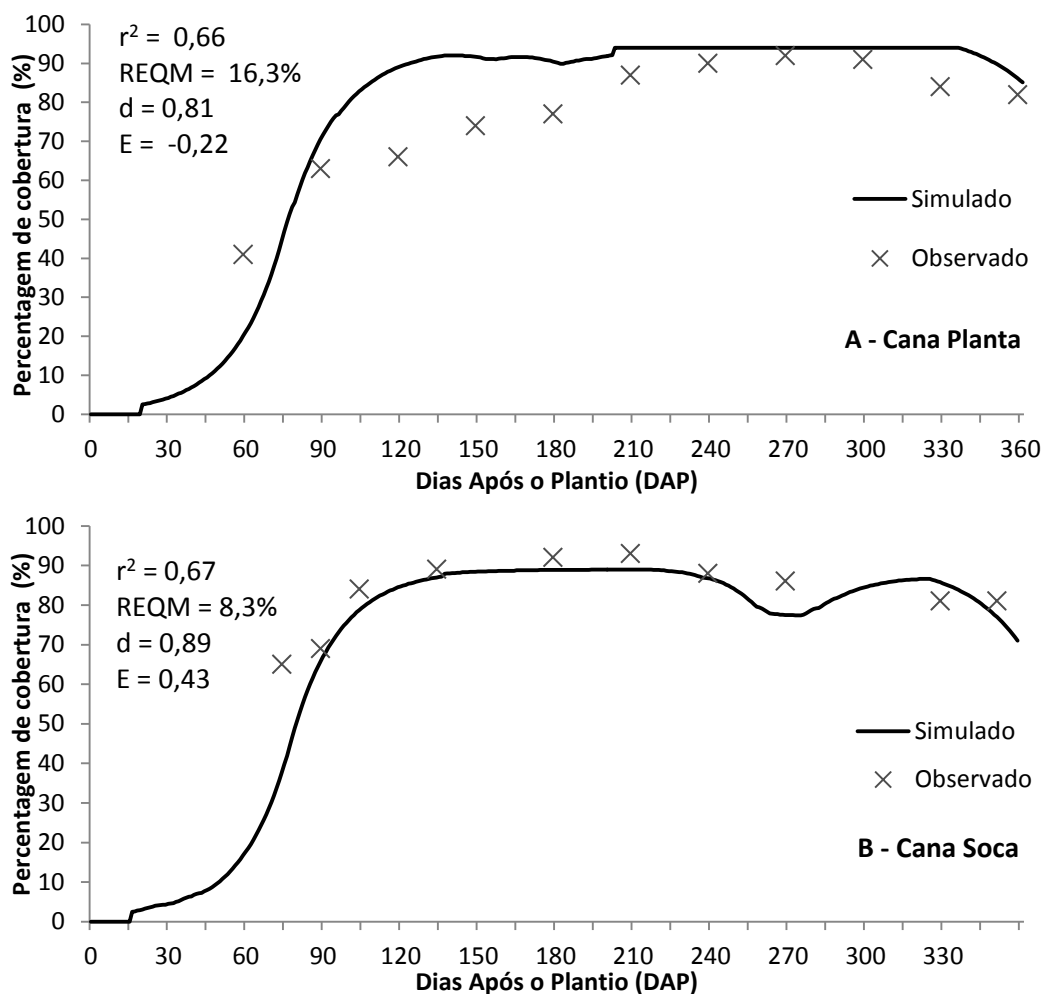


Figura 20 – Variação da percentagem de cobertura do solo observada e simulada pelo modelo AquaCrop para a cultivar RB93509 na localidade de Rio Largo-AL, para o ciclo da cana planta (A) e soca (B)

Em Rio Largo, houve uma melhor simulação da cultivar RB93509 para os dados do ciclo da cana soca ($REQM = 8,3\%$) em relação a cana planta ($REQM = 16,3\%$). Os maiores valores da $REQM$ ocorridos em todas as simulações da CC, para localidade de Rio Largo, ocorrem dos valores iniciais simulados, que foram subestimados pelo modelo. O que pode ter gerado esses erros foram os dados de IAF obtidos junto aos autores (ALMEIDA et al., 2008), que apresentavam algumas incoerências em relação a data correta de coleta do dado. Após o fechamento do dossel, ou seja, após atingir a máxima cobertura, o modelo simula bem os valores observados.

Na Figura 21 encontram-se os resultados das simulações na validação da CC para a cultivar SP79-1011, para localidade de Rio Largo. A simulação para esta cultivar apresentou os menores erros ($REQM = 8,6\%$), e a melhor concordância ($r^2 = 0,85$, $d = 0,94$) para o ciclo da cana planta, na localidade de Rio Largo.

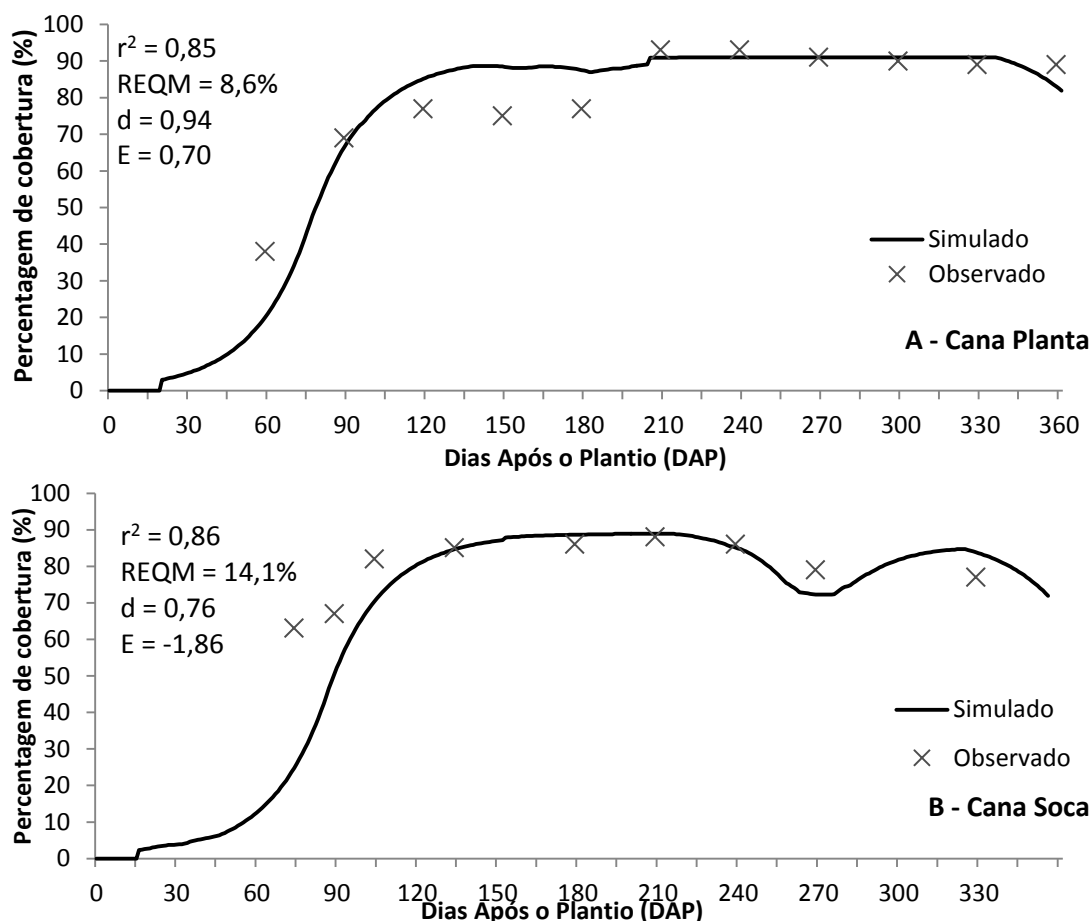


Figura 21 – Variação da percentagem de cobertura do solo observada e simulada pelo modelo AquaCrop para a cultivar SP79-1011 na localidade de Rio Largo-AL, para o ciclo da cana planta (A) e soca (B)

A cultivar SP81-3250 foi parametrizado para os dados da localidade de Carpina. O levantamento dos valores do IAF para cultivar SP81-3250 foi avaliado no estudo de Esteves (2011), desta maneira, realizou-se a validação do modelo apenas para a localidade de Campos dos Goytacazes (Figura 22), apresentando boa concordância ($r^2 = 0,82$, $d = 0,93$) entre os dados observados e simulados com pequeno erro (REQM = 6,9%). O modelo conseguiu simular a redução da cobertura da área foliar após o forte estresse hídrico (100 mm) ocorrido entre 120 e 170 DAP.

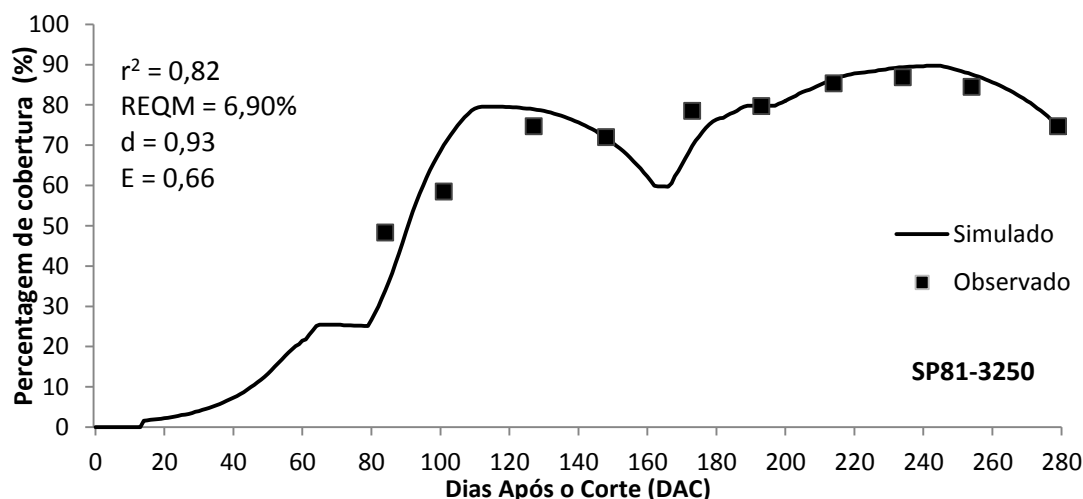


Figura 22 – Variação da porcentagem de cobertura do solo observada e simulada pelo modelo AquaCrop para a cultivar SP81-3250 na localidade de Campos dos Goytacazes-RJ

O modelo não simulou bem o início do crescimento do dossel para o ciclo da cana soca em Rio Largo e Coruripe, subestimando os valores observados. Esses erros encontrados podem ser advindos do uso do valor constante do coeficiente de extinção. Uma vez que o mesmo pode variar ao longo do ciclo da cultura (ZHOU et al., 2003, INMAN-BAMBER, 1994), da presença ou não da irrigação (DE SILVA & DE COSTA, 2012) e do espaçamento entre plantas (FERREIRA JUNIOR, 2013).

O modelo simula o crescimento do dossel verde, ou seja, a superfície transpirante. Desta maneira, a cobertura do solo com folhas amareladas devido a senescência, não é computada pelo modelo como folhas verdes. Assim, a cobertura de 30% simulada pelo modelo, significa que 30% do solo é coberto por folhas verdes. Todavia, alguns erros podem advir da conversão do IAF para CC, porque na obtenção do IAF as folhas amareladas são consideradas.

Os valores calibrados para os limites superior e inferior do coeficiente de estresse hídrico para a expansão foliar foi de 0,25 e 0,57, respectivamente. Tal fato significa que a planta não sofre estresse no crescimento foliar até uma depleção de 25% da água disponível no solo, sendo que abaixo do valor de 57% da água disponível a expansão foliar cessa. De acordo com Inman-Bamber (2004) o crescimento foliar e taxa de extensão do colmo são indicadores altamente sensíveis do estresse hídrico da planta. Porém este autor salienta o cuidado com a temperatura mínima que afeta diretamente o crescimento foliar e do colmo, o que não afetou a expansão foliar na localidade

de Coruripe, que apresentou uma temperatura mínima média do ar de 21,4°C ao longo do ciclo.

Pela calibração do modelo, o início da senescência foliar ocorre quando a água no solo reduz abaixo de 64% (p_{sen}) da água disponível entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. 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% (SMITH & SINGELS, 2005).

Alguns erros advindos da simulação da CC podem ser em função do uso de um único coeficiente de extinção, uma vez que foi utilizado o mesmo valor para todas as cultivares e fases da cultura. Além disso, o modelo leva em consideração a expansão do crescimento 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.

Segundo Barbieri (1981) a velocidade da emergência da brotação do tolete depende da cultivar (emergência rápida ou lenta), do estado nutricional do tolete (dimensão do entrenó), da umidade no tolete, no solo e no ar, da temperatura (ótimas entre 34 e 37°C, limitantes abaixo de 21°C e acima de 44°C), e da aeração do solo (compactação e drenagem deficientes levam à falta de oxigênio para a respiração dos tecidos e das raízes).

Geralmente, na literatura observa-se que a temperatura basal da cana-de-açúcar varia de 15°C (INMAN-BAMBER, 1994) a 20°C (BARBIERI et al., 1981). O AquaCrop considera apenas um valor de temperatura basal, (17,5°C) para todo o ciclo da cultura, assim, as limitações causadas pelas baixas temperaturas na brotação não são simuladas pelo modelo.

Um parâmetro importante no processo de simulação do modelo é coeficiente de declínio do dossel (CDC). Este parâmetro expressa a redução da percentagem de cobertura do solo pelo dossel verde durante a senescência da cultura. Apesar dos dados de fração fotossinteticamente ativa interceptada (f_{RFA}) fornecerem uma medida indireta da CC, estes dados não permitem inferir

sobre a redução da cobertura do solo pelo dossel verde, uma vez que após o amarelecimento das folhas, estas continuam sombreando o solo, influenciando diretamente na radiação fotossinteticamente ativa.

Como os dados de IAF são coletados em intervalos de tempo maiores, o ajuste do CDC ficou incerto, já que em grande parte dos trabalhos os autores têm interesse na obtenção do IAF nas fases iniciais do crescimento e não durante a fase de maturação. O fato de não haver dados de IAF durante o início da senescência da cultura até a colheita, dificultou a obtenção de valores mais condizentes com a realidade. Assim, o valor de CDC (4%) foi baseado nas observações realizadas para a cultivar SP81-3250, que foram obtidos mais frequentemente ao final do ciclo da cultura.

4.2.2 Biomassa Seca

Apesar da concepção robusta do modelo AquaCrop (aplicado para diferentes condições edafoclimáticas), não foi possível simular o ganho de biomassa de cada cultivar utilizando os mesmos parâmetros para todas as cultivares. Em Rio Largo no ciclo da cana planta, com irrigação, a cultivar RB92579 apresentou biomassa seca de 66 ton.ha⁻¹ (TCH de 168 ton.ha⁻¹) e a cultivar SP79-1011 apresentou um valor médio de 40 ton.ha⁻¹ (TCH de 100 ton.ha⁻¹). Essas mesmas cultivares em Coruripe (sequeiro) apresentaram valores de 30 ton.ha⁻¹ (TCH = 84 ton.ha⁻¹) e 21,5 ton.ha⁻¹ (TCH = 60 ton.ha⁻¹) respectivamente. A cultivar RB92579 apresentou produtividades superiores as outras cultivares testadas em condições irrigadas e não irrigadas.

Nas simulações, o uso de diferentes valores referentes aos parâmetros do estresse hídrico não foram capazes de simular as diferenças entre as produções obtidas pelas cultivares, numa mesma localidade. Assim, procurou-se estabelecer um parâmetro que representasse essas diferenças, haja visto que se uma cultivar fosse mais resistente à seca deveria sobressair à outra em condições de sequeiro, o que não foi observado para as localidades estudadas. Desta maneira considerou diferentes valores da produtividade da água (WP). Entretanto diferentes respostas fisiológicas em razão do estresse hídrico podem ocorrer.

Na Figura 23, encontram-se o gráfico e os resultados da parametrização para a cultivar RB92579, na localidade de Juazeiro para os dados de matéria seca da parte aérea observada (folhas, colmo e palmito) e simulada (ton.ha⁻¹).

Na análise de todo o conjunto de dados observados e estimados, observa-se que o modelo AquaCrop apresentou um bom ajuste aos dados observados, não evidenciando com boa exatidão ($REQM = 3,25 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$) e boa precisão ($r^2 = 0,99$, $d = 0,99$), explicando 99% da variabilidade dos dados observados no experimento de campo.

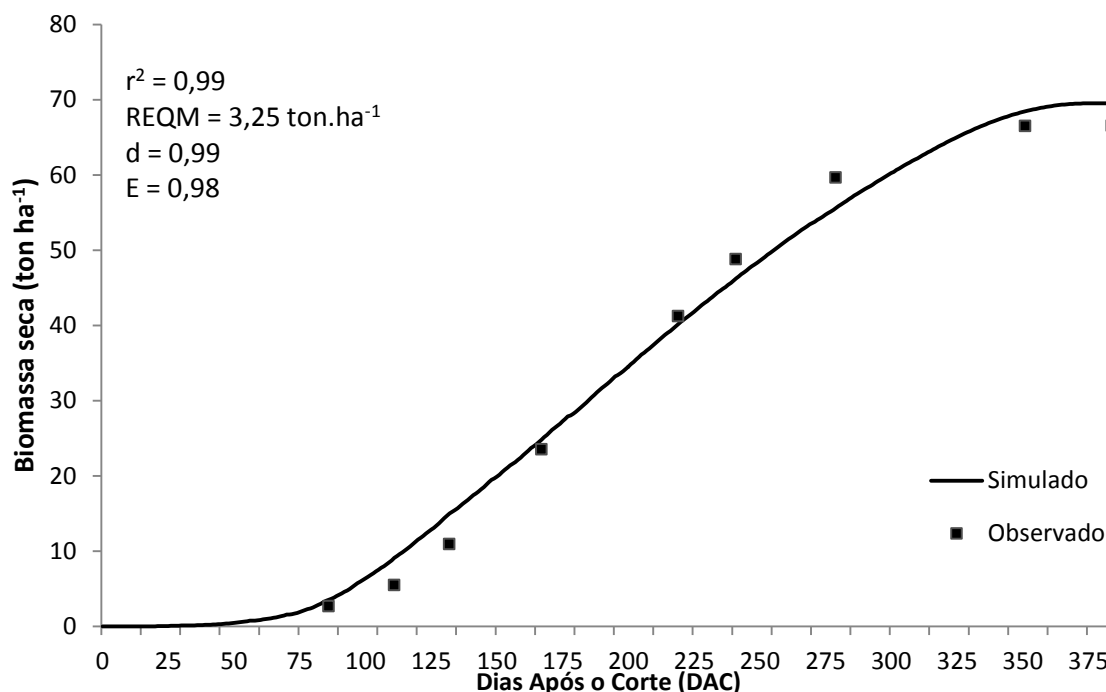


Figura 23 – Biomassa seca observada e simulada na parametrização da cultivar RB92579, na localidade de Juazeiro-BA

A disponibilidade dos dados de cobertura do solo possibilitou a boa parametrização do modelo para a cultivar em questão, tanto da biomassa quanto da CC. 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, conseqüentemente, acúmulo de biomassa.

Neste estudo foi observada produtividade de colmos (TCH) de $161,7 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ para uma biomassa seca final da ordem de $66,53 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, apresentando um erro de estimativa da biomassa final de 4,5% em relação a biomassa seca final. Na Figura 24, encontram-se os gráficos e os resultados da parametrização para as cultivares RB92579, RB93509, RB867515 e SP79-1011, na localidade de Coruripe para os dados de matéria seca da parte aérea. Nesta localidade, o modelo apresentou o mesmo comportamento na simulação de todas as cultivares, superestimando a biomassa dos 120 a 180 DAP e subestimando os valores próximos aos 240 DAP, aproximando do resultado final observado.

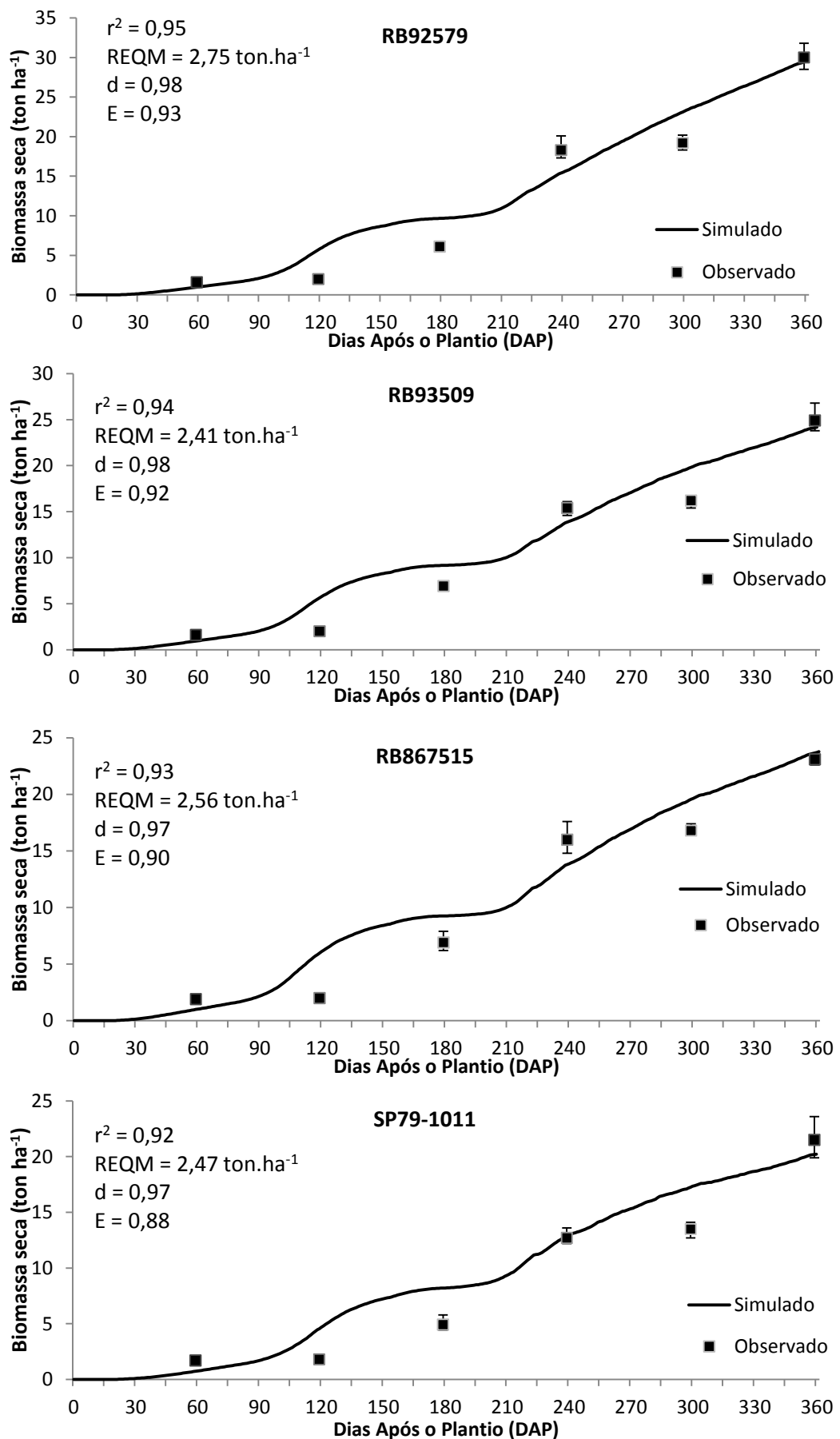


Figura 24 – Biomassa seca observada e simulada na parametrização das cultivares RB92579, RB93509, RB867515 e SP79-1011, no ciclo da cana planta na localidade de Coruripe-AL

De 60 aos 120 DAP foram observados pequenos acréscimo de biomassa, devido a pequena cobertura do solo pelo dossel verde e pelos elevados valores de déficit de água no solo. O pequeno acréscimo de biomassa compreendido entre 240 e 300 DAP, não foi bem estimado pelo modelo em nenhuma das simulações. Tal fato pode ter ocorrido em virtude do resultado aquém na simulação da CC. Em todas as simulações, o modelo apresentou uma boa concordância, como pode ser observado no índice de concordância de Willmott ($d = 0,97-0,98$) e no coeficiente de determinação ($r^2 = 0,92-0,95$). Os erros de estimativa da biomassa final foram 0,8, 2,8, 2,6 e 5,9% para as cultivares RB92579, RB93509, RB867515 e SP70-1011, respectivamente.

Os resultados sugerem que, apesar do modelo não ter simulado bem a cobertura do solo pelo dossel, em condições de estresse severo foi possível obter com boa confiabilidade a biomassa final, sendo que provavelmente as subestimativas e superestimativas se compensam, permitindo uma boa estimativa da biomassa final.

Inman-Bamber e Smith (2005) destacaram a oportunidade de características como o fechamento precoce dos estômatos e a queda de folha, como características a serem utilizadas no melhoramento genético para a melhor tolerância à seca.

Porém, Smith e Singels (2005) sugerem que, o fechamento prematuro dos estômatos e a queda de folhas não conduzem necessariamente a rendimentos mais elevados em condições secas e que a tolerância à seca poderia ser uma característica complexa que envolve muitas interações dinâmicas. Estes autores salientam que a capacidade de algumas cultivares em extrair água do solo relativamente eficiente poderia, em teoria, ser uma desvantagem em condições de sequeiro, com períodos de seca frequentes. Em tais condições, seria melhor que as cultivares reduzissem a extração de água precocemente, resultando em altos níveis de água do solo e estresse hídrico menos graves posteriormente.

Uma hipótese para este comportamento é que em condições de restrição hídrica, a planta sensível ao estresse hídrico desenvolve-se mais lentamente, os estômatos fecham precocemente e acabam por utilizar menos água, mantendo-se viva até que as chuvas ocorram. Assim, devido a ocorrência da chuva, a planta cresce apresentando maior produção. Por outro

lado, uma cultivar mais resistente, extrai maior volume de água disponível no início do ciclo e tende a morrer antes do início da estação chuvosa.

Este comportamento pôde ser observado nas simulações com o AquaCrop para localidade de Coruripe (condição de sequeiro). Na simulação quando foi considerado condições em que a planta era resistente ao fechamento dos estômatos ($p_{sto} = 0,55$), a planta utilizou toda água e produzia uma maior quantidade de biomassa em relação planta a mais sensível ao fechamento dos estômatos ($p_{sto} = 0,48$) e morreu próximo aos 180 DAP. Na simulação, considerando uma cultivar mais sensível ao fechamento dos estômatos, a planta produziu menos no início do seu ciclo, mantendo seu crescimento até a estação chuvosa.

Após a cobertura máxima do solo pelo dossel (CC_x) ser alcançada e antes do início da senescência, o dossel envelhece lentamente e sofre pequena e progressiva redução na transpiração e na capacidade fotossintética. Este envelhecimento é simulado por meio de um coeficiente de envelhecimento (f_{age}) que diminui o coeficiente de cultura para transpiração ($K_{c,Trx}$) para uma fração constante e pequena. Após o início da senescência, a transpiração e a capacidade fotossintética da planta diminui mais acentuadamente com o tempo (STEDUTO et al., 2012). Como a produtividade alcançada no ciclo da cana soca é geralmente menor que a da cana planta, utilizou-se o coeficiente de envelhecimento (f_{age}) de 0,3 e 0,4% por dia, para a cana planta e soca, respectivamente. Assim, o uso de um valor maior para esse parâmetro na cana soca, permite a redução da biomassa em relação à cana planta.

O modelo AquaCrop considera o padrão de extração de água do solo de 40, 30, 20 e 10% em relação a profundidade máxima alcançada pelas raízes (Z_x). Esse padrão, todavia, pode ser modificado, sendo esta variável de grande importância para simulação.

Trabalhos sobre a distribuição do sistema radicular e extração da água pela cana-de-açúcar em profundidades maiores que 1,5 m são escassos. As raízes da cana são geralmente localizadas nas camadas superficiais do perfil do solo, com a biomassa de raízes apresentando declínio exponencial com a profundidade (STIRLING et al., 2011).

Azevedo et al., (2011), avaliaram a densidade de comprimento das raízes e a distribuição do sistema radicular da cultivar RB72454 para o ciclo da cana soca (2° e 3° corte) em Londrina (PR). Estes autores estudaram a

densidade de raízes até à profundidade de 1,8 m, e verificaram que nas maiores profundidades do sistema radicular a densidade das raízes é menor. Entretanto, no quarto ciclo (3º corte) observaram a alta distribuição espacial das raízes (até 1,6 m) aos 60 dias após o corte.

Geralmente a profundidade máxima de amostragem das raízes é restringida a 1,5 ou 2 m, com pequenas quantidades de raízes encontradas em tais profundidades, sendo que alguns estudos indicam que 50-75% das raízes são normalmente encontradas entre 30 a 50 cm da superfície do solo (ABOYAMI, 1989, BALL-COELHO et al., 1992).

Porém, estudos como os de Smith et al. (2005); Chopart et al. (2009); Laclau e Laclau (2009) comprovam que as raízes podem estar presentes em profundidades superiores a 4 m, chegando até 6 m (EVANS, 1936).

Laclau e Laclau (2009) estudaram a distribuição das raízes da cana planta para a cultivar RB72454 conduzida com e sem irrigação, para localidade de Piracicaba, sendo que a precipitação acumulada e a irrigação durante o período de estudo foram de 1140 mm e 910 mm, respectivamente. Esses autores observaram que a oferta de água pela irrigação ao longo do ciclo da cultura modificou a distribuição de raízes na parte superior do solo (1,0 metro) com densidade média de $1,36 \text{ g cm}^{-3}$ nos primeiros 40 cm. Esses pesquisadores observaram que a profundidade máxima atingida pelas raízes alcançou 4,25 e 4,70 m para o cultivo irrigado e o conduzido na forma de sequeiro, respectivamente, observada aos 332 DAP.

Laclau e Laclau (2009) verificaram que a grande quantidade de água armazenada nas camadas profundas do solo é responsável por suprir a necessidade de água da cultura durante curtos períodos de estresse hídrico (LACLAU & LACLAU, 2009). Outros autores corroboram com a hipótese de absorção de água pelas raízes da cana-de-açúcar, em maiores profundidades do sistema radicular. Plunkett e Muchow (2003) estudaram a extração de água pelo sistema radicular da cana-de-açúcar em 4 tipos de solo, e observam que sistema o radicular da cana-de-açúcar é capaz de extrair água à profundidades abaixo de 1,8 metros.

Nas simulações para a localidade de Coruripe (condições de sequeiro), quando foi utilizada profundidade de sistema radicular máxima de 1,5 m, a simulação não conseguiu reproduzir o crescimento da cultura, sendo a morte

simulada aos 180 DAP. Desta maneira, utilizou-se para a profundidade máxima das raízes um valor de 2,2 metros.

Nas simulações com tratamento irrigado utilizou uma menor profundidade (1,8 m) em detrimento ao tratamento de sequeiro, uma vez que devido à maior disponibilidade de água no solo nas camadas superficiais as raízes se aprofundam menos. Logo nas simulações da cana soca foi considerado uma profundidade do sistema radicular menor que para a cana planta. Faroni e Trivelin (2006), salientam que depois do corte da cana planta, o sistema radicial antigo mantém-se em atividade por algum tempo e, durante esse período, é substituído pelas raízes dos novos perfilhos da soqueira, sendo esse processo lento e gradual. As raízes da soqueira são mais superficiais que as da cana planta pelo fato dos perfilhos das soqueiras brotarem mais próximos da superfície que os da cana planta.

Na Figura 25 encontram-se os resultados da parametrização e os gráficos da simulação da biomassa seca da parte aérea para as cultivares RB92579, SP79-1011 e SP81-3250 e os resultados da validação da cultivar RB867515 para localidade de Carpina-PE.

A cultivar RB92579 apresentou a maior biomassa seca entre as cultivares estudadas ($99,2 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, $\text{TCH} = 255 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$), porém o modelo simulou apenas $75 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Observa-se que o modelo apresenta uma boa concordância com os dados simulado ($r^2 = 0,98$, $d = 0,90$) apesar dos erros mais elevados ($\text{REQM} = 16,63 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$), em razão da subestimativa do modelo em relação as observações após os 120 DAP. O erro de estimativa considerando a produção final de biomassa seca foi de 24,5%.

Este mesmo comportamento foi observado para as cultivares RB867515 ($r^2 = 0,90$, $d = 0,92$) porém apresentou um menor erro ($\text{REQM} = 9,89 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$). Apesar do modelo apresentar um valor elevado da REQM, o erro de estimativa em relação a biomassa final foi de apenas 2,15%. A cultivar SP81-3250 apresentou uma subestimativa dos valores observados e boa concordância do modelo ($r^2 = 0,99$, $d = 0,95$) apesar do erro elevado ($\text{REQM} = 10,27 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$), sendo o erro de estimativa para biomassa final de 18,5%.

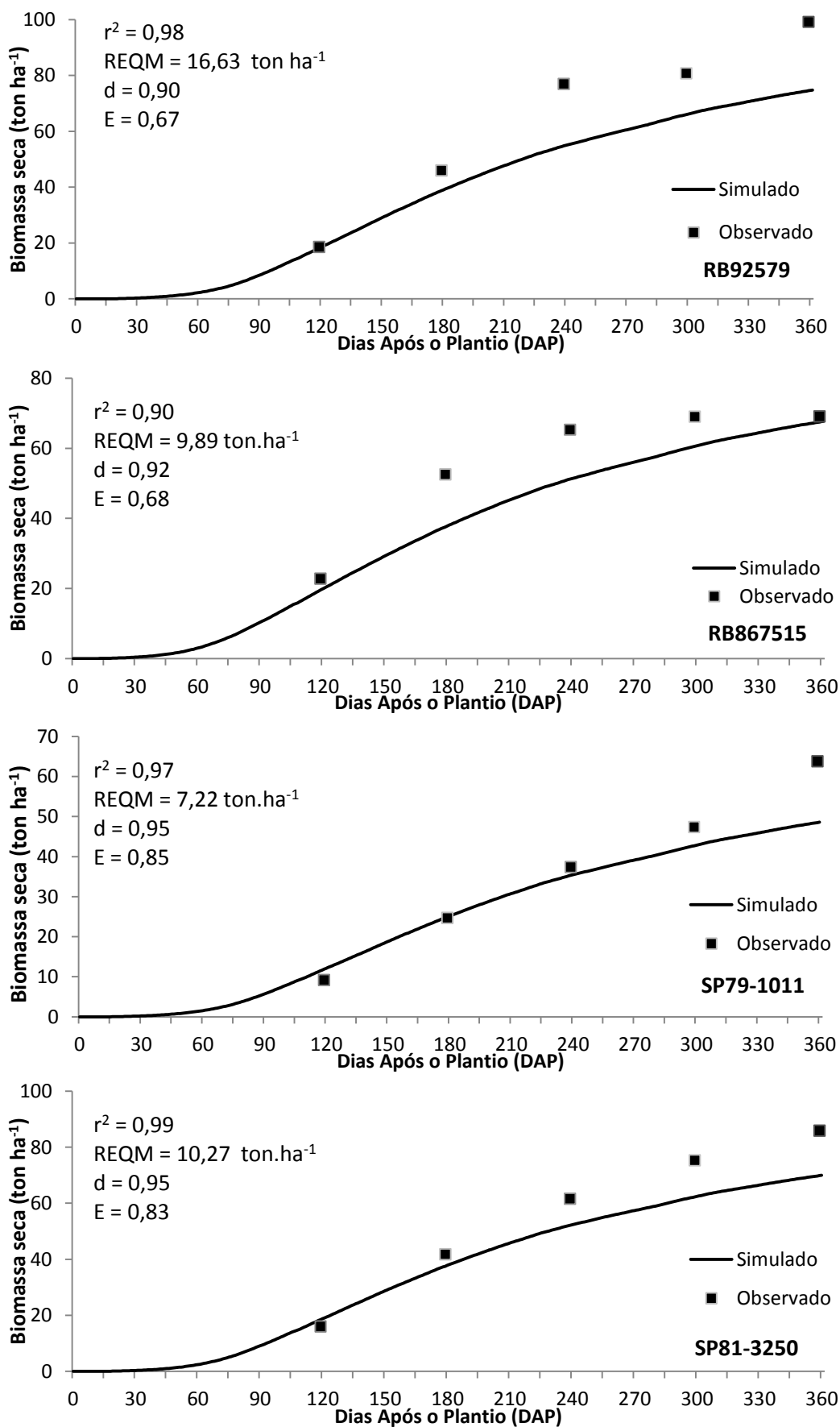


Figura 25 – Biomassa seca medida e simulada das cultivares RB92579, RB867515, SP79-1011 e SP81-3250 no ciclo da cana planta na localidade de Carpina-PE

A melhor simulação para localidade de Carpina foi observada para a cultivar SP79-1011, sendo que o modelo estimou bem a biomassa seca durante o início do ciclo da cultura, com a subestimativa no final do ciclo da cultura, apresentando os menores erros (REQM = 7,22 ton.ha⁻¹). Contudo esta variedade apresentou um alto erro na estimativa final da biomassa (23,8%).

Oliveira (2010) parametrizou e validou o método da zona agroecológica para estimar a produtividade da cultura da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras de Minas Gerais. Na parametrização deste método, o autor observou valores próximos para as simulações do ciclo da cana planta ($r^2 = 0,77$, $d = 0,94$ e REQM = 7,1 ton.ha⁻¹) e da cana soca ($r^2 = 0,89$, $d = 0,95$ e REQM = 8,4 ton.ha⁻¹).

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 REQM de 9,5 ton.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 REQM de 9,8 e 9,6 ton.ha⁻¹, respectivamente para as variedades RB72454 e SP83-2847.

Scarpate (2011) simulando o crescimento da cana-de-açúcar com o modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST encontrou bons valores na simulação da biomassa seca da parte aérea. Na calibração do modelo, para cultivar SP81-3250 o mesmo apresentou melhores resultados para o ciclo da cana planta ($d = 0,97$ e REQM = 5,3 ton.ha⁻¹) em relação a cana soca ($d = 0,91$ e REQM = 5,9 ton.ha⁻¹).

Geerts et al. (2009) realizaram análise de sensibilidade do modelo AquaCrop com a cultura da quinoa. Estes autores observaram que o tempo para cultura atingir a cobertura máxima (CC_x) e a escolha do valor de CC_x deve ocorrer com cuidado, porque o rápido desenvolvimento do dossel induz unidades de transpiração maior e, portanto, resulta em maior produção de biomassa. Analisando a observação dos autores citado. Pôde-se verificar esse comportamento para a cultivar RB867515 quando comparado com a RB92579. Nota-se que o rápido crescimento da cultivar RB867515 (CGC = 6,1%), permite o maior ganho de biomassa em relação a RB92579 (CGC = 5,1%), ou seja, por

possuir um rápido crescimento do dossel, a planta produz maior quantidade de biomassa na fase inicial.

Comparando o acúmulo de biomassa seca entre essas cultivares para localidade de Carpina, foi verificado que o acúmulo de biomassa da cultivar RB867515 foi superior a cultivar RB92579 em 4,2 e 6,4 ton.ha⁻¹ para os dados de coletados aos 120 e 180 DAP, respectivamente. Todavia, após essas datas a biomassa seca da cultivar RB92579 supera a RB867515. Este efeito só foi observado quando houve irrigação, porque na localidade de Coruripe a cultivar RB867515 apresentou valores de biomassa próximos da RB92579. Tal fato pode ter ocorrido porque apesar do rápido crescimento inicial da RB867515, o déficit de água no solo não permitiu o ganho de biomassa superior a RB92579.

O conhecimento deste comportamento permite elaborar estratégias de irrigação para diferentes cultivares. No caso da RB867515, maiores valores de Kc podem ser utilizados mais cedo, ou seja, reduziria a duração do estágio II de crescimento da cultura.

Para todas as cultivares, verifica-se para localidade em questão, que a biomassa seca observada foi superior a simulada na maioria das observações. Uma hipótese para esse maior acúmulo de biomassa foi a maior adubação. Neste estudo, realizou-se a adubação de plantio: 30 kg.ha⁻¹ de N; 120 kg.ha⁻¹ de P₂O₅; e 70 kg.ha⁻¹ de K₂O. Aos 90 DAP realizou-se adubação de cobertura aplicando-se 50 kg.ha⁻¹ de N e 50 kg.ha⁻¹ de K₂O nas linhas de cana-de-açúcar, seguida de incorporação manual. Desta forma, o total de nutrientes aplicados foram 80 kg.ha⁻¹ de N; 120 kg.ha⁻¹ de P₂O₅; e 120 kg.ha⁻¹ de K₂O. Porém, geralmente a adubação de cobertura é realizada até os 60 DAP antes do fechamento do canavial. Além disso, o parcelamento da adubação não é uma prática comumente observada, pois representa operação adicional, o que dificulta o gerenciamento em grandes áreas, além da elevação dos custos finais.

Segundo Franco (2008), na literatura há uma concordância quanto aos efeitos do aumento de N na produção de açúcar, ou seja, o teor de açúcar no colmo diminui com a adubação nitrogenada, porém a quantidade total de açúcar produzido por hectare é maior como decorrência da maior produtividade de TCH (TRIVELIN et al., 2002; BOLOGNA-CAMPBELL, 2007). Apesar da maioria dos trabalhos apresentarem respostas bem heterogêneas para cana planta e relativamente consistentes para cana soca em relação aos efeitos da

adubação nitrogenada. Franco (2008) observou que a cana planta respondeu a diferentes doses de nitrogênio, para duas localidades do estado de São Paulo.

No estudo de Rio Largo, realizou-se uma adubação única no plantio, de 70 kg.ha⁻¹ de N ha, 60 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg.ha⁻¹ de K₂O, verificando que apesar da irrigação não foi possível obter valores tão elevados quanto o da localidade de Carpina, sendo ambos experimentos irrigados. Calheiros et al., (2012) avaliando diferentes dosagens de fósforo para as cultivares RB92579 e RB867515, na localidade de Rio Largo, observaram que para cana planta a dosagem de 90 kg.ha⁻¹ apresentou os melhores resultados de biomassa seca. Calheiros et al. (2011), estudando o ciclo da cana soca (primeira rebrota) para as mesmas cultivares na mesma localidade, observaram que a dose de 60 kg.ha⁻¹ apresentou valores de biomassa seca superiores a 10%.

O aumento da produção de biomassa seca, pode ser explicada pela “Lei dos Mínimos” de Von Liebig (1840). De acordo com “Lei de Liebig”, no crescimento das plantas há resposta ao fator mais limitante até outro fator começar a limitar a resposta da produção. O crescimento é controlado pelo recurso mais escasso e não pela quantidade total de recursos disponíveis. Desta maneira, algumas cultivares mais recentes podem estar recebendo recomendações de adubações de cultivares mais antigas, menos produtivas, sendo o seu crescimento limitado devido a este fator.

Na validação do modelo foram utilizados os dados de Rio Largo, do ciclo da cana planta e cana soca, além dos dados de Campos dos Goytacazes. A simulação da biomassa seca da cana soca, cultivar SP81-3250, foi realizada para o quarto ciclo (3° corte), para localidade de Campos dos Goytacazes, apresentando apenas 280 dias, o que não influenciou na simulação da biomassa. O alto valor do índice de concordância de Willmott ($d = 0,97$) indica uma boa concordância dos dados estimados e observados (Figura 26).

Observa-se também que o modelo AquaCrop apresentou um bom ajuste aos dados observados com boa precisão ($r^2 = 0,92$), explicando 92% da variabilidade dos dados observados em experimentos de campo. O modelo subestimou os valores entre 120 e 230 DAC, superestimando a biomassa no final do ciclo, apresentando erro de 3,43 ton.ha⁻¹ e um erro de estimativa final da biomassa de 8,2%.

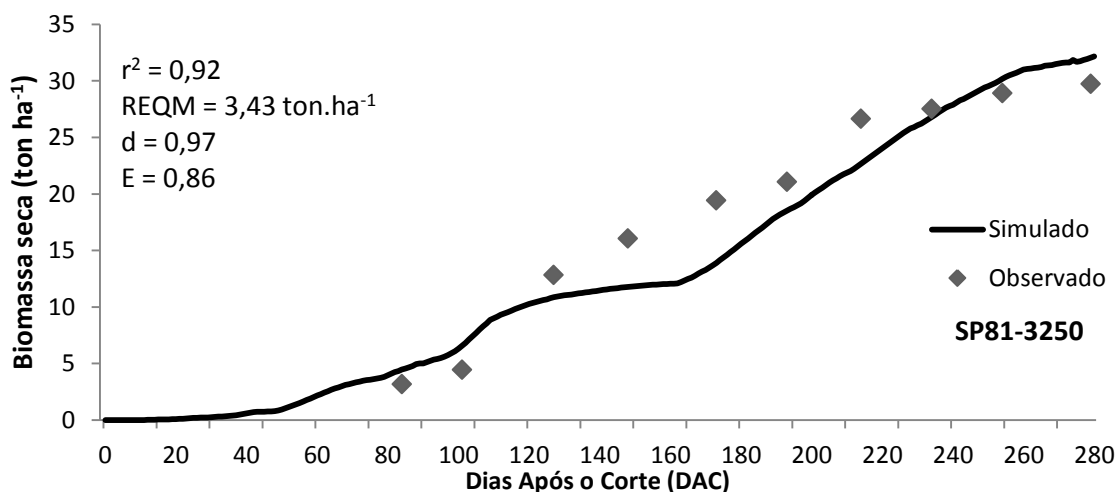


Figura 26 – Biomassa seca observada e simulada na validação da cultivar SP81-3250 no ciclo da cana soca (3º corte) na localidade de Campos dos Goytacazes-RJ

Como não foi coletada a biomassa seca ao longo do ciclo da cultura para a localidade de Rio Largo, realizou-se a validação do modelo comparando os valores de biomassa seca simulada pelo modelo com o valor obtido em campo ao final do ciclo da cana planta e cana soca, para as cultivares RB92579, RB93509, SP79-1011.

A produção final de biomassa seca foi bem simulada pelo modelo para o ciclo da cana planta e cana soca, para ambos os ciclos da cultura, apresentando erros de estimativa final da biomassa de 10,7, 10,9 e 4,16% para o ciclo da cana planta, e 9,2, 3,4 e 4,7% para o ciclo da cana soca, para as cultivares RB92579, RB93509 e SP79-1011, respectivamente. A comparação entre os dados observados e simulados encontram-se na Figura 27.

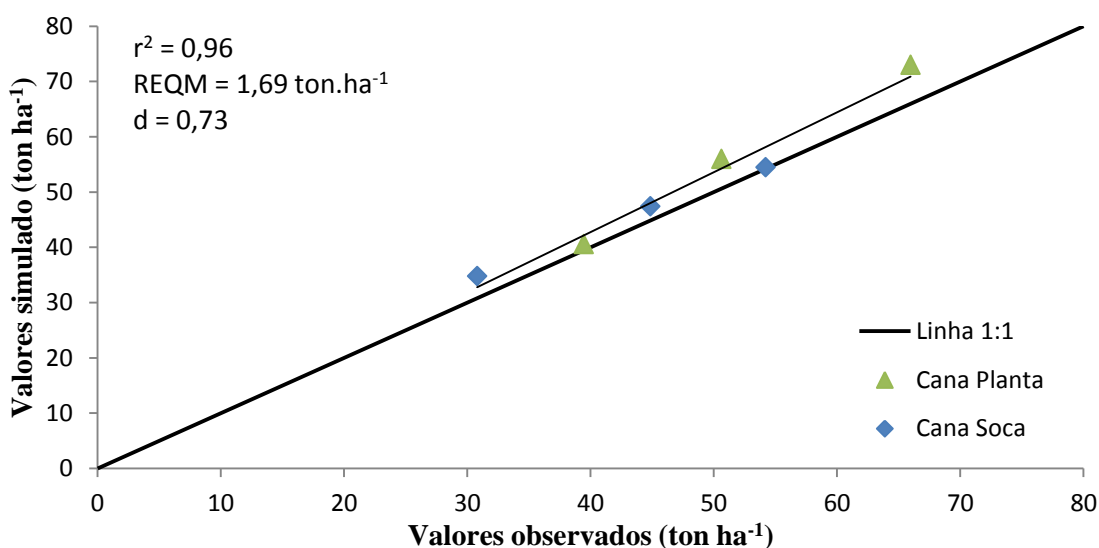


Figura 27 – Relação entre os valores observados e simulados para as cultivares RB92579, SP79-1011 e RB93509 nos ciclos da cana planta e soca, na localidade de Rio Largo-AL

Na localidade de Rio Largo, os maiores valores de produção de colmo por hectare (TCH) foram obtidas para as cultivares RB92579 (168 ton.ha⁻¹), RB93509 (110 ton.ha⁻¹) e SP79-1011 (100 ton.ha⁻¹), respectivamente, tanto no ciclo da cana planta quanto na cana soca. Comportamentos semelhantes também foram observados nos trabalhos de Silva (2007) e Oliveira (2008). Observa-se que o modelo AquaCrop apresentou um bom ajuste aos dados observados, não evidenciando com boa precisão ($r^2 = 0,96$), explicando 96% da variabilidade dos dados observados em experimentos de campo.

Oliveira (2010) validando o método da zona agroecológica com os dados de produtividade observada pelo IBGE, para região do Triângulo Mineiro, observou pequenos erros (REQM = 4,9 ton.ha⁻¹) apesar do fraco desempenho dos índices estatísticos ($r^2 = 0,55$, $d = 0,80$).

Scarpore (2011) validando o modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST para cultura da cana-de-açúcar 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 REQM = 6,4 ton.ha⁻¹) em relação a cana planta ($r^2 = 0,91$, $d = 0,95$ e REQM = 8,8 ton.ha⁻¹).

A simulação da biomassa seca também foi realizada para a cultivar CTC9. Por ser uma cultivar recente e ainda sem muito estudo sobre suas características, estabeleceu-se um coeficiente de crescimento do dossel de 6,1% (CGC) dado a seu rápido crescimento, observado no alto acúmulo de biomassa seca no início do ciclo. Para esta cultivar, a parametrização foi realizada para o tratamento correspondente a 50% da ITN, sendo a validação realizada para os tratamentos de sequeiro e 100% da ITN.

A relação da biomassa seca observada com a simulada e os resultados da parametrização para o tratamento correspondente a 50% da ITN encontram-se na Figura 28.

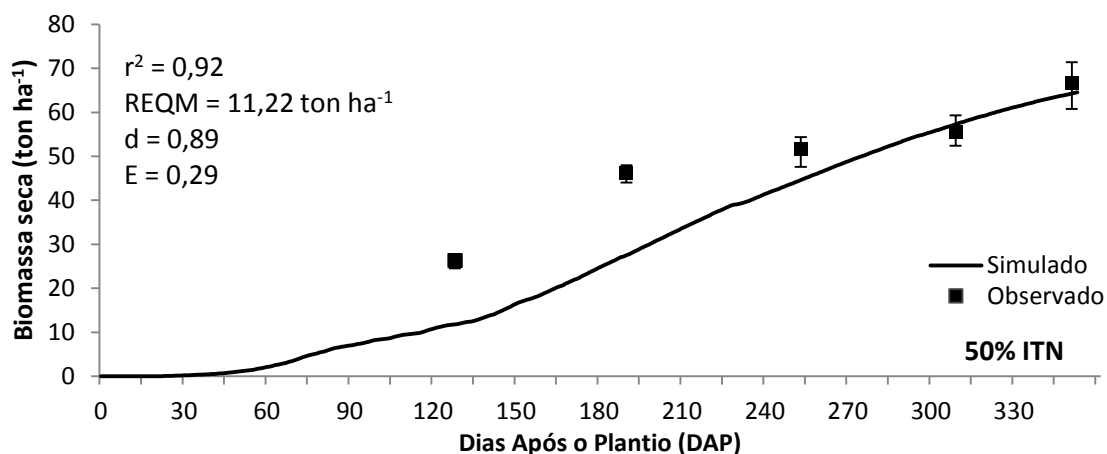


Figura 28 – Biomassa seca observada e simulada na parametrização da cultivar CTC9, no ciclo da cana planta para localidade de Goianésia-GO

Constata-se que o modelo não foi capaz de simular o rápido ganho de biomassa observado pela cultivar CTC9 até os 250 DAP subestimando os valores observados. Analisando o desempenho estatístico do modelo na parametrização da cultivar CTC9 nota-se bons valores dos índices de concordância ($r^2 = 0,92$, $d = 0,89$) porém o elevado erro (REQM = 11,22 ton.ha⁻¹). Este erro decorre do fato da subestimativa do modelo no início do ciclo da cultura. Como não foram coletados dados do IAF, a estimativa da velocidade de crescimento do dossel (CGC) para esta cultivar, ficou incerto. Embora tenha apresentado erros elevado, a estimativa da biomassa final apresentou um erro de 3,2%.

Na Figura 29, encontram-se os gráficos e os resultados da validação da cultivar CTC9, para os tratamento de sequeiro e 100% da ITN, na localidade de Goianésia. Apesar da lâmina de 100 mm aplicada no tratamento de sequeiro, este apresentou valores de biomassa seca (24,1 ton.ha⁻¹) próximo aos obtidos pelo tratamento de 100% da ITN (27,1 ton.ha⁻¹). A última lâmina aplicada no tratamento de sequeiro foi realizada aos 48 DAP, sendo 330 mm a ETo acumulada da última irrigação até o início do período das chuvas (120 DAP), o que mostra a resistência da cultura ao estresse hídrico.

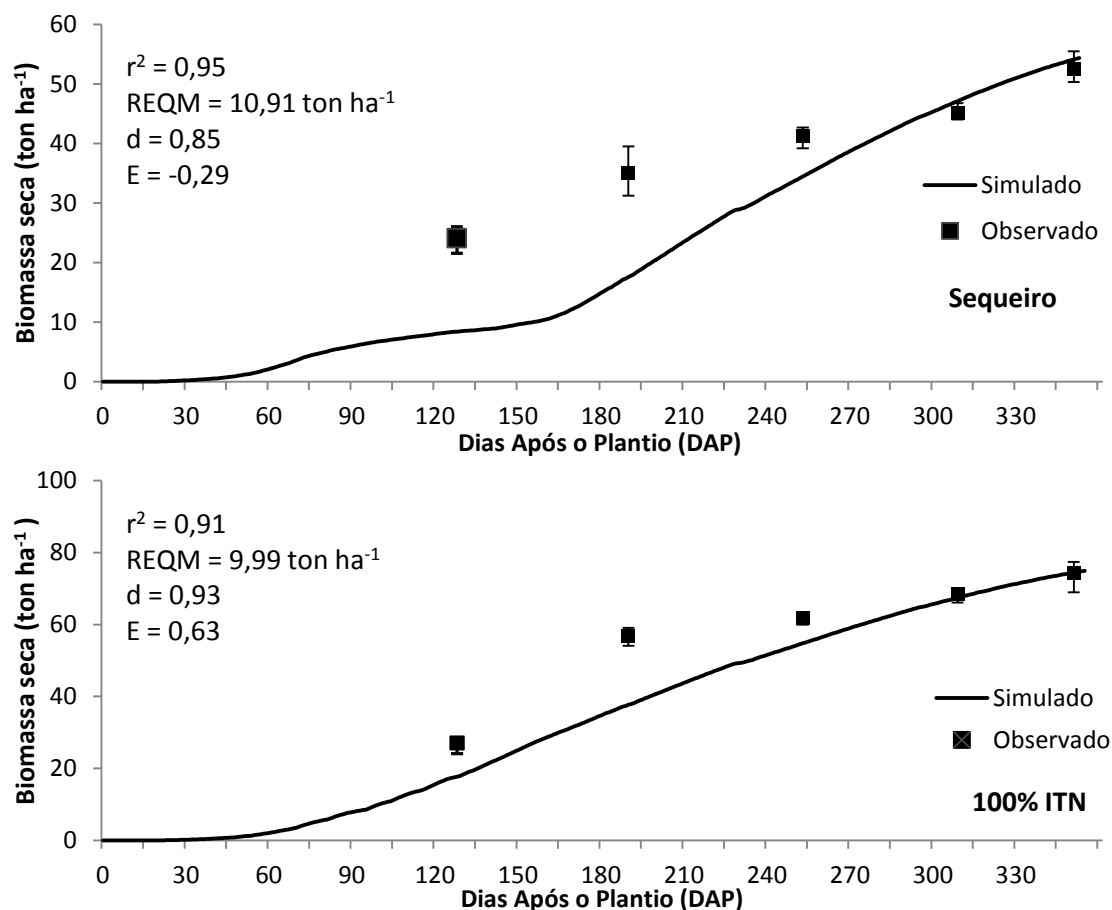


Figura 29 – Biomassa seca observada e simulada na validação da cultivar CTC9, no ciclo da cana planta para localidade de Goianésia-GO

O modelo apresentou o mesmo comportamento observado na parametrização, utilizando o tratamento de 50% da ETc. Mesmo não simulando a CC, o modelo apresentou boa concordância na simulação da biomassa seca, apresentando valores elevados do índice de Willmott (d) e do coeficiente de determinação (r^2), porém nota-se um elevado erro tanto para o tratamento de sequeiro ($REQM = 10,91 \text{ ton.ha}^{-1}$) quanto para o tratamento de 100% da ITN ($REQM = 9,99 \text{ ton.ha}^{-1}$). Em todos tratamentos, em decorrência da subestimativa do modelo das observações iniciais. Apesar dos erros elevados no início da simulação, o modelo tende a se aproximar da biomassa final observada apresentando um erro de estimativa da biomassa final de 3,4 e 0,48% para os tratamentos de sequeiro e 100% da ITN, respectivamente, sendo esta observação de maior interesse prático.

A avaliação do AquaCrop revelou a capacidade de simulação com boa precisão da biomassa seca final, apresentando pequenos erros na estimativa desse parâmetro, para maioria das localidades estudadas, demonstrando ser uma ferramenta promissora para a simulação dos sistemas produtivos

brasileiros, quando adequadamente parametrizado para as cultivares brasileiras de cana-de-açúcar. Desta maneira torna-se possível a utilização do mesmo para estimativa da produção em resposta a necessidade de água, possibilitando o uso do modelo para diferentes condições de regime hídrico.

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, apresentando melhores resultados para a biomassa seca ao final do ciclo.

4.2.3 Índice de Colheita (HI)

Embora o AquaCrop utilize 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 permanecem entre os menos entendidos na fisiologia das culturas e são mais difíceis de modelar. No AquaCrop, a referência do índice de colheita (HI) deve ser fornecida para cada cultura (e cultivar quando tal se justifique). Assim, para a cana-de-açúcar, a quantidade de sacarose (POL da cana) simulada pelo modelo é dada como determinada percentagem da biomassa seca da parte aérea.

O modelo considera os impactos do déficit hídrico tanto no aumento e redução do índice de colheita, dependendo do estágio de desenvolvimento em que ocorre o déficit hídrico e da severidade do estresse. A estrutura do modelo prioriza as culturas de grãos. Assim os efeitos do estresse hídrico são avaliados antes e durante a floração, na fase de produção do produto de interesse (grãos, fruta, sacarose, etc.)

A cana-de-açúcar em função do seu ciclo longo sofre grande influência das variações climáticas durante o ano. Para atingir alta produção de sacarose a planta precisa de temperatura e umidade do ar adequadas para permitir o máximo crescimento na fase vegetativa, seguida de restrição hídrica ou térmica para favorecer o acúmulo da sacarose no colmo na época do corte (INMAN-

BAMBER & SMITH, 2005). Sabendo que a restrição hídrica é um fator fundamental na maturação da cana-de-açúcar, modelar os seus efeitos no índice de colheita é essencial. Porém, o modelo não é capaz de simular o aumento no teor de sacarose, conseqüentemente o aumento do HI, que ocorre na fase final da cultura devido à restrição hídrica, promovendo um aumento na concentração de sacarose.

Desta maneira, na utilização do modelo para cultura da cana-de-açúcar é necessário trabalhar com o valor fixo de HI, o qual representa a produção de sacarose em tonelada por hectare como uma porcentagem da biomassa seca da parte aérea. Estes valores podem ser observados para as diferentes cultivares na Tabela 4.

Tabela 4 – Índice de colheita (%) observado para as algumas cultivares, em diferentes localidades

Localidade	Cultivar				
	RB92579	RB867515	RB93509	SP79-1011	SP81-3250
Coruripe	36,0	37,9	32,7	38,0	-
Carpina	42,7	43,1	-	40,1	43,4
Juazeiro	38,2	-	-	-	-
Rio Largo *	44,1	-	34,9	39,8	-

*Trabalho realizado por Costa (2009), para o quarto ciclo de cultivo.

Na localidade de Goianésia, a cultivar CTC9 não apresentou muita diferença no índice de colheita, sendo de 36,9; 36,4 e 38,5% para os tratamentos de sequeiro, irrigado a 50% da ITN e a 100% da ITN, respectivamente, observando que o estresse hídrico não influenciou no HI.

Na literatura não há muitos trabalhos avaliando diretamente os impactos de diferentes fatores no índice de colheita da cana de açúcar. Geralmente são avaliadas a produtividade junto com a qualidade do caldo.

Uribe (2010) avaliou a produtividade e o acúmulo de biomassa no terceiro ciclo produtivo (segunda soqueira) da cultivar SP80-3280, irrigada por gotejamento subsuperficial com diferentes doses de N-fertilizante, na localidade de Jaú/SP. Neste estudo observou-se que o índice de colheita não variou muito, sendo maior (36,1%) para o tratamento irrigado com dose de 140 kg.ha⁻¹ e menor (34%) para o tratamento sem irrigação e sem fertilizante nitrogenado, apesar de observadas diferenças de biomassa e POL nos diferentes tratamentos.

Calheiros et al. (2012) e Calheiros et al. (2011) avaliaram diferentes doses de fósforo para as cultivares RB92579 e RB867515 para o ciclo da cana planta e cana soca, respectivamente, na localidade de Rio Largo. Estes pesquisadores observaram que o ciclo da cana planta apresentou maiores valores de HI, média de 37,5 e 38,6% para as cultivares RB867515 e RB92579, respectivamente (CALHEIROS et al., 2012). No ciclo da cana soca a média do HI foi de 27 e 26,3% para as cultivares RB867515 e RB92579, respectivamente (CALHEIROS et al., 2011).

Mendes (2006) estudou a eficiência nutricional de algumas cultivares de cana-de-açúcar nos ciclos da cana planta e soca, na localidade de Mercês na Zona da Mata Mineira e observou valores elevados de HI para o ciclo da cana planta 50%, 51,8%, 55,5% e 45,7% e valores menores para o ciclo da cana soca 40,2%, 43,1%, 42,8% e 43,7%, para as cultivares RB867515, RB855536, RB928064 e SP80-3280, respectivamente.

Vieira (2012) avaliou o uso racional da água na cultura da cana-de-açúcar para o Norte de Minas Gerais. No qual estabeleceu diferentes valores para o fator de disponibilidade hídrica (0,3, 0,5, 0,7 e 0,9) para cultivar RB867515, obtendo valores de HI semelhantes para os diferentes tratamentos (41, 40, 42 e 42%), respectivamente. Neste mesmo trabalho, o autor avaliou diferentes lâminas de irrigação, baseado em 25, 50, 75, 100, 125 e 150% da evapotranspiração da cultura (ETc). Todavia, o HI variou de 38 a 42%, sendo o menor valor observado para os tratamentos de 25% e 100 % da ETc, e o maior para o tratamento de 75%.

Observa-se que não há um padrão de comportamento entre a biomassa seca e quantidade de sacarose, esses valores variam entre cultivares, para diferentes doses de fertilizantes, constatando a redução do HI do ciclo da cana planta para cana soca.

O AquaCrop foi concebido para realizar a simulação de diferentes tipos de culturas. Na cultura de grãos, a produção tem uma relação intrínseca com a biomassa seca produzida pela cultura, todavia, essa relação não é tão direta para cultura da cana-de-açúcar. Esse aspecto revela a oportunidade de aprimoramento no algoritmo responsável pela simulação da quantidade de sacarose produzida.

Desta maneira, pode-se adotar alguns índices para realizar a conversão da biomassa seca da parte aérea em TCH, e posteriormente em quantidade de

sacarose (POL). De acordo com os dados observados, a massa seca da parte aérea (colmos %, ponteiros % e folhas secas %) para as cultivares RB92579, RB93509, RB867515, SP79-1011 e SP81-3250, representa 75% da massa seca colhida por colmos e 25% de folhas secas e ponteiros (trash). Para a cultivar CTC9, cerca de 83% da massa seca colhida é representada por colmos e 17% de trash, sendo a umidade média dos colmos de 72%.

A simulação da quantidade de sacarose seria a maior desvantagem do modelo, já que a predição deste é de grande importância. Neste quesito, os modelos DSSAT/CANEGRO e o APSIM são mais representativos já que os grandes números de parâmetros permitem a simulação do fenômeno de acúmulo de sacarose pela cultura.

4.3 Eficiência de uso da água

Os valores de evapotranspiração, evaporação e transpiração simulados pelo modelo e os valores de eficiência de uso da água (EUA) calculada em relação a biomassa seca produzida nas diversas localidades, estão apresentados na Tabela 5. Na literatura, o cálculo da EUA leva em consideração a produção de colmos (TCH), sendo que os valores de EUA divergem quando são considerados diferentes denominadores (ET, P+I, I) no cálculo da mesma.

Os valores elevados de EUA para cultivar RB92579 (5,06 - 7,59 kg m⁻³) se devem em grande parte a maior quantidade de biomassa produzida por esta cultivar em relação as outras. Os valores de EUA-ET tendem apresentar valores mais próximos para as localidades de Coruripe, Rio Largo e Juazeiro, porém apresentam valores bem elevados para a localidade de Carpina, que apresentou elevada produção de biomassa.

Ghiberto et al. (2011) avaliaram os componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar (cultivar SP81-3250) na localidade Jaboticabal, sem irrigação. Estes autores observaram que a adubação nitrogenada não se traduziu num uso diferenciado de água pela cana-de-açúcar no ciclo da cana soca, visto que a eficiência do uso da água (razão entre a produção de colmo e a ET da cultura) no tratamento sem adubação foi de 13,1 kg.m⁻³; 14,6 kg.m⁻³ para o tratamento com dose de 100 kg de N e 114 kg.ha⁻¹ de enxofre e 12,5 kg.m⁻³ para o tratamento com dose de 150 kg de N e 172 kg.ha⁻¹ de enxofre.

Tabela 5 – Valores de evaporação, transpiração evapotranspiração simulados pelo modelo AquaCrop para as diferentes cultivares estudadas em diversas localidades e eficiência de uso da água

Localidade	Cultivar	Biomassa seca ton.ha ⁻¹	TCH ton.ha ⁻¹	P mm	I mm	E mm	T mm	ET mm	EUA- ET kg.m ⁻³	EUA* - ET kg.m ⁻³	EUA- P+I kg m ⁻³	EUA* - P+I kg.m ⁻³	EUA-I kg.m ⁻³	EUA* -I kg.m ⁻³	
Coruripe	RB92579	30,0	84,1			250	333	583	5,15	14,43	1,86	5,21	-	-	
	RB867515	23,1	73,0	1614	-	235	316	551	4,19	13,25	1,43	4,52	-	-	
	RB93509	24,9	68,6			240	323	595	4,18	11,53	1,54	4,25	-	-	
	SP79-1011	21,5	60,3			261	334	595	3,61	10,13	1,33	3,73	-	-	
Rio Largo Cana Planta	RB92579	66,0	167,9			290	950	1240	5,32	13,54	2,44	6,21	11,28	28,70	
	RB93509	50,6	110,3	2120	585	300	927	1227	4,13	8,99	1,87	4,08	8,65	18,85	
	SP79-1011	39,5	100,6			321	933	1254	3,15	8,02	1,46	3,72	6,75	17,19	
Rio Largo Cana Soca	RB92579	54,2	136,2			255	820	1075	5,04	12,67	2,70	6,78	10,04	25,23	
	RB93509	44,8	115,6	1468	540	272	810	1082	4,14	10,68	2,23	5,75	8,30	21,40	
	SP79-1011	30,8	83,2			304	709	1013	3,04	8,22	1,53	4,14	5,70	15,41	
Juazeiro	RB92579	66,5	161,7	571	2514	200	1337	1537	4,33	10,52	2,16	5,24	2,65	6,43	
Carpina	RB92579	99,7	255,6			220	1069	1289	7,73	19,83	5,05	12,96	11,91	30,54	
	RB867515	69,1	186,1	1136	837	202	1025	1227	5,63	15,17	3,50	9,43	8,26	22,23	
	SP81-3250	85,9	232,5			197	1055	1252	6,86	18,57	4,35	11,79	10,26	27,78	
	SP79-1011	63,8	155,1			263	1038	1301	4,90	11,92	3,23	7,86	7,62	18,52	
Campos dos Goytacazes	SP81-3250	29,8	-	745	90	306	467	773	3,85	-	3,56	-	5,09	-	
Goianésia	CTC9 Sequeiro	52,4	138,3			100	188	689	877	5,97	15,77	4,35	11,49	52,40	138,30
	CTC9 50% ITN	66,6	176,5	1104	356	173	828	1001	6,65	17,63	4,56	12,09	18,71	49,58	
	CTC9 100% ITN	74,2	203,3			668	131	997	1128	6,58	18,02	4,19	11,47	11,11	30,43

P – Precipitação, I – Irrigação, E – Evaporação, T – Transpiração, ET – Evapotranspiração, EUA-ET – Eficiência de uso da água considerando a água perdida por evapotranspiração, EUA-P+I – Eficiência de uso da água considerando a água aplicada via irrigação e precipitação, EUA-I – Eficiência de uso da água da irrigação, EUA* - eficiência de uso da água considerando a produção de colmo (TCH)

Brito (2009) avaliaram o balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada, para a cultivar SP81-3250 em duas localidades do estado de São Paulo, sem irrigação. Estes autores verificaram que EUA^*ET no tratamento sem adubação foi de $13,7 \text{ kg.m}^{-3}$; e no tratamento com dose de 120 kg.ha^{-1} , foi $14,2 \text{ kg.m}^{-3}$, em Jaboticabal, e em Pirassununga, a ET total média foi de $1.067,1 \text{ mm}$, com produtividade média de $141,25 \text{ ton.ha}^{-1}$, apresentando, a EUA^*-ET de $13,26 \text{ kg m}^{-3}$.

Olivier e Singels (2003) avaliando a eficiência do uso da água da cana-de-açúcar irrigada em função do espaçamento e da cultivar, observaram valores de EUA^*-ET variando entre $12,4$ a $18,4 \text{ kg.m}^{-3}$. Neste estudo os autores avaliaram a utilização do espaçamento duplo de $0,4$, $0,6$ e $0,9 \text{ m}$ por $1,8 \text{ m}$, associado a diferentes lâminas de irrigação. Estes autores constataram que a EUA^*-ET foi menor para o tratamento com irrigação correspondente à 100% da ETc e espaçamento menores ($13,1 \text{ kg.m}^{-3}$) seguido do tratamento com déficit ($17,2 \text{ kg.m}^{-3}$) em que foi considerado uma irrigação correspondente a 50% da ETc , seguido do tratamento de 25% ETc e aumentando para 50% da ETc após 6 meses ($17,3 \text{ kg.m}^{-3}$). O espaçamento duplo de $0,9 \text{ m}$ por $1,8 \text{ m}$ proporcionou os maiores valores de EUA^*-ET no tratamento com irrigação correspondente à 100% da ETc ($13,7 \text{ kg.m}^{-3}$), no tratamento com 50% da ETc o espaçamento duplo de $0,6 \text{ m}$ por $1,8 \text{ m}$ forneceu a EUA^*-ET de $17,7 \text{ kg.m}^{-3}$, e no tratamento com 25% da ETc o espaçamento duplo de $0,9 \text{ m}$ por $1,8 \text{ m}$ forneceu a EUA^*-ET de $18,4 \text{ kg.m}^{-3}$.

No segundo experimento, os autores avaliaram a EUA^*-ET para três cultivares (N25, N22 e N14) utilizando espaçamento simples de $1,5 \text{ m}$. Neste experimento os maiores valores EUA^*-ET foram obtidos para o tratamento com déficit de 50% da ETc , que variou entre $10,4$ e 14 kg.m^{-3} e o tratamento com irrigação plena a EUA^*-ET variou entre $9,4$ e $10,3 \text{ kg.m}^{-3}$ (OLIVIER & SINGELS, 2003).

Inman-Bamber & Smith (2005) relataram pesquisas desenvolvidas com o objetivo de estudar a EUA da cana-de-açúcar em diferentes regiões do mundo, utilizando métodos variados e medidas climáticas e fisiológicas, mostrando que a EUA variou de $8,37$ a $20,94 \text{ kg.m}^{-3}$ na Austrália (KINGSTON, 1994) e $4,8$ a $12,1 \text{ kg.m}^{-3}$ na África do Sul, Hawaii e Austrália (ROBERTSON & MUCHOW, 1994).

Os valores encontrados no presente trabalho fornecem a magnitude dos valores da EUA, porém a evapotranspiração da cultura não foi medida em campo, foi simplesmente estimada pelo modelo AquaCrop, podendo vir ocasionar alguns erros, apesar dos valores serem coerentes com os observados pelos trabalhos de Olivier e Singels (2003), Brito (2009) e Ghiberto et al. (2011).

O uso do valor da lâmina de irrigação no cálculo da EUA pode levar a valores fora dos padrões, como o observado para a cultivar CTC9 no tratamento de sequeiro (52,4 e 138 kg.m⁻³), nestes casos a EUA-I não é indicada. Porém para produtores este índice está intimamente relacionado com a eficiência da irrigação e a rentabilidade. O uso da precipitação também pode levar a erros no cálculo da EUA, já que a precipitação de alta intensidade pode gerar escoamento superficial e percolação. Assim, o uso da precipitação efetiva seria mais correto no uso desta variável no cálculo.

Devido a maior velocidade de crescimento, as cultivares RB867515 e SP81-3250 apresentam menores valores de evaporação, já que sombreiam o solo com maior velocidade que as outras cultivares reduzindo as perdas de água por evaporação.

Maschio (2011), avaliando a produtividade da água para 24 cultivares de cana-de-açúcar, em casa de vegetação, calculou a EUA para a biomassa seca da parte aérea utilizando a lâmina de irrigação aplicada. Este autor constatou que a cultivar SP81-3250 apresentou a maior eficiência (10,97 kg.m⁻³) seguidos das cultivares RB92589 (10,10 kg.m⁻³), RB867515 (9,71 kg.m⁻³) e SP79-1011 (9,27 kg.m⁻³).

Erickson et al. (2012) avaliaram a EUA em relação a biomassa seca (EUA-ET) de três culturas voltadas para produção de bioenergia, no norte da Florida (USA). Estes autores observaram valores de 3,35 e 3,96 kg.m⁻³ para o ciclo da cana planta e soca, respectivamente, tendo o capim elefante apresentado a maior eficiência de uso da água (4,57).

Olivier et al. (2012) avaliaram a eficiência do uso da água e a tolerância à seca da cana de açúcar para produção de bioenergia e observaram que a EUA média em relação a biomassa seca produzida ao longo do ciclo da cultura, foi maior para o tratamento com irrigação correspondente à 50% da ITN (8,13 kg.m⁻³) quando comparado ao tratamento correspondente à 100% da ITN (6,9 kg.m⁻³).

Da Silva et al. (2013) avaliaram a necessidade e a eficiência de uso da água para a cultivar RB92579 (2^o soca), ao final observaram que o tratamento com irrigação correspondente a 100% da ETo apresentou a maior eficiência de uso da água (8,3 kg.m⁻³) seguido dos tratamentos com irrigação correspondente a 75% da ETo (7,6 kg.m⁻³), 50% (7,3 kg.m⁻³) e 25% (5,6 kg.m⁻³).

Para a cultivar CTC9, nota-se que a evapotranspiração foi influenciada por diferentes lâminas de irrigação, sendo que a mesma aumentou com o aumento da água aplicada. No entanto, observou-se que o déficit hídrico resultou em maior eficiência no uso da água para o tratamento com reposição de 50% da ETc, em parte porque houve menor evapotranspiração resultando na menor produção de biomassa. Este tratamento resultou nos maiores valores de eficiência de uso da água calculados.

O modelo AquaCrop considera a superfície transpirante, desta maneira, a cobertura do solo pelo dossel verde tem papel fundamental na simulação. Como não foi observado medidas da cobertura do solo pelo dossel, o alto valor de EUA-ET para o tratamento de sequeiro pode estar superestimada, uma vez que a ET simulada pelo modelo pode ter sido inferior à ocorrida no campo.

Na Figura 30 encontram-se a biomassa seca obtida ao longo do ciclo da cultura pela evapotranspiração acumulada que foi simulada pelo modelo. O coeficiente angular fornece a EUA-ET, que nesse caso foi maior para o tratamento de 100% da ITN (5,88 kg.m⁻³), seguido do tratamento de 50% da ITN (4,80 kg.m⁻³) e do sequeiro (3,92 kg.m⁻³). Este comportamento concorda com a função de produção, em que a produção aumenta com o aumento da aplicação de água. Os valores de EUA-ET apresentados na Tabela 5, correspondem a produção de biomassa final enquanto o valor do coeficiente angular da reta do gráfico representa uma média da EUA-ET ao longo do ciclo da cultura, para os diferentes tratamentos.

A boa simulação da evapotranspiração (ET) e o seu particionamento em transpiração (Tr) e evaporação (E) é importante para a predição da biomassa, dado que a biomassa diária está diretamente ligada ao valor de WP calibrado. A água perdida pela evaporação não é utilizada no processo de produção de biomassa, porém particionar o consumo de água da planta é complicado. No cálculo da WP, que relaciona a biomassa seca com a transpiração normalizada, utilizou-se os dados de transpiração provenientes da simulação do AquaCrop para o cálculo da WP.

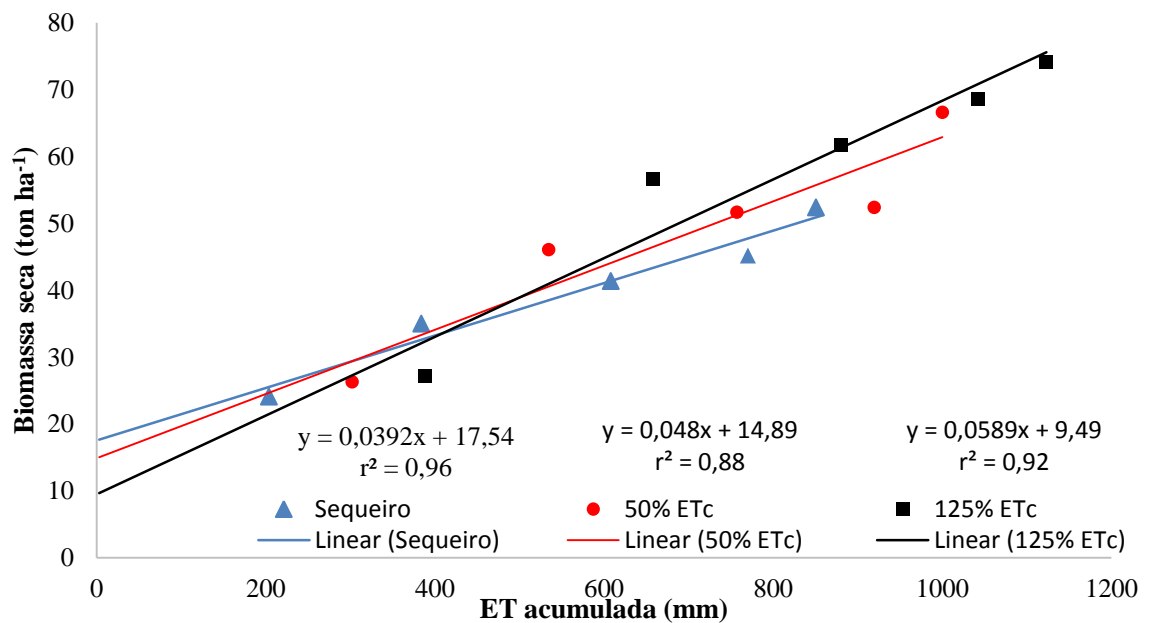


Figura 30 – Relação entre a biomassa seca da parte aérea ao longo do ciclo da cultura com a evapotranspiração acumulada (ET) para diferentes regimes hídricos

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 relação entre a biomassa seca da parte aérea com a transpiração simulada pelo modelo para as cultivares RB92579, RB867515, SP81-3250 e SP79-1011, para localidade de Carpina, encontra-se na Figura 31.

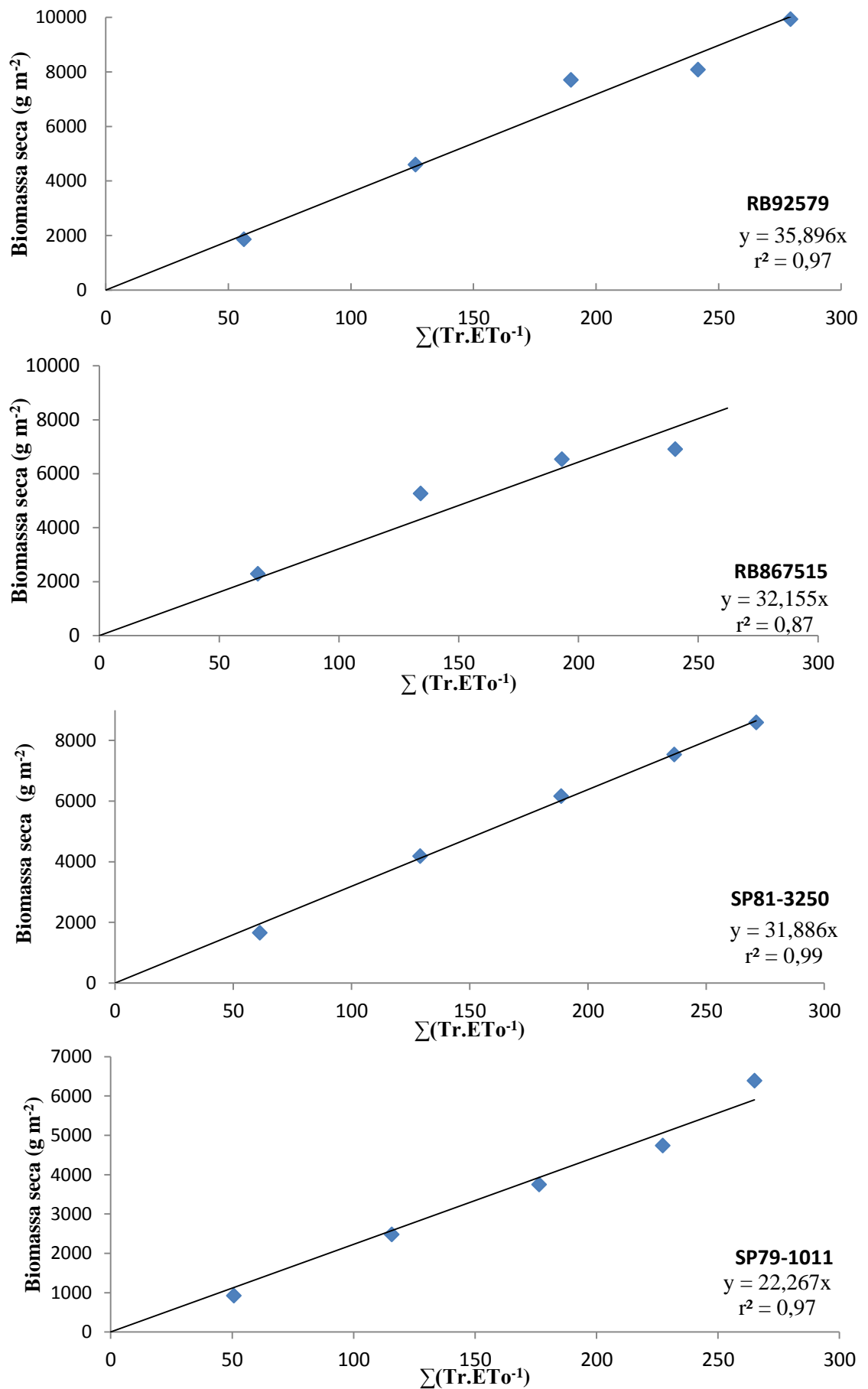


Figura 31 – Relação entre a biomassa seca da parte aérea e a transpiração normalizada para as cultivares RB92579, RB867515, SP81-3250 e SP79-1011 para localidade de Carpina-PE

A mesma relação, para localidade de Coruripe, Juazeiro, Campos dos Goytacazes e Goianésia, encontram-se nas Figuras 32, 33, 34 e 35, respectivamente. O coeficiente de angular da regressão fornece os valores da WP em grama por metro quadrado por milímetro transpirado ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$).

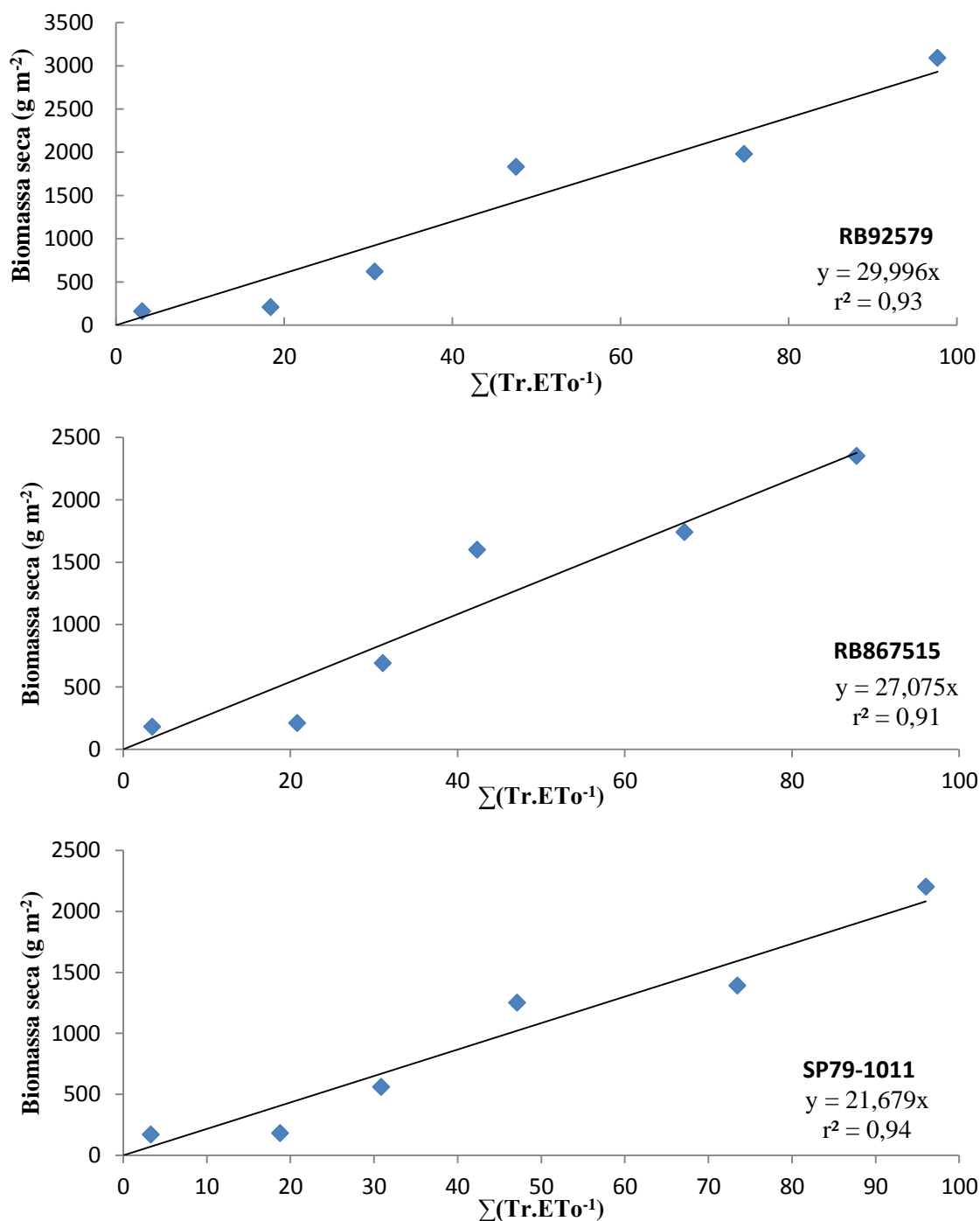


Figura 32 – Relação entre a biomassa seca da parte aérea e a transpiração normalizada para a cultivares RB92579, RB867515, e SP79-1011 para localidade de Coruripe-AL

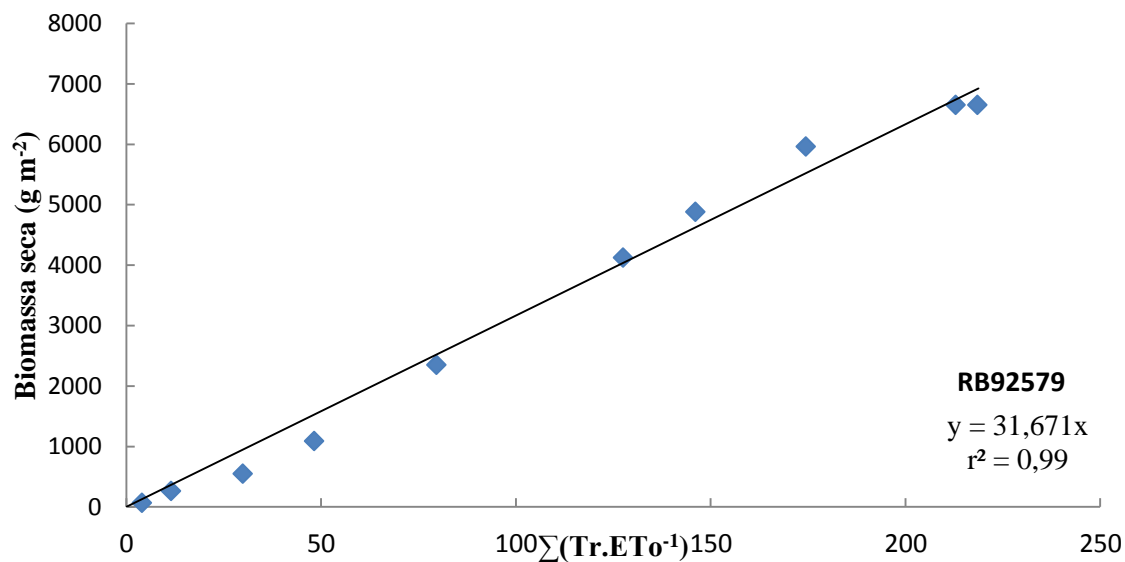


Figura 33 – Relação entre a biomassa seca da parte aérea e a transpiração normalizada para a cultivar RB92579 para localidade de Juazeiro-BA

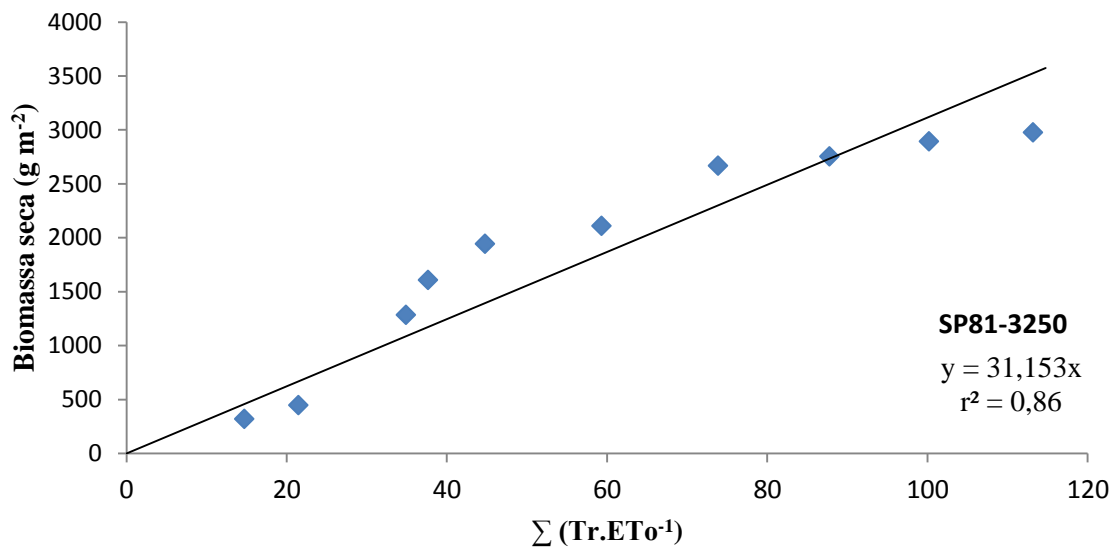


Figura 34 – Relação entre a biomassa seca da parte aérea e a transpiração normalizada para a cultivar SP81-3250 para localidade de Campos dos Goytacazes-RJ

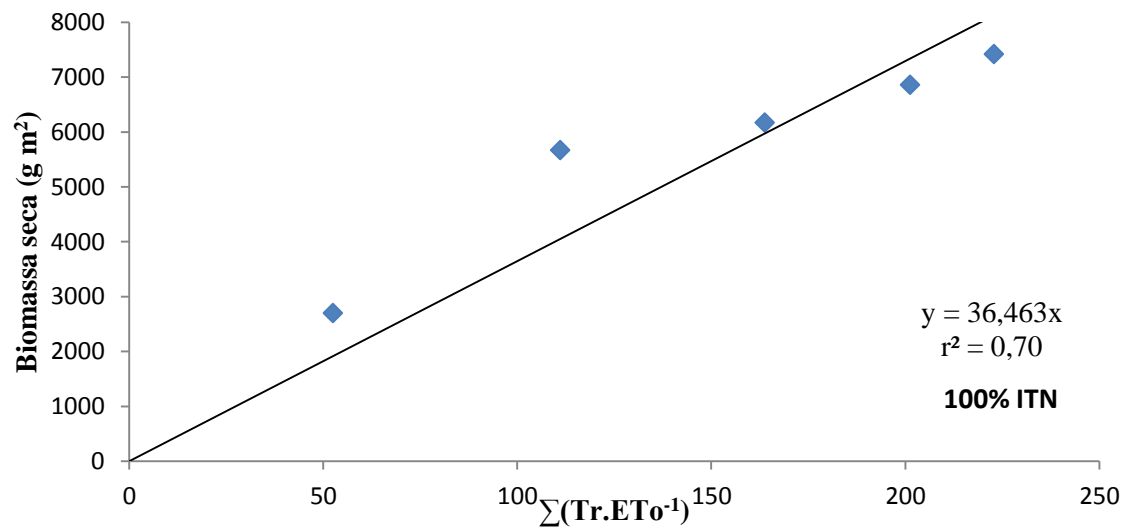
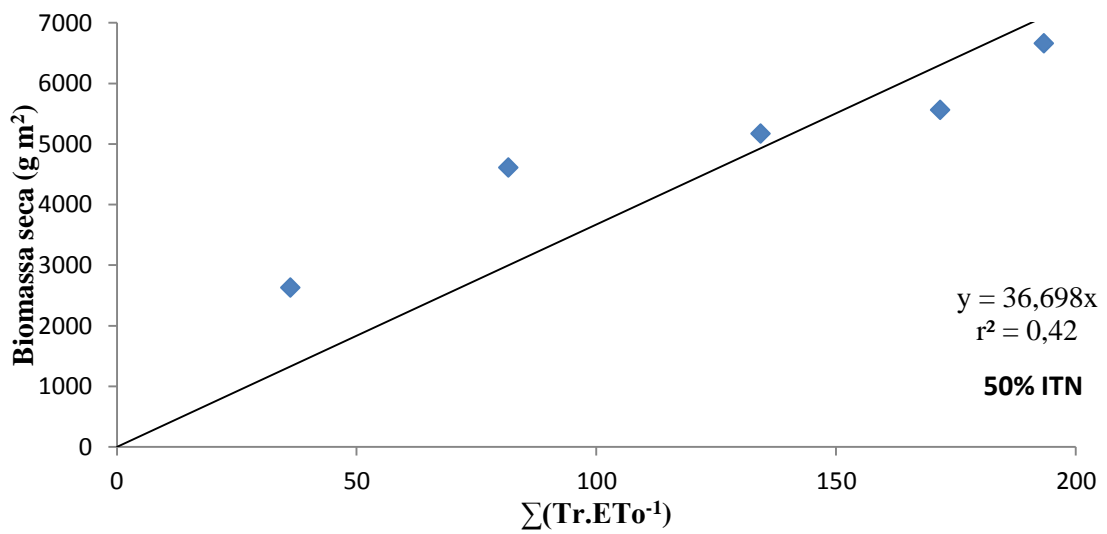
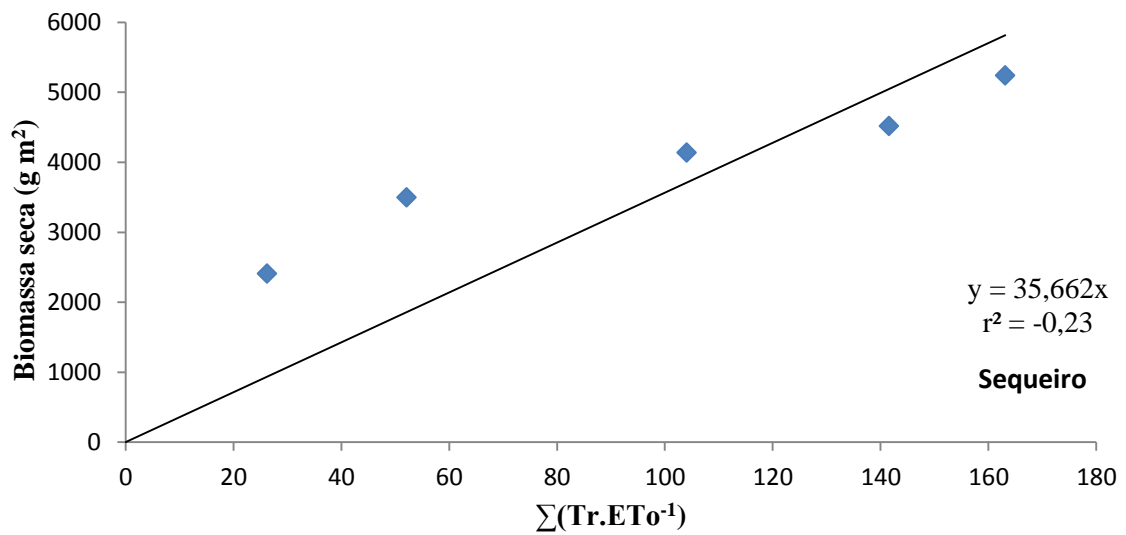


Figura 35 – Relação entre a biomassa seca da parte aérea e a transpiração normalizada para a cultivar CTC9 em diferentes regimes hídrico para localidade de Goianésia-GO

Segundo Hsiao et al. (2009), os parâmetros conservativos são aplicáveis a uma ampla faixa de condições e não são específicos para uma cultivar, ressaltando que há certamente algumas diferenças entre cultivares. Estes

autores salientam que essas diferenças são geralmente pequenas e espera-se que os parâmetros conservativos da cultura, possa ser amplamente aplicável sem calibração para cada cultivar.

Na Tabela 6 encontram-se os valores de produtividade da água (WP) e CGC utilizados na parametrização e validação das cultivares estudadas.

Tabela 6 - Valores de produtividade da água (WP) e do coeficiente de crescimento do dossel (CGC) utilizados na parametrização e validação de todas cultivares

Cultivar	WP (g.m² mm⁻¹)	CGC (%)
CTC9	36	6,1
RB 92579	33	5,1
SP81-3250	32	5,6
RB867515	31	6,1
RB93509	31	5,6
SP79-1011	22	5,1

Observa-se nas Figuras 32 a 35 que o valor de WP variou de 27 a 36,6 g.m⁻² para as cultivares RB92579, RB867515, SP81-3250 e CTC9. O valor da WP foi de 35 g.m⁻² utilizado para a parametrização e validação da cultivar CTC9, que encontra-se na faixa sugerida para o AquaCrop para culturas C4 (ou seja, culturas que produzem o ácido oxalacético com quatro carbonos na primeira etapa da fotossíntese) que varia de 30 a 35 g.m⁻². Os maiores valores encontrados para as localidades de Carpina e Goianésia, sugerem que nestes experimentos a WP foi superior, já que não houve limitação de nutrientes.

A cana-de-açúcar sendo uma cultura C4 apresenta valores dentro da faixa esperada, e o valor calibrado condizente com os dados experimentais. Hsiao et al. (2009) parametrizaram o modelo AquaCrop para a cultura do milho, e calibraram com o valor de 33 g.m⁻², tendo encontrado valores de WP entre 30,3 e 33,2 g.m⁻².

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. Nota-se que na localidade de Coruripe, que apresentou um forte estresse hídrico, os valores de WP aproximaram do esperado para as culturas C4. Além disso, os resultados ruins na simulação da CC para localidade de Coruripe, acabam influenciando diretamente na transpiração simulada pelo modelo e conseqüentemente na obtenção da WP.

Nota-se que para a localidade de Carpina foram obtidos valores mais elevados de WP (31 - 35,8 g.m⁻²). Esse comportamento sugere que os valores obtidos para outras localidades podem ter sido obtidos em condições de limitação de nutrientes. Observa-se que para a cultivar SP79-1011, os valores de WP foram bem inferiores (21 g.m⁻²) aos obtidos por outras cultivares, o que acaba contradizendo a premissa proposta por Hsiao et al. (2009), de que diferenças da WP são geralmente pequenas e espera-se que os parâmetros conservativos da cultura possam ser aplicáveis para a maioria das cultivares.

Por ser uma cultivar mais antiga (1979) em relação as outras cultivares este valor pode ser condizente, caso contrário pode-se observar para a cultivar CTC9, lançada em 2006, que apresenta valores de WP superiores as outras cultivares, o que provavelmente se deve ao melhoramento genético. Porém, com o lançamento das novas cultivares, esse valor tende a ser maior para as novas cultivares Neste sentido, Scarpare (2011) simulando o crescimento da cana-de-açúcar com o modelo SWAP/WOFOST, relata que as cultivares brasileiras têm maior capacidade de produção bruta de matéria seca que as variedades normalmente utilizadas na África do Sul.

Além disso, os resultados confirmam a hipótese de que os maiores valores de produtividade da água (WP) seriam para os tratamentos sem estresse hídrico ou nutricional, e os menores valores de WP para condições com estresse mais severo e limitação de nutrientes.

5. CONCLUSÕES

De acordo com as observações ao longo do trabalho, conclui-se que a utilização do modelo AquaCrop para a simulação do crescimento de diferentes cultivares da cultura cana-de-açúcar para os ciclos cana planta e soca foi bem sucedida. Tanto na parametrização como na validação do modelo os índices estatísticos utilizados apresentaram valores compatíveis com resultados por outros autores que utilizaram outros modelos.

A avaliação do modelo AquaCrop mostra que o mesmo foi capaz de simular com boa precisão a biomassa seca final, apresentando pequenos erros na estimativa, para localidades estudadas, exceto para Carpina, porém apresentou erros elevados na simulação da cobertura do solo pelo dossel.

Uma limitação do modelo é que o mesmo não fornece a produção de colmo (TCH), assim é necessário a utilização de índices de umidade e particionamento da biomassa para a conversão da biomassa seca total em TCH.

A produção de sacarose simulada pelo modelo, não considera as interações com o clima e conseqüentemente os efeitos deste no aumento da POL da cana, principalmente na fase de maturação da cultura, assim o modelo não simula bem a produção de sacarose, para todas as cultivares.

De acordo com as observações, é provável que haja uma variação nos valores de WP entre cultivares, o que contradiz a premissa dos autores do modelo, de que os parâmetros conservativos podem ser aplicados a uma gama cultivares.

O modelo foi capaz de prever as respostas de rendimento da cana-de-açúcar à restrição de água, tornando-se uma ferramenta no estudo de EUA.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOYAMI, Y.A., Effect of soil type and crop cycle on root development and distribution pattern of a commercial sugarcane cultivar under normal irrigation and field conditions at Bacita Estate, Nigeria. **Turrialba** v.39, p. 78–84, 1989.

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

ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; BARBOSA, J.V.S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Desenvolvimento Vegetativo e Produção de Cultivares de Cana-de-Açúcar em Relação à Disponibilidade Hídrica e Unidades Térmicas. **Ciência agrotécnica**, v. 32, n. 5, pp. 1441-1448, 2008.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil:2013**: Ed. Especial. Brasília: Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/ANA_Conjuntura_Recurso_s_Hidricos_Brasil/ANA_Conjuntura_Recurso_s_Hidricos_Brasil_2013_Final.pdf > Acesso em: 30 maio 2014. ANA.

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.

ARGENTON, P.E. **Influências das variáveis edafoclimáticas e de manejo no rendimento de cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Piracicaba, São Paulo**. 2006. 109 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

AZEVEDO, H. M. **Resposta da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e de adubação de cobertura nos tabuleiros da Paraíba**. 2002. 112 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2002.

- AZEVEDO, M.C.B. DE, CHOPART, J.L., MEDINA, C. DE C. Sugarcane root length density and distribution from root intersection counting on a trench profile. **Scientia Agricola**. n. 68, p. 94-101, 2011.
- BALL-COELHO, B., SAMPAIO, E.V.S.B., TIESSEN, H., STEWART, J.W.B. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. **Plant Soil**. V.142, pp. 297–305. 1992.
- BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico na cana-de-açúcar (*saccharum spp*)**. 82p. Dissertação (Mestrado em estatísticas e experimentos) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1981.
- BARBOSA, E. A.; SANTOS, L. D. T.; JUNIOR, A. S.; COSTA, G. A.; CRUZ, L. R.; BARROS, R. E.; SANTOS, I. T. Dinâmica de infestação de plantas daninhas em cultivares de cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**. v. 29, n. 6 , p. 1920-1931, 2013.
- BARBOSA, F. da S. **Resistência à seca em cana-de-açúcar para diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo**. 82p. Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- 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.
- BEHERA, S.K.; PANDA, R.K. Integrated management of irrigation water and fertilizers for wheat crop using field experiments and simulation modeling. **Agric.Water Manage**. v. 96, pp.1532–1540. 2009.
- 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.
- BOLOGNA-CAMPBELL, I. **Balço de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana planta**. 2007. 112 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- BOOTE, K.J., JONES, J.W, PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agron. J**. 88:704–716. 1996.
- BONHOMME, R. Beware of comparing RUE values calculated from PAR vs solar radiation or absorbed vs intercepted radiation. **Field Crop Research**, Amsterdam, v.68, p.247-252, 2000.
- BRITO, A.S.; LIBARDI, P.L.; GHIBERTO, P.J. Water balance components in soils cropped to sugarcane, with and without nitrogen fertilization. **R. Bras. Ci. Solo**, v.30, pp. 295–303, 2009.

- BRUNINI, O. Zoneamento agrícola da cultura da cana-de-açúcar para o Brasil e estimativa da produtividade. In: CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. de A.; ROSSETO, R.; SORATTO, R. P. **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: FEPAF, p. 27-33. 2010.
- 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.
- CALHEIROS, A. S.; De OLIVEIRA, M. W.; FERREIRA, V. M.; BARBOSA, G. V. S.; DA COSTA, J. P. V.; De A. LIMA, G. S.; ARISTIDES, E. V. S. Acúmulo de nutrientes e produção de sacarose de duas cultivares de cana-de-açúcar na primeira rebrota, em função de doses de fósforo. **STAB (Piracicaba)**, v. 29, p. 26-29, 2011.
- CALHEIROS, A. S.; De OLIVEIRA, M. W.; FERREIRA, V. M.; BARBOSA, G. V. S.; SANTIAGO, A.D.; ARISTIDES, E. V. S. Produção de biomassa, de açúcar e de proteína em função de cultivares de cana e de adubação fosfatada. **Semina. Ciências Agrárias**, v. 33, p. 809-818, 2012.
- CÂMARA, G.M.S. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G. M.S., OLIVEIRA E.A.M. (Ed.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ. p. 31-64. 1993.
- CARR, M. K. V.; KNOX, J. W. The water relations and irrigation requirements of sugarcane (*Saccharum officinarum*): A review. **Experimental Agriculture**. v.47, p.1-25, 2011.
- CARVALHO, G. L. **Eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006**. 120p. Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Funep, 1991, 157p.
- CASTRO, P. R. C. Maturadores químicos em cana-de-açúcar. *Saccharum*, **Piracicaba**, v. 1, n. 4, p. 12-16, 1999.
- CATÁLOGO NACIONAL DE VARIEDADES "RB" de cana-de-açúcar. Curitiba: Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro, 2010. 136p.
- CHOPART, J-L., L. LE MÉZO, AND J-L BROSSIER. Spatial 2D distribution and depth of sugarcane root system in a deep soil. **International Symposium “Root Research and Applications”**, Boku-Vienna, Austria. 2009.
- CHRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília: ABID, n.54, p. 46-55, 2002.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_12_20_10_56_08_bo

letim_cana_portugues_-_dez_2013_3o_lev_-_original.pdf>. Acesso em: 06 fev. 2014.

CORREA, S.T.R. **Simulação estocástica de elementos do clima para estimação da produtividade de cana planta** 177p. Tese (Doutorando em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2013.

COSTA, C.T.S. **Crescimento, pigmentos fotossintéticos e produtividade de cana-de-açúcar (Saccharum spp.), no quarto ciclo de cultivo**. 2009. 51 p. Dissertação(Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2009.

COSTA, C.T.S. **Crescimento, produtividade e viabilidade econômica de cana-de-açúcar, sob diferentes lâminas de irrigação, na região de Penápolis – SP**. 2012. 102p Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

DA SILVA, V.P.R.; DA SILVA, B.B.; ALBUQUERQUE, W.G.; BORGES, C.J.R. SOUSA, I. F.; NETO, J. D. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil, **Agricultural Water Management**, v. 128, pp. 102-109, 2013.

DEGHANISANIJ H, NAKHJAVANI MM, TAHIRI AZ, ANYOJI H. Assessment of wheat and maize water productivities and production function for cropping system decisions in arid and semiarid regions. **Irrig Drain** v.58, pp.105–115. 2009.

DE SILVA, A.L.C.; DE COSTA, W.A.J.M. Growth and Radiation Use Efficiency of Sugarcane under Irrigated and Rain-fed Conditions in Sri Lanka. **Sugar Tech**. Vol. 14(3), pp 247-254. 2012.

DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. Yield response to water. **Irrig. And Drainage Paper no. 33**. FAO, Rome. 1979.

ERICKSON, J.E.; SOIKAEW, A.; SOLLENBERGER, L.E.; BENNETT, J.M. Water Use and Water-Use Efficiency of Three Perennial Bioenergy Grass Crops in Florida. **Agriculture**, v.2, pp. 325-338. 2012.

ESTEVES, B.S. **Balço de energia e produção de biomassa em um cultivo de Cana-de-açúcar**. 2011. 74p. Dissertação. (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

EVANS, H. The root-system of the sugar-cane: II. Some typical root-systems. **Empire J. Exp. Agric.**v 4, pp. 208–221. 1936.

FAO. 2014. **FAOSTAT** database, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Website <<http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/Q/QC/E>> acesso em: 30/05/2014.

- FARIAS, C.H. de A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS NETO, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.356-362, 2008.
- 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,, pp. 469-476, 2009.
- FARONI, C. E.; TRIVELIN, P. C. O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 6, p. 1007-1013, 2006.
- FERERES, E.; SORIANO, M.A. Deficit irrigation for predicting agricultural water use. **J. Exp. Bot.** 58, 147–159. 2007.
- FERREIRA JUNIOR, R.A. **Crescimento, eficiência no uso da radiação e energia de biomassa em cana-de-açúcar irrigada**. 2013. 140p Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" CÂMPUS DE BOTUCATU, Botucatu. 2013.
- FRANCO, H.C.J. **Eficiência agrônômica da adubação nitrogenada de cana-planta**. 2008. 127p Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- 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.
- GASCHO, G.J.; SHIH, S.F. Sugarcane. In: TEARE, I.D.; PEET, M.M. **Crop-water relations**. New York: John Wiley. 547p. 63p. 1983.
- GEERTS, S., RAES, D. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agric. Water Manage.** 96, 1275–1284. 2009.
- GEERTS, S. RAES, D. GARCIA, M. MIRANDA, R. CUSICANQUI, J.A. C. TABOADA, J. MENDOZA, R.HUANCA, A. MAMANI, O. CONDORI, J. MAMANI, B. MORALES, OSCO, V. STEDUTO, P. Simulating Yield Response of Quinoa to Water Availability with AquaCrop. **Agronomy Journal** 101: 499–508. 2009.
- GHAHRAMAN, B; SEPASKHAH, A.R. Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply. **Irrig Drain** 53:39–54. 2004.
- GHIBERTO, P.J.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S. Components of the water balance in soil with sugarcane crops. **Agricultural Water Management**. v.102, n. 1, pp. 1–7, 2011.
- 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, pp. 488–498. 2009

HERMANN, E.R.; CÂMARA, G.M.S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Revista STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.17, n.5, p.32-34, 1999.

HSIAO, T.C. **The soil-plant-atmosphere continuum in relation to drought and crop production**. p. 39–52. *In* Drought resistance in crops, with emphasis on rice. IRRI, Los Banos, the Philippines. 1982.

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. **Agron. J.** v.101, pp. 448–459. 2009.

IGBADUN, H.E, TARIMO, A.K.P.R, SALIM, B.A, MAHOO, H.F. Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop. **Agric Water Manage** 94:1–10, 2007.

INMAN-BAMBER, N.G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 36, n. 1, p. 41-51, 1994.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, p. 107–122, 2004.

INMAN-BAMBER, N.G. Economic impact of water stress on sugar production in Australia. **Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.** 29, 167–175. 2007.

INMAN-BAMBER, N.G.; BONNETT, G.D.; SMITH, D.M.; THORBURN, P.J. Sugarcane physiology: integrating from cell to crop to advance sugarcane production. **Field Crops Research**, v.92, p.115-117, 2005.

INMAN-BAMBER, N G.; LAKSHMANAN, P.; PARK, S. Sugarcane for water-limited environments: theoretical assessment of suitable traits. **Field crops research**. v.134, pp. 95-104. 2012.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p.185-202, 2005.

INMAN-BAMBER, N.G.; BONNETT, G.D.; SPILLMAN, M.F.; HEWITT, M.L.; JACKSON, J. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 59, p. 13-26, 2008.

ISTANBULLUOGLU, A. Effects of irrigation regimes on yield and water productivity of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under Mediterranean climatic conditions. **Agricultural Water Management** v. 96(12) pp.1792-1798, 2009.

JAMES, G. **Sugarcane**. 2nd ed. Oxford: Blackwell, 2004. 216 p.

JOB, L. Do açúcar dos antigos engenhos às modernas usinas. **Revista Cana Mix**, n.29, p.70-72, 2010.

- KABOOSI, K.; KAVEH F. Sensitivity analysis of FAO 33 crop water production function. **Irrigation Science**. n. 30, v.2, pp.89-100, 2012.
- KINGSTON, G. Benchmarking yield of sugarcane from estimates of water use. **Proc. Austr. Sugar Cane Technol.**, v.16 pp. 201-209, 1994.
- KORNDÖRFER, G.H.; COLOMBO, C.A.; CHIMELLO, M.A.; LEONI, P.L.C. Desempenho de cultivares de cana-de-açúcar cultivadas com e sem nitrogênio. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇÚCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL., 8, 2002, Recife. Piracicaba: STAB, 2002. p. 234-238.
- KINIRY, J. R.; SIMPSON, C. E.; SCHUBERT, A. M.; REED, J. D. Peanut leaf area index, light interception, radiation use efficiency, and harvest index at three sites in Texas. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 91, p. 297–306, 2005.
- KIRDA, C. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. In: FAO, deficit irrigation practices. **FAO water report no. 22**. FAO, Rome, Italy, pp 3–10. 2002.
- KOSTINA, E. Robust parameter estimation in dynamic systems. **Optimization and Engineering**, v. 5, p. 461-484, 2004.
- LACLAU, P., LACLAU, J. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Res.** v.114, pp.351–360. 2009.
- LANDELL, M.G. de A.; MACHADO, R.S.; SILVA D.N. da; SCARPARI, M.S.; XAVIER, M.A.; CRESTE, S.; ANJOS, I.A. dos; PRADO, H. do; PINTO, L.R.; BIDÓIA, A.P. **A interação entre a cana-de-açúcar e ambientes de produção estressantes**. In: CRUSCIOL, C.A.C.; SILVA, M. de A.; ROSSETO, R.; SORATTO, R.P. Tópicos em Ecofisiologia da Cana-de-Açúcar. Botucatu: FEPAF. p. 34-42, 2010.
- 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,pp.199-214, 2003.
- LIEBIG, J. VON. **Die chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie**. **Veinegn, Braunschweig**. 342 p. 1840.
- LIU, D.L.; KINGSTON, G.; BULL, T.A. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum and supraoptimum temperatures regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Oxford, v. 90, p. 119-139, 1998.
- LISSEN, S.N.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A.; MUCHOW, R.C. Modelling sugarcane production systems. II: Analysis of system performance and methodology issues. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, p. 31-48, 2000.
- LOOMIS, R.S., R. RABBINGE, E. NG. Explanatory models in crop physiology. **Annu. Rev. Plant Physiol.** 30:339–367. 1979.

- LUCCHESI, A. A. Fatores da produção vegetal, In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Associação brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato. (POTAFOS). Piracicaba, p. 1-11, 1987.
- LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R.; LYRA, G. B.; SEDIYAMA, G. C.; MAIA, S. M. F. Evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar na região de Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas: coeficiente da cultura “Dual” padrão boletim FAO-56. **Stab**, Piracicaba, v. 25, n.5, p. 44-50, mai/jun. 2007.
- MACHADO, R. S. et al. Respostas biométricas e fisiológicas ao deficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília,DF, v. 44, n. 12, p.1575-1582, 2009.
- MAGALHÃES, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspecto do metabolismo do carbono na planta. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato (POTAFOS), p. 113-118, 1987.
- MADANOGLU, K. Water consumption of wheat in central Anatolia. Publication No. 52. Ankara. Ankara Central TOPRAKSU **Research Institute**. p 67. 1997
- MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J. Cana de açúcar. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (Ed.). **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, p.111-130. 2009.
- MARIN, F.R.; JONES, J.W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J.L.; PALLONE FILHO, W.J.; NASSIF, D.S.P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for sugarcane Brazilian production systems. **Agronomy Journal**, v.103, p.100-110, 2011.
- MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia para 24 cultivares de cana-de-açúcar**. 2011. 87 f. Tese (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2011.
- MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JR., G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 295-301, 2001.
- MENDES, L.C. **Eficiência nutricional de cultivares de cana-de-açúcar**. Viçosa: UFV. 2006. 46p. Dissertação (Pós Graduação em Fitotecnia-Mestrado). Universidade Federal de Viçosa. 2006.
- MCMASTER, G.S., WILHELM, W.W. Growing degree-days: one equation, two interpretations. **Agric Forest Meteorol** 87:291 - 300. 1997.
- MONTEITH J. L. **Using tube solarimeters to measure radiation interception by crop canopies and to analyse stand growth**. Pub. Delta-T Devies, document code TSL – AW-4-1, 1993, 11p.
- MONTEITH, J.L. The quest for balance in crop modelling. **Agron. Journal**. 88:695–697. 1996.

MOZAMBANI, A.E.; PINTO, A.S.; SEGATO, S.V; MATTIUZ, C.F.M. História e morfologia da cana-de-açúcar, In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, p.11-18. 2006.

MUCHOW, R. C. et al. Radiation interception and biomass accumulation in sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v.45, p.37-49, 1994

NASH, J.E.; STUCLIFFE, 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 paravarietades 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.

OLIVEIRA, E.C.A., FREIRE, F.J., OLIVEIRA, A.C., NETO, D.E.S., ROCHA, A.T., CARVALHO, L.A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesq. agropec bras**. Brasília, v. 46, n. 6, 2011.

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

OLIVEIRA, E.C.A. de. **Dinâmica de nutrientes na cana-de-açúcar em sistema irrigado de produção**. Recife: PE. 2008. 73 p Dissertação–(Mestrado), Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 2008.

OLIVIER, F.C.; SINGELS, A. Water use efficiency of irrigated sugarcane as affected by row spacing and variety. **Proc. Austr. Sugar Cane Technol.**, v. 7, pp. 347-351, 2003.

OLIVIER, F.C.; SINGELS, A.; EKSTEEN, A.; NGXALIWE, S. **Water use efficiency and drought tolerance of sugarcane for bio-energy production**. SANCID Symposium, 20-23 November, KwaZulu-Natal, 2012.

PARANHOS, S. B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 3-18.

PARK, S. E.; ROBERTSON, M.; INMAN-BAMBER, N.G. Decline in the growth of a sugarcane crop with age under high input conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, p.305-320, 2005.

PACHECO, P.; ALONSO, N.; GUTIÉRREZ, A. A study of the sugar cane evapotranspiration in Cuba. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 18, 1983, Ciudad de la Habana, Cuba. **Proceeding**. Ciudad de la Habana, Cuba: Society of Sugar Cane Technologists. p. 380-387. 1983.

- PAYERO, J.O; TARKALSON,D.D; IRMAK,S; DAVISON,D; PETERSEN, J.L. Effect of timing of a deficit-irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency and dry mass. **Agric. Water Manage.** 96, 1387-1397. 2009.
- PEREIRA, W. Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar inoculada com bactérias diazotróficas. 2011. 61 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do solo) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.
- PIRES, R. C. M.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. Irrigação e drenagem. In: DINARDOMIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, p. 631-670. 2008.
- PLUNKETT, G. M.; MUCHOW, R. C. “Water Extraction by Sugarcane on Soils of the Ord Irrigation Area,” **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Vol. 43, No. 5, pp. 487-495, 2003.
- 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. **Agron. J.** 101, 438–447. 2009.
- ROBERTSON, M.J.; DONALDSON, R.A. Changes in the components of cane and sucrose yield in response to drying-off before harvest. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 55, p. 201–208, 1998.
- ROBERTSON, M.J. & MUCHOW, R.C. Future research challenges for efficient crop water use in sugarcane production. **Proc. Austr. Sugar Cane Technol.**, v.6, pp.193-200, 1994.
- ROSENFELD, U. **Determinação do período crítico de deficiência hídrica para a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 1989. 88 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.
- ROSSETTO, R; DIAS, F. L. F. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar: indagações e reflexões. **Encarte do Informações Agronômicas**, n.110, junho de 2005.
- 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. Parameterisation of 3-PG for plantation grown Eucalyptus globulus. **Forest Ecology and Management**, n163, pp.273- 292, 2002.
- SANTOS, C. G.; SOUZA, J. L.; MOURA FILHO, G.; CARNAÚBA, P. J. P.; SANTOS, V. R. Análise pluviométrica durante o cultivo da cana-de-açúcar na região de Coruripe-AL. **Stab**, Piracicaba, v. 26, n. 2, p. 38-43. 2007.
- SANTOS, V.R. dos; MOURA FILHO, G.; ALBUQUERQUE, A.W. de; COSTA, J.P.V. da ;SANTOS, C.G. dos; SANTOS, A.C.I. dos. Crescimento e produtividade agrícola de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 389-396, 2009.

SCARPARE, F.V. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST**. 2011. 164 p. Tese (Doutorado em Física do ambiente agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SCARPARI, M.S. **PREDPOL: Um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado**. 2007. 120p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2007.

SCORZA JÚNIOR, R. P. Modelagem matemática e simulação de sistemas: uma importante ferramenta na pesquisa agropecuária. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. (Org.). **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p. 63-74.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. **Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar**. 1. Ed. Divisão de Biblioteca e Documentação – ESALQ/USP. Cap 2. p. 19-36. 2006.

SILVA, L.C. da. **Crescimento e acúmulo de nutrientes em sete cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Coruripe-AL**. 2007. 104 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2007.

SILVA, M. de A.; PINCELLI, R.P. **Alterações morfofisiológicas na cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica**. In: CRUSCIOL, C.A.C.; SILVA, M. de A.; ROSSETO, R.; SORATTO, R.P. Tópicos em Ecofisiologia da Cana-de-açúcar. Botucatu: FEPAF. p. 43-48, 2010.

SILVA, T. G. F. **Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no submédio do vale do São Francisco**. 2009. 176p. Tese. (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

SINCLAIR, T.R., SELIGMAN, N. G. Crop modelling: From infancy to maturity. **Agron. Journal**. 88:698–704. 1996.

SINCLAIR, T. R. et al. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, EUA. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 88, p. 171-178, 2004.

SINGELS, A.; KENNEDY, A.J.; BEZUIDENHOUT, C.N. The effect of water stress on sugarcane biomass accumulation and partitioning. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, Durban, v. 74, p. 169–172, 2000.

- SINGELS, A.; SMIT, M.A. The effect of row spacing on an irrigated plant crop of sugarcane variety NCo376. **Proceedings South African Sugar Technologists Association**, Durban, v. 76, p. 94–105, 2002.
- SINGELS, A.; DONALDSON, R.A.; SMIT, M.A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 291–303, 2005.
- SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. **DSSAT v.4.5 DSSAT/CANEGRO**: Sugarcane Plant Module; scientific documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling, South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34 p.
- SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, p. 91-97, 2006.
- SCS. 'Irrigation water requirements' National Engineering Handbook, part 623. **Soil Conservation Service**, US Dept. of Agriculture. Washington, USA. 1993.
- SOUZA, E. F; BERNARDO, S.; CARVALHO, J. A. Função de Produção da cana-de-açúcar em Relação à Água para Três Cultivares, em Campos dos Goytacazes, RJ. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 19, n. 1, p. 28- 42, 1999.
- SOUZA, J. L. et al. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na região do Tabuleiro Costeiro de Maceió, AL, período de 1972-2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 12, n. 1, p. 131-141, 2004.
- SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar: avaliação do modelo Mosaic**. 2006. 60 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- STEDUTO, P., HSIAO, T.C., FERERES, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrig. Sci.** 25:189–207. 2007.
- 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. **Agron. J.** 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.
- STEWART, J.I.; HAGAN, R.M. Functions to predict effects of crop water deficits. **J. Irrig. Drain.** Div. ASCE 99 (IR4), 421–439. 1973.
- STEWART, J.I.; CUENCA, R.H.; PRUITT, W.O.; HAGAN, R.M.; TOSSO, J. **Determination and Utilization of water production functions for principal California crops**. W- 67 Calif. Contrib. Proj. Rep. University of California, Davis. 1977.
- STIRLING, G.R; HALPIN, N.V; BELL, M.J. A surface mulch of crop residues enhances suppressiveness to plant-parasitic nematodes in sugarcane soils. **Nematropica**. v. 41. pp.107–119, 2011.

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.

TERAMOTO, E.R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) baseados em parâmetros do solo e do clima**. 2003. 86 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

THOMPSON, G.D. Water use by sugarcane. **The South African Sugar Journal**, Durban, v. 60, n. 11, p. 592-600, 1976.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - **Laboratory of Climatology**, 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1) 1955.

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. **Agronomy Journal**. v. 101, pp. 509–521, 2009.

TOKESHI, H. Perfilhamento e perdas pelo carvão da cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v.4, n.5, p.34-44, 1986.

TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W.; GAVA, G.J.C.; SARRIÉS, G. A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 637-646, 2002.

UEHARA, N.; SASAKI, N.; AOKI, N.; OHSUG, R. Effects of the temperature lowered in the daytime and night-time on sugar accumulation in sugarcane. **Plant Production Science**, v.12, n.4, 420-427, 2009.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (ÚNICA). Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/>. Acesso em: 19 maio. 2014.

URIBE, R. A. M. **Produtividade e estimativa de acúmulo da biomassa em soqueira de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial com diferentes doses de N-fertilizante**. 2010. 67 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

USDA ,2014. United States Department of Agriculture. **Crop Production 2013 Summary**. Acesso em 24/06/2014. Disponível em: <<http://usda01.library.cornell.edu/usda/current/CropProdSu/CropProdSu-01-10-2014.pdf>>

VAN DEN BERG, M.; BURROUGH, P. A.; CRIESSEN. P. M. Uncertainties in the appraisal of water availability and consequences for simulated sugarcane

yield potentials in São Paulo State, Brazil. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 81, p. 43-55, 2000.

VIEIRA, G.H.S. **Uso racional da água na cultura da cana-de-açúcar Irrigada no norte de Minas Gerais**. 2012. 101p. Tese. (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

VITTI, G.C.; MAZZA, J.A. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba: Potafós, n. 97, p. 1-16, 2002.

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.

WALLACH, D. Evaluating Crop models. In D. Wallach, D. Makowski, & J. W. Jones (Eds.), *Working with dynamic crop models*. **Elsevier**. 2006.

WHISLER, F.D., B. ACOCK, D.N. BAKER, R.E. Fye, H.F. HODGES, J.R. LAMBERT, H.E. LEMMON, J.M. MCKINION, V.R. REDDY. Crop simulation models in agronomic systems. **Adv. Agron.** 40:141–208. 1986.

WIEDENFELD, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilizer. **Agricultural Water Management**, v. 43, p.173–182, 2000.

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

XIN, Z.; BROWSE, J. Cold comfort farm: the acclimation of plants to freezing temperatures. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 23, p. 893-902, 2000.

ZHOU, M.; SINGELS, A.; SMIT, M. Physiological parameters for modelling varietal differences in sugarcane canopy development in the south east lowveld of Zimbabwe. In: SOUTH AFRICAN SUGARCANE TECHNOLOGISTS' ASSOCIATION, 77, 2003, Mount Edgecombe. **Proceedings** Mount Edgecombe: SASTA, 2003. p. 32-40.

APÊNDICE

1. Recomendações de uso do modelo AquaCrop

Muitos detalhes sobre a utilização do AquaCrop encontram-se no Boletim FAO 66 (STEDUTO et al., 2012). Sabendo que o AquaCrop foi recentemente lançado pela FAO, este trabalho é o primeiro realizado no Brasil. Este anexo tem objetivo fornecer algumas informações para trabalhos posteriores com modelo para cana-de-açúcar ou outras culturas.

Uma vez que o modelo simula o crescimento do dossel, ou seja a superfície transpirante, a obtenção do parâmetro referente a velocidade de crescimento do dossel é de fundamental importância. Desta maneira, trabalhos futuros podem estimar a cobertura do solo pelo dossel através de fotografias da parte de cima, e a obtenção da cobertura do solo pelo dossel pode ser obtida facilmente com uso das fotografias. A obtenção desses valores tem grande importância na fase inicial da cultura, ou seja, do início até a cultura atingir a cobertura máxima (CC_x).

O início do processo de simulação do crescimento do dossel se dá quando 90% das plântulas emergem. A cobertura do solo no início do processo é dada pela área foliar das plântulas multiplicada pelo espaçamento. A área foliar inicial pode ser facilmente obtida medindo a área foliar das plântulas na emergência de 90% das mesmas. A data de emergência de 90% das plântulas varia de acordo com cultivares, época do ano entre outros fatores. Para a cana-de-açúcar, a emergência dos brotos da cana soca é mais rápido do que a cana planta, nas simulações considerou que a emergência dos brotos da cana soca tem início alguns dias antes da cana planta.

No modelo AquaCrop a simulação do balanço de água no solo tem papel primordial. Desta maneira, o conteúdo inicial de água no solo é importante para a simulação, especialmente para os tratamentos com déficit de irrigação ou sistema de sequeiro. Quando se faz uso de irrigação, esses erros tendem a ser minimizados. Porém, para reduzir esses erros, o modelo permite a simulação do conteúdo inicial de água no solo, baseado nos dados de chuva que antecede o plantio e nos dados de evapotranspiração de referência (ET_o). Assim, o modelo realiza o balanço de água no solo para os dias anteriores a emergência da cultura.

O conhecimento da profundidade do sistema radicular é importante na simulação, principalmente naqueles em que ocorrem déficit hídrico na cultura.

O modelo considera diferentes distribuição das raízes ao longo da profundidade máxima alcançada pela cultura, na simulação as raízes mais profundas são responsáveis pela absorção de água. Os dados de capacidade campo e ponto de murcha permanente são importantes porque estão diretamente ligados a quantidade de água armazenada no solo. Assim, quanto mais detalhado o perfil do solo, melhor a utilização do modelo.

Um parâmetro de grande importância para simular a resposta da cultura é o índice de colheita (HI), este particiona a biomassa em produção final. Apesar da sua importância, o mesmo não conseguiu refletir os impactos do clima na produção de sacarose. Porém, nas culturas de grãos esse parâmetro tem uma relação direta na produção de grãos. Assim, em trabalhos futuros de outras culturas é aconselhável verificar o impacto do déficit hídrico neste índice.

Para o uso do modelo para alguma cultura ainda não parametrizada pela FAO, faz necessário a utilização de dados em que ocorram déficit hídrico na cultura. Esses dados são necessários para a obtenção dos parâmetros referentes ao estresse hídrico (senescência foliar, fechamento estomático e crescimento foliar).

Um parâmetro de difícil obtenção é a temperatura basal da cultura, no caso da cana-de-açúcar diversos trabalhos apresentam diferentes valores. O Boletim FAO66 recomenda que este parâmetro seja obtido em condições de estresse térmico, o que no caso não houve em nenhum dos experimentos. Assim, a escolha do valor de temperatura basal deve ser com cuidado, baseado em dados na literatura e principalmente de acordo com os conhecimentos de técnicos.