



UFRRJ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL**

DISSERTAÇÃO

**MODELOS DE BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO OTIMIZADOS PARA
ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E UMIDADE DO SOLO
EM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM REGIME DE SEQUEIRO
EM RIO LARGO, AL.**

JÉSSICA MOTA PIMENTA

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
E AMBIENTAL

MODELOS DE BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO OTIMIZADOS PARA
ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E UMIDADE DO SOLO
EM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM REGIME DE SEQUEIRO
EM RIO LARGO, AL.

JÉSSICA MOTA PIMENTA

Sob a Orientação do Professor
Gustavo Bastos Lyra

e Co-orientação do Professor
Adolpho Emanuel Quintela da Rocha

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Seropédica, RJ.

Julho/2023.

“É permitido a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte”

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P 644m Pimenta, Jéssica Mota , 1994-
MODELOS DE BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO OTIMIZADOS PARA
ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E UMIDADE DO SOLO EM
CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM REGIME DE SEQUEIRO EM RIO
LARGO, AL. / Jéssica Mota Pimenta. - Januária, 2023.
55 f.: il.

Orientador: GUSTAVO BASTOS LYRA.
Coorientador: Adolpho Emanuel Quintela da Rocha.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL, 2023.

1. Balanço hídrico. 2. Modelagem . 3.
Evapotranspiração. 4. Manejo de irrigação. I. BASTOS
LYRA, GUSTAVO , 1975-, orient. II. da Rocha, Adolpho
Emanuel Quintela , 1990-, coorient. III Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. ENGENHARIA AGRÍCOLA
E AMBIENTAL. IV. Título.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001" e "This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001".

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO INSTITUTO
DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL

JÉSSICA MOTA PIMENTA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, área de Concentração em Sistemas Agrícolas.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/07/2023

Documento assinado digitalmente
 GUSTAVO BASTOS LYRA
Data: 30/08/2023 20:24:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gustavo Bastos Lyra. Dr., UFRRJ
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 DANIEL SILVEIRA PINTO NASSIF
Data: 31/08/2023 08:57:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Daniel Silveira Pinto Nassif. Dr., UFSCar

Documento assinado digitalmente
 MARIANA DE OLIVEIRA PEREIRA
Data: 29/08/2023 11:04:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mariana de Oliveira Pereira. Dr., UFRRJ

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pois como diz em Filipenses 4:13: “Tudo posso naquele que me fortalece!”. É de ti quem tiro toda minha força e determinação.

A minha mãe Marise Mota, exemplo de força e fé, pelo amor incondicional que me ensinou a persistir e trabalhar para alcançar os meus objetivos, e por respeitar os meus sonhos, estando sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

Aos familiares e amigos que me acompanharam ao longo dessa jornada por estarem sempre dispostos a me ajudar diante as necessidades e desafios.

Ao Prof. Gustavo Lyra e Adolpho Emanuel, pela orientação, paciência, aprendizado, respeito e por acreditar no meu potencial. Aos membros da banca avaliadora deste trabalho, por terem aceitado o convite e contribuído com as correções necessárias para aprimoramento dessa pesquisa. Ao professor Antônio Fábio pelo incentivo e dedicação em motivar a buscar o meu melhor desempenho.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, em nome de todos os professores e funcionários que colaboraram para a minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente, contribuíram para realização desse trabalho, o meu muito obrigado!

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001" e "This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001".

RESUMO

PIMENTA, Jéssica Mota. **Modelos de balanço de água no solo otimizados para estimativa da estimativa da evapotranspiração e umidade do solo em cultivo de cana-de-açúcar em regime de sequeiro em Rio Largo, AL.** 54p Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

O conhecimento da dinâmica da água no solo e a quantidade requerida pela cultura é fundamental para o planejamento e manejo agrícola. Nesse estudo, objetivou-se avaliar o desempenho dos modelos de Thornthwaite e Mather e K_c dual (FAO-56) para estimativa da umidade do solo e evapotranspiração da cana-de-açúcar em Rio Largo, AL. Medidas meteorológicas, da cultura e do solo foram obtidas na área experimental do Campus de Engenharia e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Os ajustes dos parâmetros da cultura e do solo (K_c , K_{cb} e f) foram realizados por técnicas de modelagem inversa, em que foram utilizados dados de umidade volumétrica medidos por sondas TDR e evapotranspiração real obtida pelo método do balanço de energia- razão de Bowen. Nos ajustes dos modelos, considerou-se o método Metropolis-Hastings. Os modelos foram avaliados pelos índices de desempenho por meio do índice de concordância de Willmott modificado (d_w) (1985), coeficiente de determinação (r^2), raiz quadrada média do erro (RQME), erros sistemáticos e não sistemáticos. A evapotranspiração real (ETR) total durante o ciclo estimada pelo modelo de Thornthwaite e Mather em escala diária variou entre 553,6 otimizado umidade volumétrica e 827,6 mm coeficientes tabelados FAO-56. A ETR para o modelo K_c dual variou entre 804,7 otimizado umidade volumétrica e 841,6 mm coeficientes tabelados FAO-56. Os valores de K_c ajustados (1,18), otimizados com ETR (0,90) e umidade volumétrica (0,38) foram inferiores aos valores da FAO-56 em 5,6, 28 e 69,6%, respectivamente. O K_c (0,38) obtido com umidade volumétrica no modelo de ThM resultou em menor evapotranspiração real. Os valores de K_{cb} otimizados com ETR (0,90) e umidade volumétrica (0,38) foram inferiores aos valores da FAO-56 em 25,8% e 13,3%, respectivamente. Os dois modelos subestimaram a umidade volumétrica e superestimaram a ETR diária em condição de $P-ET_c \geq 0$. Entretanto, foi observado melhor precisão e exatidão dos modelos para estimativa da ETR na condição de $P-ET_c \geq 0$. O melhor desempenho dos dois modelos para estimativa da umidade volumétrica diária foi obtida na condição de $P-ET_c < 0$ quando otimizados com umidade volumétrica. Os modelos em escala decendial apresentaram desempenho superior a escala diária para estimativa da ETR e umidade volumétrica.

Palavras-chave: Razão de Bowen, modelagem inversa, balanço hídrico.

ABSTRACT

PIMENTA, Jéssica Mota. **Soil water balance models optimized for evapotranspiration and soil moisture estimation in rainfed sugarcane cultivation in Rio Largo, AL.** p 54. Dissertation (Master in Agricultural and Environmental Engineering). Institute of Technology, Engineering Department, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2023.

Know the dynamics of water in the soil and the amount required by the crop is fundamental for agricultural planning and management. The aim of this study was to evaluate the performance of the Thornthwaite and Mather and dual Kc (FAO-56) models for estimating soil moisture and sugarcane evapotranspiration in Rio Largo, AL. Meteorological, crop and soil measurements were taken in the experimental area of the Engineering and Agrarian Sciences Campus of the Federal University of Alagoas (UFAL). The crop and soil parameters (Kc, Kcb and f) were adjusted using inverse modeling techniques, using volumetric moisture data measured by TDR probes and real evapotranspiration obtained by the Bowen energy balance method. The Metropolis-Hastings method was used to adjust the models. The models were evaluated using the modified Willmott concordance index (dw) (1985), coefficient of determination (r^2), root mean square error (RMSE), systematic and non-systematic errors. The total actual evapotranspiration (ETR) during the cycle estimated by the Thornthwaite and Mather model on a daily scale varied between 553.6 optimized volumetric humidity and 827.6 mm FAO-56 tabulated coefficients. The ETR for the dual Kc model varied between 804.7 optimized volumetric humidity and 841.6 mm FAO-56 tabulated coefficients. The adjusted Kc values (1.18), optimized with ETR (0.90) and volumetric humidity (0.38) were lower than the FAO-56 values by 5.6, 28 and 69.6%, respectively. The Kc (0.38) obtained with volumetric humidity in the ThM model resulted in lower actual evapotranspiration. The Kcb values optimized with ETR (0.90) and volumetric moisture (0.38) were lower than the FAO-56 values by 25.8% and 13.3%, respectively. Both models underestimated volumetric moisture and overestimated daily ETR under conditions of $P-ET_c \geq 0$. However, the models' precision and accuracy were better for estimating ETR under conditions of $P-ET_c \geq 0$. The best performance of the two models for estimating daily volumetric humidity was obtained in the $P-ET_c < 0$ condition when optimized with volumetric humidity. The decadal scale models outperformed the daily scale for estimating ETR and volumetric moisture.

Keywords: Bowen ratio, inverse modeling, water balance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estádios fenológicos da cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de CHEAVEGATTI-GIANOTTO, 2011.	3
Figura 2. a) Valores diários de temperatura máxima, mínima, média b) precipitação e evapotranspiração de referência durante o período de cultivo da cana-de-açúcar em Rio Largo, AL.....	15
Figura 3. Valores diários do coeficiente da cultura FAO-56 e K_c experimental durante a fase de crescimento e média da cana-de-açúcar.....	16
Figura 4. Valores diários de evapotranspiração obtida por Bowen, da cultura e real estimado pelo modelo de a) Thornthwaite e Mather com dados de K_c tabelado, b) K_c dual dados de K_c tabelado, c) Thornthwaite e Mather dados de K_c ajustado, d) K_c dual dados de K_c ajustado, e) Thornthwaite e Mather dados de K_c otimizado com ETR, f) K_c dual dados de K_c otimizado com ETR, g) K_c dual dados de K_c otimizado com umidade volumétrica. h) K_c dual dados de K_c otimizado com umidade volumétrica.	18
Figura 5. Análise de regressão linear entre os valores de ETR Bowen estimados pelo modelo de Thornthwaite e Mather com dados de a) K_c tabelado b) ajustado c) otimizado com ETR d) otimizado com umidade volumétrica.	20
Figura 6. Análise de regressão linear entre os valores de ETR Bowen estimados pelo modelo K_c dual-FAO 56 com dados de a) K_c tabelado b) ajustado c) otimizado com ETR d) otimizado com umidade volumétrica.	22
Figura 7. Análise de regressão linear entre os valores de ETR Bowen estimados pelo modelo de a) Thornthwaite e Mather, b) K_c dual em escala decidual.	23
Figura 8. Análise de regressão linear entre os valores de umidade volumétrica estimada pelo modelo K_c dual com dados de a) K_c tabelado b) ajustado c) otimizado com ETR d) otimizado com umidade volumétrica	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Precipitação (mm) acumulada, frequência, magnitude, dias de chuva e evapotranspiração de referência subdivida por estádios.....	16
Tabela 2. Coeficientes da cultura, coeficientes da cultura basal e fator de disponibilidade de água (<i>f</i>), propostos pela FAO-56, ajustado, otimizados com ETR e umidade volumétrica	17
Tabela 3. Índices de desempenho estatístico modelo de Thornthwaite e Mather para estimativa da ETR em escala diária.....	21
Tabela 4. Índices de desempenho estatístico do modelo de K_c dual para estimativa da ETR em escala diária.	23
Tabela 5. Índices de desempenho estatístico modelo de Thornthwaite e Mather e K_c dual para estimativa da ETR em escala decenal.	24
Tabela 6. Índices de desempenho estatístico modelo de Thornthwaite e Mather para estimativa da umidade volumétrica.	27
Tabela 7. Índices de desempenho estatístico modelo de K_c dual para estimativa da umidade volumétrica.	28
Tabela 8. Índices de desempenho estatístico modelo Thornthwaite e Mather e K_c dual para estimativa da umidade volumétrica em escala decenal.	29

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

AFD – Água facilmente disponível (mm);
AFE – Água facilmente evaporável (mm);
ALT – Alteração do armazenamento de água no solo (mm);
ARM – Armazenamento de água no solo (mm);
CAD – Capacidade de água disponível (mm);
CAE – Capacidade de água evaporável (mm);
CC – Capacidade de campo (m^3m^{-3});
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
CTA – Capacidade total de água na zona radicular (mm);
DAP – Dias após plantio;
DEF – Deficiência hídrica (mm);
De – Depleção na camada subsuperficial (mm);
dm – Índice de Willmot modificado (0-1);
Dr – Depleção na zona radicular (mm);
DSSAT – *Decision Support System for Agrotechnology Transfer*
RQME – Raiz quadrada do erro médio;
 ET_c – Evapotranspiração da cultura (mm d^{-1});
 ET_o – Evapotranspiração de referência (mm d^{-1});
ETP – Evapotranspiração potencial (mm d^{-1});
ETR – Evapotranspiração real (mm d^{-1});
EXC – Excedente hídrico (mm);
EPE – Empresa de Pesquisa Energética;
 e_s – pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa);
 e_a – pressão parcial do vapor d'água do ar (kPa);
FAO56 – *Food and Agriculture Organization of the United Nations - Boletim 56*;
f – Fator de disponibilidade de água no solo;
 f_{umid} – fração do solo exposto;
G – Fluxo de calor no solo (W m^{-2});
H – Fluxo de calor sensível (W m^{-2});
I – Irrigação (mm);
 K_c – Coeficiente da cultura;
 K_{cb} – Coeficiente basal da cultura;
 K_e – Coeficiente de evaporação;
 K_{c_ini} – Coeficiente da cultura inicial;
 K_{c_int} – Coeficiente da cultura intermediário;
 K_{c_med} – Coeficiente da cultura médio;
 K_{c_max} – Coeficiente da cultura máximo;
 K_r – Coeficiente de redução da evaporação do solo;
 K_s – Fator de redução da transpiração;
 L_{ini} – Comprimento do estágio inicial (dias);
 L_{cres} – Comprimento do estágio crescimento (dias);
 L_{int} – Comprimento do estágio intermediário (dias);
 L_{fim} – Comprimento do estágio final (dias);
LE – Fluxo de calor latente (W m^{-2});
 MSE_s – Quadrado médio do erro sistemático;
 MSE_a – Erro sistemático aditivo;

MSE_p – Quadrado médio do erro sistemático proporcional;
 MSE_i – Quadrado médio do erro sistemático interdependente;
 MSE_u – Quadrado médio do erro não sistemático;
 NEC.ACM – Negativo acumulado;
 P – Precipitação (mm);
 PMP – Ponto de murcha permanente ($m^3 m^{-3}$);
 RO – Escoamento superficial (mm);
 R_n – Saldo de radiação total diário à superfície ($MJ m^{-2} d^{-1}$);
 R_g – Radiação solar global ($MJ m^{-2} d^{-1}$);
 R_r – Radiação refletida ($MJ m^{-2} d^{-1}$);
 R_s – Radiação de ondas longas emitida pela superfície ($MJ m^{-2} d^{-1}$);
 R_a – Radiação solar no topo da atmosfera ($MJ m^{-2} d^{-1}$);
 r^2 – Coeficiente de determinação (0-1);
 T – Temperatura do ar ($^{\circ}C$);
 TDR – Reflectometria de Domínio de Tempo;
 ThM – Thornthwaite e Mather;
 u_2 – velocidade do vento ($m s^{-1}$);
 Z_r – profundidade do sistema radicular (m);
 Z_e – Profundidade da camada superficial do solo (m);
 Δ – Declividade da curva de pressão de vapor ($kPa ^{\circ}C^{-1}$);
 γ – Coeficiente psicométrico ($kPa ^{\circ}C^{-1}$);

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 A Cultura da Cana-de-açúcar	2
2.1.1 Origem, histórico e potencial produtivo	2
2.1.2 Crescimento e desenvolvimento	2
2. 1. 3 Condições edafoclimáticas e requerimento hídrico	3
2.2 Evapotranspiração	4
2.3 Modelagem da água no solo	5
2.3.1 Modelagem inversa	5
2.3.2 Modelo Thornthwaite e Mather	5
2.3.3 Modelo K_c -dual FAO-56	6
3 MATERIAL E MÉTODOS	7
3.1 Caracterização da área e manejo da cultura.	7
3.2 Medidas meteorológicos e da umidade do solo	7
3.3 Estimativa da evapotranspiração de referência	7
3.4 Evapotranspiração Real- Balanço de energia-Razão de Bowen	8
3.5 Balanço de água no solo Thornthwaite e Mather	9
3.6 Balanço de água no solo K_c dual (FAO-56)	11
3.7 Coeficiente de cultura experimental	13
3.8 Otimização dos modelos	13
3.9 Análise estatística	14
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	15
4.1 Condições meteorológicas	15
4.2 Coeficientes da cultura e basal otimizados	16
4.3 Simulações dos modelos para estimativa da ETR	17
4.4 Análise de desempenho dos modelos para estimativa da ETR em escala diária	19
4.4.1 Modelo de Thornthwaite e Mather	19
4. 4. 2 Modelo K_c dual	21
4.5 Análise de desempenho dos modelos para estimativa da ETR em escala decendial	23
4.6 Simulação dos modelos para estimativa da umidade volumétrica	24
4.7 Desempenho dos modelos para estimativa da umidade volumétrica em escala diária	26
4.7.1 Modelo de Thornthwaite e Mather	26
4.7. 2 Modelo K_c dual	27

4.8 Análise de desempenho dos modelos para estimativa da umidade volumétrica em escala decendial	28
5 CONCLUSÕES	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
ANEXOS	35

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, sua extensa área cultivável e condições climáticas favoráveis, permitem ao país grandes produções e alta competitividade no mercado internacional (CONAB, 2019). Durante a safra 2019/2020 foram colhidos mais de 642,7 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Destaca-se ainda o aumento na produção da região Nordeste, com cerca de 49,1 milhões de toneladas colhidas, um aumento de 10,6% em relação à safra anterior com produtividade média de 58,18 t ha⁻¹. Apesar da região Nordeste ter apresentado aumento na produção, a sua produtividade ainda é inferior a de outras regiões, como o Sudeste, que colheu mais de 415 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, com produtividade média de 79,81 t ha⁻¹ (CONAB, 2020).

Os diversos produtos oriundos da cana-de-açúcar, como por exemplo, álcool, açúcar, bebidas e bioplásticos contribuem significativamente para a economia do Brasil. Durante a safra 2019/2020 o Brasil produziu 29.795,7 mil toneladas de açúcar (CONAB, 2020). Além da produção de açúcar, os derivados da cana-de-açúcar contribuem para diversificação da matriz energética sendo responsável por 19,1 % da oferta interna de energia (EPE, 2021).

Diante do cenário de alta relevância da cana-de-açúcar no Brasil e no mundo, nesse contexto, são necessárias pesquisas relacionadas aos fatores que limitam a produtividade, com ênfase à disponibilidade hídrica (MELO, 2020). Além disso, faz-se necessário o uso de cultivares adaptadas às condições locais e manejo da irrigação para promover alto rendimento das culturas (LYRA et al., 2016).

Determinar a quantidade de água requerida pelas culturas e as variações de disponibilidade ao longo do seu ciclo de cultivo é fundamental para realizar o planejamento e manejo de irrigação de forma eficiente. No entanto, em áreas de agricultura irrigada, erros na estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) podem comprometer a determinação da lâmina de irrigação e, assim na produtividade da cultura, devido ao estresse hídrico e impactar na disponibilidade de água para consumo humano, animal e industrial (DINGRE; GORANTIWAR, 2020).

Diversos métodos são utilizados para determinação da evapotranspiração e umidade do solo, por exemplo, lisímetros e abordagens micrometeorológicos, sonda de nêutrons, método gravimétrico, técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) (LYRA et al., 2016; ALBERTO, 2008). O método do balanço de energia Razão de Bowen (BERB) tem sido amplamente utilizado em pesquisas para obter a evapotranspiração real a partir dos fluxos de calor latente e sensível (DA ROCHA, 2019). Entretanto, o método apresenta limitações para utilização por pequenos e médios produtores (BARROS et al., 2021) por possuir custo elevado e necessidade de calibração do equipamento.

Diante disso, a modelagem tem sido alternativa para determinar o conteúdo de água no solo, previsão de safras, crescimento, impactos nos rendimentos da cultura e demanda hídrica. Contudo, há necessidade de otimização (calibração) dos parâmetros e avaliação dos modelos em diferentes condições climáticas, do solo e da cultura.

Entre os diversos modelos de balanço de água no solo, destaca-se o modelo de Thornthwaite e Mather (1955), que possibilita estimar as variações de armazenamento de água no solo em diversas escalas de tempo. Além disso, quando adaptado às culturas agrícolas auxilia na tomada de decisões sobre as definições de épocas de plantio, manejo e dimensionamento de sistemas de irrigação (LYRA et al., 2010).

O boletim de irrigação e drenagem N°56 da Organização para Alimentação e Agricultura (FAO) apresenta o modelo K_c dual (FAO 56) que trata dos requisitos de água da cultura, em que o coeficiente de cultura (K_c) é dividido em dois coeficientes, um que representa

a transpiração da cultura (K_{cb}) e outro relativo a evaporação da água do solo (K_e) (ALLEN et al. 1998). Além da estimativa dos requisitos de água da cultura, o método K_c dual possibilita a estimativa do conteúdo de água no solo por meio do balanço hídrico na zona radicular da cultura.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho dos modelos de Thornthwaite e Mather e K_c dual (FAO-56) para estimativa da umidade do solo e evapotranspiração da cana-de-açúcar em Rio Largo, AL.

Objetivos específicos

- Estimar a evapotranspiração real e a umidade do solo em cultivo de cana-de-açúcar;
- Otimizar os parâmetros do solo e da cultura nos modelos de Thornthwaite e Mather e K_c dual (FAO-56);
- Avaliar a precisão e exatidão dos modelos de balanço de água no solo de Thornthwaite e Mather e K_c dual (FAO-56) para estimativa da evapotranspiração real e umidade do solo com coeficientes tabelados, ajustados e otimizados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A Cultura da Cana-de-açúcar

2.1.1 Origem, histórico e potencial produtivo

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) tem sua origem na Ásia, com primeiros relatos em Nova Guiné (DOORENBOS; KASSAM, 1979), pertence à família da Poaceae (gramíneas) do gênero *Saccharu*, é considerada uma planta C4 com elevada taxa de fotossíntese.

O início do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil ocorreu no século XVI e, mostrou grande expansão econômica quando os engenhos disseminaram para região Nordeste (MARIN; NASSIF, 2013). Posteriormente, os engenhos se expandiram para região Sudeste, com destaque para São Paulo. A cana-de-açúcar tornou-se a principal atividade econômica do país até o século XVII. Com o fim da escravidão iniciou-se a transição do trabalho escravo para o assalariado, durante esse período foram instalados os engenhos centrais e implantação de ferrovias subsidiadas pelo governo, aos poucos os engenhos centrais foram substituídos pelas usinas (SHIMADA, 2013). Em 1975, devido aos elevados preços do petróleo foi criado o Programa Nacional do Alcool (Proálcool), que tinha como objetivo principal substituir os combustíveis derivados do petróleo pelo álcool, além de diminuir a dependência de combustíveis de outros países (STOLF; OLIVEIRA, 2020).

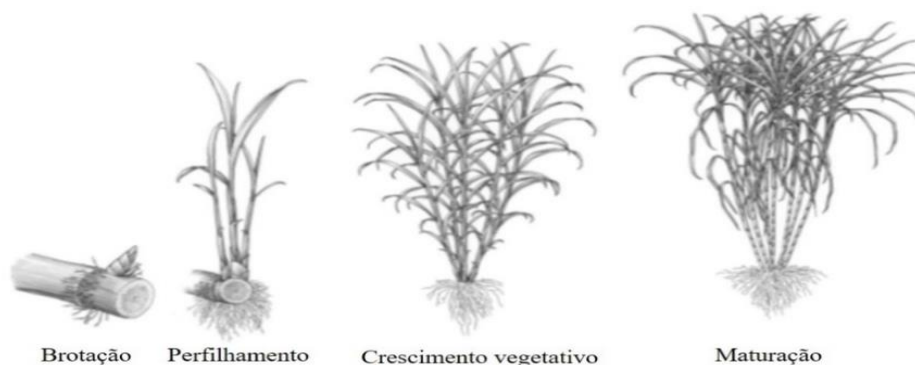
Atualmente o Brasil é uma das maiores potências em produção de cana-de-açúcar do mundo, sua extensa área cultivável e condições climáticas favoráveis, permitem ao país grande produção e alta competitividade no mercado (CONAB, 2019). Durante a safra 2019/2020 foram colhidos mais de 642,7 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Destaca-se ainda o aumento na produção da região Nordeste, com cerca de 49,1 milhões de toneladas colhidas, um aumento de 10,6% em relação à safra anterior (CONAB, 2020). A região de Rio Largo, AL, ocupa a 9ª posição no ranking dos municípios produtores de cana-de-açúcar no estado de Alagoas, com 9000 ha de área plantada (IBGE, 2020), a maior parte em regime de sequeiro.

2.1.2 Crescimento e desenvolvimento

A cana-de-açúcar nativa cresce de forma ereta e seu desenvolvimento ocorre em forma de touceiras formando perfilho em sua base, a parte aérea é constituída por folhas, caules, inflorescências e sementes, os rizomas e raízes completam a parte subterrânea da planta (MELO, 2020; MARAFON, 2012).

O desenvolvimento da cana-de-açúcar é dividido em quatro fases, sendo elas: brotação, perfilhamento, crescimento, maturação. A brotação representada na Figura 1, inicia de 7 a 10 dias após o plantio, em seguida ocorre o enraizamento dos toletes e a emergência dos primeiros brotos após 30 dias do plantio. A fase de perfilhamento, ocorre em torno de 40 dias após a emergência, podendo estender-se até 120 dias, sendo e também sensível às variações de temperatura e umidade (BRUNINI, 2017).

Figura 1. Estádios fenológicos da cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de CHEAVEGATTI-GIANOTTO, 2011.



Após a fase do perfilhamento, inicia-se fase de crescimento dos colmos que pode durar em torno de 270 dias, sendo a fase mais importante devido alto acúmulo de matéria seca e seu crescimento pode ser limitado principalmente por efeitos do estresse hídrico (BRUNINI, 2017; GRECCO, 2016; ABREU et al. 2013). A fase de maturação é caracterizada pela concentração de sacarose nos colmos e menor atividade de crescimento e ocorre aproximadamente após 270 dias do plantio, sendo ideal que ocorra pouca disponibilidade hídrica para forçar o repouso fisiológico e o enriquecimento em sacarose (BRUNINI, 2017; BARBOSA, 2015; ABREU et al., 2013; INMAN-BAMBER & SMITH, 2005).

2. 1. 3 Condições edafoclimáticas e requerimento hídrico

Por ser cultivada em diversas regiões do Brasil, a cana-de-açúcar é cultivada tanto em solos arenosos como em solos argilosos. As características dos solos mais propícios ao cultivo são:

“Solos profundos, com textura variando de média a argilosa, bem drenados, destacando-se os Latossolos e Argissolos em relevo plano a suave ondulado, podendo também alcançar produtividades satisfatórias em Neossolos Flúvicos, Cambissolos Flúvicos, Gleissolos Háplicos e Gleissolos Melânicos quando drenados artificialmente” (EMBRAPA, 2012, p.35).

As condições de clima favoráveis à cultura são regiões com clima tropical, quente e úmido, a temperatura do ar entre 19 e 32° C (PANIGRAHI, 2007). As faixas ideais de temperatura mudam de acordo com a fase de desenvolvimento da cultura, temperaturas acima dos 20°C intensificam a taxa de crescimento e entre 25°C a 33° favorecem o desenvolvimento vegetativo (ALMEIDA et al., 2008), ao passo que temperaturas abaixo dos 21°C, durante a fase de maturação favorecem o acúmulo de sacarose (AUDE, 1993).

O consumo de água pode variar entre 1500 a 2500 mm sendo variável durante os estádios fenológicos e influenciado pelas condições climáticas, período de plantio e cultivares, diminuindo após cada ciclo de corte (cana-planta e cana soca) (ABREU, 2013; DA SILVA et

al., 2012; DOORENBOS e KASSAM, 1979). Da Silva et al. (2012), avaliaram o consumo hídrico durante as fases de desenvolvimento em região semiárida com uso de irrigação e obtiveram os valores de: 50mm na fase I, 299 mm fase II, 1211 mm fase III e 147 na fase IV com suspensão da irrigação, que totalizou 1707 mm.

Outro fator de extrema importância é a precipitação pluvial, Teodoro et al. (2015), observaram que mesmo a precipitação sendo maior que a evapotranspiração da cultura ocorreu escassez de água devido a irregularidade na distribuição das chuvas.

2.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração consiste na transferência de água para atmosfera, através do processo simultâneo de transpiração das plantas e evaporação da água no solo (CRUZ et al., 2017).

São utilizadas as seguintes definições para a evapotranspiração: evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura (ET_c) e evapotranspiração real (ETR). A ETP foi discutida por diversos autores entre eles: Thornthwaite, Carmargo, Mather e Pernman. Pernman conceituou a ETP como o consumo de água de uma superfície vegetada, em crescimento ativo, sem restrição hídrica, Thornthwaite e Mather complementa que a vegetação padrão é uma gramínea com albedo próximo a 0,25 e que o fator limitante para ETP é a disponibilidade de energia solar (PEREIRA; SEDIYAMA; NOVA, 2013). Allen et al. (1998), consideram que a ET_o ocorre em uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, resistência de superfície fixa de 70 s m^{-1} e um albedo de 0,23. A ETR representa as condições reais de evapotranspiração e, pode ocorrer com ou sem restrições hídricas. Quando não há restrição hídrica considera que a ETR é igual a ETP (PEREIRA; SEDIYAMA; NOVA, 2013).

O processo de evapotranspiração consiste na interação solo-planta-atmosfera. Exemplos dessas interações ocorre quando há estresse hídrico ou quando a demanda atmosférica é maior que a transpiração. A planta fecha seus estômatos para diminuir a perda de água e reduz as trocas gasosas, e consequentemente afeta a produtividade da cultura (VIANA E SENTELHAS 2014; CRUSCIOL et al., 2010). A partir da necessidade de compreender as relações solo-planta-atmosfera e impactos no crescimento e produtividade das culturas, as técnicas de modelagem vêm sendo amplamente utilizadas no setor agrícola.

Gonçalves, Costa e Marin (2022), utilizaram a modelagem para simular 25 cenários de resposta da produtividade da cana-de-açúcar a reposições da ET_c e quantidade da palhada em 12 regiões do Brasil. De acordo com os autores citados anteriormente “os dados modelados e de campo apresentaram concordância em relação à umidade do solo e às variáveis biométricas e fisiológicas, alcançando uma forte eficiência de modelagem”.

Atualmente existem diversos métodos de estimativa da evapotranspiração, sendo a FAO-56 o método padrão. A evapotranspiração de uma determinada cultura pode ser obtida pelo produto ET_o pelo coeficiente de cultura (K_c) específicos para o local (DINGRE; GORANIWAR, 2020). O K_c , é um coeficiente adimensional que varia com o estágio de crescimento, área foliar, clima e frequências de irrigação (PEREIRA; SEDIYAMA; NOVA, 2013; DOORENBOS e KASSAM, 1979). Allen et al. (1998), recomenda o K_c para cana-de-açúcar em ambientes de clima subúmidos valores de 0,40 estágio inicial, 1,25 estágio médio e 0,75 estágio final. Dingre e Gorantiwar (2020), obtiveram valores de K_c para os estádios inicial, médio e final de 0,70, 1,20 e 0,78 respectivamente. Por ser um coeficiente que incorpora tanto os efeitos do clima como as características da cultura, o K_c é um parâmetro importante na programação da irrigação. Entretanto, os valores de K_c utilizados em áreas irrigadas, são aqueles recomendados pela FAO-56 que muitas vezes difere das condições climáticas do local (SILVA; BORGES; ALBURQUERQUE, 2014). Em vista disso, diversos métodos para

obtenção de valores de K_c adequado as condições climáticas do local tem sido fonte de pesquisas como: lisímetro (NEVES et al. 2023), índice de área foliar (Silva et al. 2013), balanço de energia (Martins et al. 2022).

2.3 Modelagem da água no solo

A disponibilidade hídrica e temperatura do ar são os principais fatores ambientais que afetam o crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura da cana-de-açúcar (VIANNA; SENTELHAS, 2014). Dessa maneira é necessário a quantificação da água no solo ao longo do ciclo de cultivo para auxiliar na tomada de decisões, principalmente em regiões onde há cultivo em sequeiro. Diversos métodos são utilizados para determinação da umidade do solo, por exemplo, sonda de nêutrons, método gravimétrico, técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) (ALBERTO, 2008). Entretanto, esses métodos tornam-se onerosos e apresentam dificuldades para calibração do equipamento.

Desse modo, a simulação do balanço de água no solo (BAS) a partir da modelagem é uma alternativa para estimar o conteúdo de água no solo (PANIGRAHI; PANDA, 2003). De acordo com Dourado Neto et al. (1998), os modelos devem ser descritos de forma simples para que sejam compreensíveis e de fácil manuseio, sem perder a confiabilidade dos resultados. Atualmente existem vários modelos de balanço de água no solo, entre eles: AQUACROP-FAO66, DSSAT, K_c dual FAO56 e Thornthwaite e Mather (ThM). Alguns modelos tornam-se mais complexos que outros e, demandam maior número de parâmetros e dados de entrada para simular o conteúdo de água no solo (ALBERTO, 2008).

2.3.1 Modelagem inversa

De acordo com Silva Junior (2015), a modelagem inversa não é algo novo, no entanto a aplicação e implementação em ambientes de modelagem computacional ainda é algo recente. Os métodos de problemas inversos consistem em definir uma função, denominada função objetivo em que se deseja diminuir os erros/desvios entre os dados observados por amostragem e os estimados por um determinado sistema (SILVA JUNIOR, 2015).

Pesquisas recentes com utilização de modelagem inversa para obtenção de parâmetros ajustados referentes ao solo e da cultura têm sido desenvolvidos por: MARTINS et al. (2022), para ajustes de coeficientes da cultura, Mehdinejadiani, Fathi e Khodaverdiloo (2020), para obter parâmetros para o dimensionamento de tubos de drenagem, Scherger, Zanello e Lexou (2020), para obter parâmetros das propriedades hidráulicas do solo, Ferreira et al. (2020), para obtenção de parâmetros da equação de Richards.

2.3.2 Modelo Thornthwaite e Mather

Inicialmente, o método de balanço de água no solo foi proposto por Thornthwaite (1948) com propósito de realizar a classificação climática. O método considerava que a água no solo é fornecida para atender a demanda da evapotranspiração, posteriormente o suprimento da sua capacidade de armazenamento e em seguida a água do solo excede sua capacidade e ocorre o escoamento (FURTADO, 2017). Mather em (1955), modificou o modelo inicial proposto por Thornthwaite (1948), ao considerar que a capacidade de armazenamento do solo é variável devido às propriedades físicas de cada solo na profundidade do sistema radicular da planta (FURTADO, 2017). Após essas modificações o método ficou conhecido como método de Thornthwaite e Mather (1955).

Entre os modelos de balanço de água no solo, o modelo de Thornthwaite e Mather é o mais utilizado, por necessitar de dados simples de entrada (capacidade de água disponível,

evapotranspiração potencial e precipitação). Esse modelo permite estimar ETR, excedente e déficit hídrico (DOURADO-NETO et al., 2010; PEREIRA, 2005).

O balanço hídrico pode ser aplicado em diversas áreas como: caracterização agroclimática, caracterização hidrológica para gestão dos recursos hídricos, classificação climática e planejamento agrícola (PASSO, ZAMBRZYCKI e PEREIRA, 2017; DE MEDEIROS et al., 2015; DOURADO-NETO et al., 2010).

Para aplicação em cultivos agrícolas há necessidade de adaptação do modelo. Lyra et al. (2010), consideraram que a capacidade de água disponível não depende apenas das características do solo (capacidade de campo e ponto de murcha permanente) mas também das características da cultura (coeficiente de cultivo, estágio de desenvolvimento), principalmente do sistema radicular, os mesmos, consideraram que a capacidade de água disponível (CAD), varia à medida que o sistema radicular da planta se desenvolve.

Por apresentar resultados satisfatórios e baixa exigência de dados de entrada, o modelo Thornthwaite e Mather tem sido utilizado em vários cultivos e regiões diferentes (AMARAL, 2022). Barros et al. (2021), a partir do balanço hídrico adaptado, estimaram a ETR para pastagens e obtiveram melhores resultados em períodos de maior volume precipitação.

2.3.3 Modelo K_c -dual FAO-56

A *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) no boletim 24, propôs metodologia para estimativa da evapotranspiração de referência e coeficiente da cultura, entretanto, esse método superestimava a ET_o . Com o objetivo de atualizar o método proposto no boletim 24 foi criado boletim 56, o qual traz a revisão e atualização dos procedimentos para estimativa da evapotranspiração de referência e da cultura a partir da abordagem do K_c único e K_c dual (Allen et al., 1998).

O método K_c dual permite a estimativa em escala diária da transpiração da cultura e evaporação da água do solo através do balanço hídrico na superfície do solo (FURTADO, 2017), em que a transpiração é representada pelo coeficiente basal da cultura K_{cb} e a evaporação pelo coeficiente K_e (Allen et al., 1998).

O K_{cb} é obtido quando a evaporação do solo é mínima, mas mantendo umidade adequada na zona do sistema radicular, quando o teor de água na zona radicular não consegue atender a demanda da transpiração o K_{cb} é penalizado pelo coeficiente de estresse hídrico K_s (ALLEN et al., 2005; DE MEDEIROS e ARRUDA, 1999).

O coeficiente K_e pode ser obtido pelo balanço hídrico diário na camada superficial do solo (ALLEN et al., 1998), sendo necessário o conhecimento de dois parâmetros físicos do solo: capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) (DA SILVA, 2013). A condição de CC ocorre quando o solo atinge o máximo do seu armazenamento após ações das forças capilares do solo e gravitacional. Enquanto isso, PMP ocorre quando o nível de armazenamento atinge valores críticos e a planta não consegue retirar a água retida nos poros do solo, esses valores limitam os pontos máximo e mínimos da capacidade de armazenamento de água do solo (COSTA, 2020). Outro aspecto a ser considerado no cálculo do K_e é o sistema de irrigação, pois ele determina a fração de área molhada do solo passível de evaporação. Após eventos de precipitação ou irrigação o K_e pode atingir valores elevados, entretanto a soma dos dois coeficientes K_{cb} e K_e não pode exceder o K_{cmax} , sendo este regulado pela energia disponível para evapotranspiração (SHAHROKHANIA E SEPASKHAH, 2013; FANDINO et al., 2012).

Wang et al. (2020), constataram que em regiões de clima sub-úmido seco com cultivo de milho, a evaporação da água do solo durante o estágio inicial é responsável por 78% a 85% da evapotranspiração (ET) e durante a fase de desenvolvimento a evaporação diminui gradualmente de 3 mm d⁻¹ para 1 mm d⁻¹.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área e manejo da cultura.

O município de Rio Largo está localizado no estado de Alagoas, na região Nordeste do Brasil. O clima predominante na região pela classificação de Thornthwaite e Mather, é quente e úmido (B1), megatérmico (A'), com deficiência de água moderada no verão (s) e grande excesso de água no inverno (w2) (SILVA et al., 2015). A precipitação pluvial média anual é 1789,5 mm. O período chuvoso concentra-se entre abril e agosto com 70% do total anual, enquanto o período seco ocorre entre outubro e fevereiro (SOUZA et al., 2004). As médias climatológicas da temperatura média do ar é 25,4 °C e umidade relativa do ar média de 81,8% (FERREIRA JUNIOR et al., 2014).

O solo da área estudada é classificado Latossolo Amarelo distrocoeso argissólico com textura média argilosa e topografia plana (FERREIRA JUNIOR et al., 2014). Quando o solo é mantido na capacidade de campo e ponto de murcha, apresenta valores de umidade volumétrica 0,2445 m³.m⁻³ e 0,1475 m³.m⁻³, respectivamente (CARVALHO, 2003).

O plantio da cana-de-açúcar, variedade RB867515, foi realizado em 25/03/2013, com espaçamento combinado (1,4 x 0,4 m). O preparo do solo antes do plantio consistiu em subsolagem, gradagem e a adubação utilizada foi 52 kg ha⁻¹ de N, 143 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 130 kg ha⁻¹ de K₂O.

3.2 Medidas meteorológicas e da umidade do solo

Os dados meteorológicos para simulação dos modelos de balanço de água no solo foram obtidos na área experimental do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (09° 29' 45" S; 35°49' 54" W; 127 m) em Rio Largo, AL. Foram coletados dados diários de temperatura do ar máxima e mínima (°C), umidade relativa do ar máxima e mínima (%), velocidade do vento (m s⁻¹) e precipitação pluvial (mm d⁻¹). As variáveis meteorológicas foram medidas por um sistema automático de aquisição de dados (Micrologger – 21 CR1000, Campbell Scientific, Logan, Utah), que armazenava as médias em intervalos de 10 minutos, durante o período de 25/03/2013 a 25/03/2014, que totalizou um período de 366 dias.

Para as medidas de umidade volumétrica do solo, foram utilizadas sondas do tipo TDR (*Time Domain Reflectometry*) nas profundidades de 0-30 cm. Os sensores foram conectados a um sistema automático de aquisição de dados (CR3000, Campbell Scientific, Inc., Logan, USA) e os valores medidos foram armazenados em médias de 5 min, durante o período de 07/06/2013 a 18/11/2013. A calibração foi realizada pelo Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar, da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), (DA ROCHA et al., 2014)

3.3 Estimativa da evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada pelo método Penman-Monteith, FAO-56 (Allen et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \left(\gamma \frac{900}{T+273}\right) U_2(e_s - e_a)}{\Delta + [\gamma(1+0,34U_2)]} \quad (1)$$

em que, R_n é o saldo de radiação total diário à superfície (MJ m⁻² d⁻¹), G densidade de fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹), T é temperatura do ar (°C), u₂ velocidade do vento a 2m de altura (m

s⁻¹), e_s pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa), e_a pressão atual do vapor d'água do ar (kPa), Δ declividade da curva de pressão de vapor (kPa °C⁻¹) e γ coeficiente psicométrica (kPa °C⁻¹). O roteiro para cálculo das variáveis necessárias para estimativa da ET_o encontra-se no anexo I.

3.4 Evapotranspiração Real- Balanço de energia-Razão de Bowen

A evapotranspiração real (ET_r) foi determinada pelo método do balanço de energia Razão de Bowen (BERB). Foi instalada uma torre micrometeorológica dentro da área experimental circundada por diversas variedades de cana-de-açúcar com aproximadamente a mesma idade e práticas de manejo. A torre foi instalada na direção predominante do vento, considerando um “fetch” de 1:100 (BALDOCCHI et al., 2003). Foram utilizados dois sensores de umidade relativa e temperatura do ar (HMP45C, Campbell Scientific, Logan, Utah). Os sensores foram instalados em uma torre micrometeorológica em dois níveis, 0,25 m acima do dossel da cultura e 3,20 m acima do primeiro sensor.

As medidas de irradiância solar global (R_g), refletida (R_r), irradiância de ondas longas emitida pela superfície (R_s) e atmosfera (R_a) foram realizadas por meio de um saldo radiômetro (CNR1, Kipp & Zonen, Holanda) conectado a um sistema de aquisição de dados automático (CR3000, Campbell Scientific, Inc., Logan, USA) programado para armazenar medidas em médias de 5 min. O balanço de ondas longas foi calculado pela diferença entre R_a e R_s, enquanto o balanço de ondas curtas foi calculado pela diferença entre R_g e R_r. O R_n foi obtido pela diferença entre o balanço de ondas curtas e balanço de ondas longas.

O BERB é baseado na lei de conservação de energia e quando aplicado ao sistema-solo-planta-atmosfera pode ser expresso pela seguinte equação (MARTINS, et al., 2021):

$$R_n - G - H - LE = 0 \quad (2)$$

em que, R_n é o saldo de radiação (W m⁻²), G é o fluxo de calor no solo (W m⁻²), H é fluxo de calor sensível (W m⁻²) e LE fluxo de calor latente (W m⁻²).

A razão de Bowen é definida pela razão entre H e LE, e foi determinada por:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{T_e} = \gamma \frac{t_1 - t_2}{e_{a1} - e_{a2}} \quad (3)$$

em que, ΔT e Δe_a são as diferenças de temperatura do ar (°C) e da pressão atual de vapor do ar (kPa) nos dois níveis de medição, t₁ e t₂ é a temperatura nos dois níveis, γ é coeficiente psicométrico, e_{a1} e e_{a2} são as pressões atmosféricas (kPa) nos dois níveis de medição.

A pressão atual de vapor do ar e a pressão de saturação do vapor d'água foram obtidas pelas equações abaixo:

$$e_a = e_s \frac{UR}{100} \quad (4)$$

em que, e_s é a pressão de saturação do vapor d'água (kPa) e UR umidade relativa do ar (%).

$$e_s = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T}{T + 237,3} \right] \quad (5)$$

em que: T é a temperatura do ar média em cada nível.

Os fluxos de calor LE e H foram calculados pela seguintes equações:

$$LE = \frac{(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (6)$$

$$H = \frac{\beta}{1 + \beta} (R_n - G) \quad (7)$$

A evapotranspiração horária do BERB foi obtida pela equação abaixo e a ETR diária foi obtida por integração ao longo do dia:

$$ET = \frac{LE}{\lambda} 3600 \quad (8)$$

em que: λ é o calor latente de evaporação ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$).

A análise de critério para seleção dos dados foi realizada seguindo metodologia proposta por Perez et al. (1999). Foram descartados dados do início da manhã e período da noite e dados de β que estavam dentro do intervalo $-1 - |\varepsilon| < \beta < -1 + |\varepsilon|$, no qual ε é dado pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{\delta\Delta e + \gamma\delta\Delta T}{\Delta e} \quad (9)$$

em que $\delta\Delta e$ e $\delta\Delta T$ são a precisão dos sensores que medem o gradientes de pressão de vapor de água ($0,03\text{kPa}$) e temperatura do ar ($0,2^\circ\text{C}$).

As condições em que o método BERB produz resultados consistentes foram baseados na relação fluxo-gradiente pelo critério de Perez et al. (1999), pela seguinte equação:

$$\frac{\Delta e}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{H} = \frac{\Delta e + \gamma\Delta T}{R_n - G} > 0 \quad (10)$$

3.5 Balanço de água no solo Thornthwaite e Mather

O método consiste em calcular as entradas e saídas de água no solo, para este estudo foi considerado como fonte de entrada a precipitação e como variável de saída ETR.

O balanço de água no solo de Thornthwaite e Mather pode ser descrito pela equação abaixo (LYRA et al., 2010):

$$ALT = (ARM_i - ARM_{i-1}) = (P + I) - ETR_i - EXC_i \quad (11)$$

em que, ALT a alteração do armazenamento de água no solo (mm), ARM é o armazenamento de água no solo (mm), P é a precipitação pluvial (mm), I irrigação (mm), ETR evapotranspiração real (mm) e ECX corresponde ao excedente hídrico (mm).

Para calcular o ARM leva-se em consideração as seguintes condições:

$$\text{Se } (P+I) - ET_c < 0$$

$$ARM = CAD_i * \text{EXP}(\text{NEG. ACM}_i) / CAD_i \quad (12)$$

$$\text{Se } (P+I) - ET_c \geq 0$$

$$ARM = ARM_{i-1} + (P + I - ET_c) \quad (13)$$

O negativo acumulado foi calculado pelas equações abaixo:

$$\text{Se } (P+I) - ET_c < 0$$

$$\text{NEG. ACM} = \text{NEG. ACM}_{i-1} + (P + I - ET_c) \quad (13)$$

$$\text{Se } (P+I) - ET_c \geq 0$$

$$\text{NEG. ACM} = CAD_i * \ln (ARM_i / CAD_i) \quad (14)$$

A capacidade de água disponível (CAD), foi calculada pela equação:

$$CAD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) * Z * 1000 \quad (15)$$

em que, θ_{cc} é a capacidade de campo (mm), θ_{pmp} é o ponto de murcha permanente (mm), Z é a profundidade efetiva do sistema radicular da planta (m).

De acordo com Allen et al.(1998), a profundidade do sistema radicular pode ser obtida em função do K_c , considerando o comprimento dos estádios de crescimento da cultura.

$$Z_{r,i} = \frac{K_c - K_{c_ini}}{K_{c_int} - K_{c_ini}} (Z_{r,x} - Z_{r,n}) + Z_{r,n} \quad (16)$$

em que: K_c coeficiente de cultura corrigido; K_{c_ini} coeficiente de cultura inicial; K_{c_int} coeficiente de cultura intermediário; $Z_{r,x}$ profundidade máxima efetiva do sistema radicular da cultura (m); $Z_{r,n}$ profundidade inicial efetiva do sistema radicular da cultura (m). Devido aos dados de umidade serem medidos até a profundidade de 0,3 m foram atribuídos os valores de 0,1m para $Z_{r,n}$ e 0,3m para $Z_{r,x}$. Durante a fase final o Z_r foi considerado constante e igual a Z_{rx} .

Para determinar o coeficiente de cultura durante a fase de crescimento foi considerado o ciclo de 366 dias dividido em fase inicial (50 dias), fase de crescimento (103 dias), médio (162 dias) e final (50 dias). Os ciclos foram ajustados de acordo com as fases determinadas por Martins et al. (2021). Após estabelecido os comprimentos dos estádios foi calculado o K_c pela equação abaixo:

$$K_c = K_{c_ini} \quad \text{para } t < L_{ini}$$

$$K_c = \frac{K_{c_ini} + (t - L_{ini})}{L_{cres}(K_{c_mid} - K_{c_ini})} \quad \text{para } t < (L_{ini} + L_{cres}) \quad (17)$$

$$K_c = K_{c_mid}$$

$$K_c = \frac{K_{c_med} + (t - (L_{ini} + L_{cres} + L_{mid}))}{L_{fim}(K_{c_fim} + K_{c_int})} \quad \text{para } t < (L_{ini} + L_{cres} + L_{mid}) \quad (18)$$

em que, L_{ini} é o comprimento do estágio inicial (dia), L_{cres} comprimento do estágio de crescimento(dia), L_{int} é o comprimento do estágio intermediário (dia), L_{fim} é o comprimento do estágio final (dia), t é o tempo.

Os modelos foram processados com dados de K_c recomendados pelo boletim da FAO-56, sendo eles $K_{c_ini}=1,15$, $K_{c_med}=1,20$ e $K_{c_fim}= 0,75$ e com dados de K_{c_med} e K_{c_fim} ajustados de acordo com as condições climáticas do local pela equação abaixo:

$$K_c = K_{c(tab)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (19)$$

em que, $K_{c(tab)}$ coeficiente de cultura tabelado, u_2 velocidade do vento (ms^{-1}) a 2 m, RH_{min} é a umidade relativa mínima (%) e h é a altura da cultura no estágio de desenvolvimento (m).

A evapotranspiração da cultura ET_c foi obtida pela equação abaixo:

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (20)$$

em que, K_c é coeficiente de cultivo, e ET_o evapotranspiração de referência (mm).

Após as estimativas da ET_c foi calculado o déficit e excedente hídrico, considerou-se excedente quando o solo atingiu sua máxima capacidade de armazenamento de água, ou seja, quando excede a capacidade de campo. O excedente foi calculado a partir das condições abaixo Se $P_i - ET_{ci} < 0$

$$EXC_i = 0 \quad (21)$$

$$\text{Se } P_i - ET_{ci} \geq 0$$

$$EXC_i = P_i - ET_{c_i} - ALT_i \quad (22)$$

Quando a água disponível no solo não é capaz de atender a demanda de evapotranspiração da cultura ocorre o déficit hídrico, que foi calculado pela equação abaixo:

$$DEF_i = ET_{c_i} - ETR_i \quad (23)$$

em que: DEF deficiência hídrica (mm).

A evapotranspiração real foi estimada seguindo as condições abaixo:

Se $P_i - ET_{c_i} < 0$

$$ETR_i = P_i - ALT_i - EXC_i \quad (24)$$

Se $P_i - ET_{c_i} \geq 0$

$$ETR_i = ET_c \quad (25)$$

Teoricamente a água está disponível para as plantas até o ponto de murcha, entretanto a absorção de água pela cultura é reduzida antes do ponto de murcha ser atingido. Quando a água do solo está abaixo de um determinado limite a planta demanda mais energia para extrair água e começa a ser penalizada entrando em déficit hídrico. Esse limite é definido como água facilmente disponível e pode ser calculado pela seguinte equação:

$$AFD = (1 - f)CAD \quad (26)$$

em que, f é o fator de disponibilidade de água no solo. O FAO-56 considera o valor de 0,55 para cana-de-açúcar.

Foi realizado a conversão do ARM para unidade volumétrica ($m^3.m^{-3}$) pela equação abaixo

$$\theta = \frac{ARM}{1000 * Z_r} + \theta_{PMP} \quad (27)$$

3.6 Balanço de água no solo K_c dual (FAO-56)

Esse método calcula de forma separada os efeitos da transpiração e evaporação da água do solo na evapotranspiração (Allen et al., 1996), sendo representada pela equação abaixo:

$$ET_c = K_c * ET_o = (K_{cb} + K_e) * ET_o \quad (28)$$

em que, K_{cb} é o coeficiente basal da cultura, K_e é o coeficiente de evaporação da água no solo e ET_o é evapotranspiração de referência (mm).

A parcela que corresponde a transpiração da cultura é representada pelo coeficiente K_{cb} . O K_{cb} foi ajustado de acordo com as condições climáticas local pela equação abaixo:

$$K_{cb} = K_{cb(tab)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (29)$$

em que, $K_{cb(tab)}$ coeficiente de cultura basal tabelado, u_2 velocidade do vento (m/s) a 2 m, RH_{min} umidade relativa mínima (%).

A parcela referente a evaporação da água no solo é representada pelo coeficiente de evaporação (K_e). Quando o solo se mantém úmido após eventos de irrigação ou chuva o valor

de K_e será máximo e seu valor será reduzido a medida que o solo seca. K_e foi estimado pela equação abaixo:

$$K_e = K_r(K_{cb_max} - K_{cb}) \leq f_{umd} K_{cb_max} \quad (30)$$

em que, K_r é o coeficiente de redução da evaporação do solo, K_{cb_max} limite superior diária da evaporação e da transpiração da superfície cultivada e f_{umd} fração do solo exposto.

Quando o solo se mantém na capacidade de campo a evaporação da água do solo exposto será determinada apenas pela energia disponível e supõe-se que a evaporação da água no solo será máxima, logo K_r será igual a 1. Quando a umidade do está abaixo da água facilmente evaporável (AFE) a taxa de evaporação é reduzida na proporção da quantidade de água residual da camada superficial do solo e K_r será reduzido de 1 a 0. Nesta fase K_r pode ser estimado pela equação:

$$K_r = 1$$

$$De < AFE$$

$$K_r = \max\left(\frac{CAE - D_{e,i-1}}{CAE - AFE}\right), 0 \quad De > AFE \quad (31)$$

em que, CAE é a capacidade de água evaporável (mm), AFE água facilmente evaporável (mm), $D_{e,i-1}$ é a depleção da camada superficial do solo no final do dia anterior (i-1).

A AFE varia de acordo com a classe textural do solo, esses valores variam de 2 a 12 mm e são obtidos pela recomendação do boletim FAO-56. De acordo com a classe textural e recomendações da FAO, foi utilizado o valor de 8 mm para o AFE.

A quantidade de água que pode ser evaporada durante um ciclo completo de secagem será estimada por:

$$CAE = 1000(\theta_{cc} - 0,50_{pmp})Z_e \quad (32)$$

em que, CAE é a capacidade de água evaporável (mm), Z_e é a profundidade da camada superficial do solo, ou seja, que está sujeita a evaporação, θ_{cc} é o conteúdo de água do solo na capacidade de campo (m^3m^{-3}), θ_{pmp} é o conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente (m^3m^{-3}).

A estimativa do K_e requer o cálculo do balanço hídrico diário da camada superficial do solo para estimar a depleção em condições de umidade: A depleção é estimada por:

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{umd}} + T_{ew,i} + DP_{e,i} \quad (33)$$

em que, P_i é a precipitação no dia (mm), RO_i é o escoamento superficial no dia (mm), I_i é a altura da lâmina de irrigação no dia (mm), E_i é a evaporação no dia (mm), $T_{ew,i}$ é a transpiração da camada exposta e molhada da camada superficial do solo (mm), $DP_{e,i}$ é a percolação da superfície do solo (mm) e f_w é a fração média da superfície do solo molhada pela precipitação ou irrigação.

A quantidade precipitação perdida por escoamento depende da intensidade da precipitação, tipo de solo e da declividade do terreno (ALLEN et al., 1996). Em condições de declividade menor que 2% pode-se considerar o escoamento igual a zero.

Quando o teor de umidade do solo decai a um valor limite, a água do solo não é transportada com facilidade suficiente para atender a demanda de água da cultura então a mesma começa a sofrer estresse por déficit hídrico. O K_s é o coeficiente que representa os efeitos do estresse hídrico do solo sobre uma cultura. Este coeficiente é determinado por:

$$K_s = \frac{CAD - D_r}{CAD - AFD} = \frac{CAD - D_{r,z}}{(1 - p)CAD} \quad (34)$$

em que, CAD é a capacidade total de água disponível total na zona radicular (mm), AFD água do solo facilmente disponível na zona radicular (mm), $D_{r,z}$ é a depleção na zona radicular (mm) e p é a fração de AFD.

O cálculo do balanço hídrico diário na zona radicular é expressado em termos de depleção de água a partir da equação abaixo:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - CR_i + ET_c + DP_i \quad 0 \leq D_{r,i} < CAD \quad (35)$$

em que, $D_{r,i}$ depleção na zona radicular ao fim do dia i (mm), $D_{r,i-1}$ depleção na zona radicular ao fim do dia i-1, CR_i é a ascensão capilar do lençol freático no dia i (mm), DP_i é a perda de água por percolação profunda (mm), RO é o escoamento superficial no dia (mm), P é a precipitação (mm).

Quando a água no solo está abaixo da capacidade de campo não ocorre drenagem, logo DP_i será zero. Se ocorre percolação o excesso de água por percolação profunda será estimado por:

$$DP_i = (P_i - RO_i) + I_i - ET_{c,i} - D_{r,i} \quad (36)$$

O total de água armazenada entre a zona radicular e a depleção estimada ao final do dia é definida por:

$$ARM = (CAD - D_{z,o}) \quad (37)$$

Após obtenção do ARM em mm foi realizado a conversão em umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$) pela equação 26.

3.7 Coeficiente de cultura experimental

O coeficiente de cultura experimental foi obtido pela razão entre ETR e ET_o em dias que não ocorreram déficit. Nessa condição, por definição $ETR = ET_c$ e, assim $K_c = ET_c / ET_o$. Foram considerados dias sem déficit, quando a fração da umidade do solo (FDA) foi inferior ou igual a 0,8. A FDA foi obtida pela equação abaixo:

$$FDA = \frac{\theta_i - \theta_{pmp}}{\theta_{cc} - \theta_{pmp}} \quad (38)$$

em que: θ_i é a umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$) no dia i.

3.8 Otimização dos modelos

A otimização dos modelos foi realizada a partir da ferramenta *Estimate* do software *OpenModel* seguindo o método de Metropolis-Hastings. O método de Metropolis-Hastings é um método de Cadeia de Markov Monte Carlo. O método consiste em gerar um valor a partir de uma sequência de amostras aleatórias por uma distribuição auxiliar e aceitar com uma dada probabilidade.

A otimização resulta em ajustar os parâmetros K_c médio para o modelo de Thornthwaite e Mather, K_{cb} médio e fator f para o modelo K_c dual. Esses parâmetros refletem os efeitos da transpiração das plantas, evaporação da água no solo e a disponibilidade de água no solo para a cultura sem que ocorra estresse hídrico.

3.9 Análise estatística

O desempenho dos modelos ThM e K_c dual-FAO56, foi avaliado para estimativa da ETR e umidade volumétrica. As avaliações foram realizadas a partir dos índices de Willmott (1985) (d_m), coeficiente de determinação (r²) e raiz quadrada média do erro (RQME). O índice de Willmott indica a exatidão do modelo e coeficiente de determinação a precisão, ambos variam de 0 a 1, em que 0 indica sem exatidão e 1 exatidão perfeita para o índice de Willmott e 0 sem precisão e 1 precisão perfeita para o coeficiente de determinação (r²). Foram considerados como valores observados (O_i) a ETR obtida por BERB ou umidade volumétrica obtida pelo monitoramento com TDR. Os valores obtidos pelos modelos foram considerados como os valores estimados (P_i).

Willmott (2006)

$$d_m = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \right] \quad (39)$$

em que, P_i valores estimados pelo modelo, O_i valores observados, $\bar{P}$ médias dos valores estimados, $\bar{O}$ média dos valores medidos.

Coeficiente de determinação (r²)

$$r^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (40)$$

A RQME é um índice que indica a qualidade dos modelos a partir da diferença entre os dados observados e estimados, sendo assim quanto menor a diferença melhor será a qualidade do modelo.

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (41)$$

Foi determinado também a porcentagem dos tipos de erros relacionados aos modelos (sistemático e não sistemático). O erro não sistemático pode calculado pela equação abaixo:

$$MSE_u = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)^2}{N} \quad (42)$$

Os erros sistemáticos são frequentes e podem fazer que os valores estimados fiquem acima ou abaixo do valor medido, o que pode prejudicar a exatidão dos dados. O erro sistemático pode ser dividido em sistemático aditivo, interdependente e proporcional. Sendo calculado pela equação abaixo:

$$MSE_s = MSE_a + MSE_p + MSE_i \quad (43)$$

em que, MSE_a é o erro sistemático aditivo, MSE_p é o erro sistemático proporcional, MSE_i é o erro sistemático interdependente.

O erro sistemático aditivo foi calculado por:

$$MSE_a = a^2 \quad (44)$$

em que, a é o coeficiente linear regressão entre o valor estimado e observado (P= a + bO).

O erro sistemático proporcional foi calculado a partir da equação:

$$MSEp = (b - a)^2 \left[\frac{\sum_i^N o^2}{N} \right] \quad (45)$$

em que, b é o coeficiente angular da regressão entre o valor estimado e observado.

O erro sistemático interdependente foi calculado por:

$$MSEi = 2a(b - 1) \bar{O} \quad (46)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Condições meteorológicas

Durante o período do experimento a temperatura do ar média foi 25° C ($\pm 1,3$) com extremos diários de 17,8 °C (fase média) e 34,1 °C (fase inicial) (Figura 2, A). A precipitação total foi de 1651,0 mm (figura 2, B), sendo que 50,5% (833,0 mm) da precipitação total se concentrou durante a fase de crescimento (Figura 2, B). A precipitação durante as fases inicial, intermediária e final correspondeu a 16,4% (270,2 mm), 26,6% (439,6 mm) e 6,6% (108,2mm) total observado ao longo do ciclo.

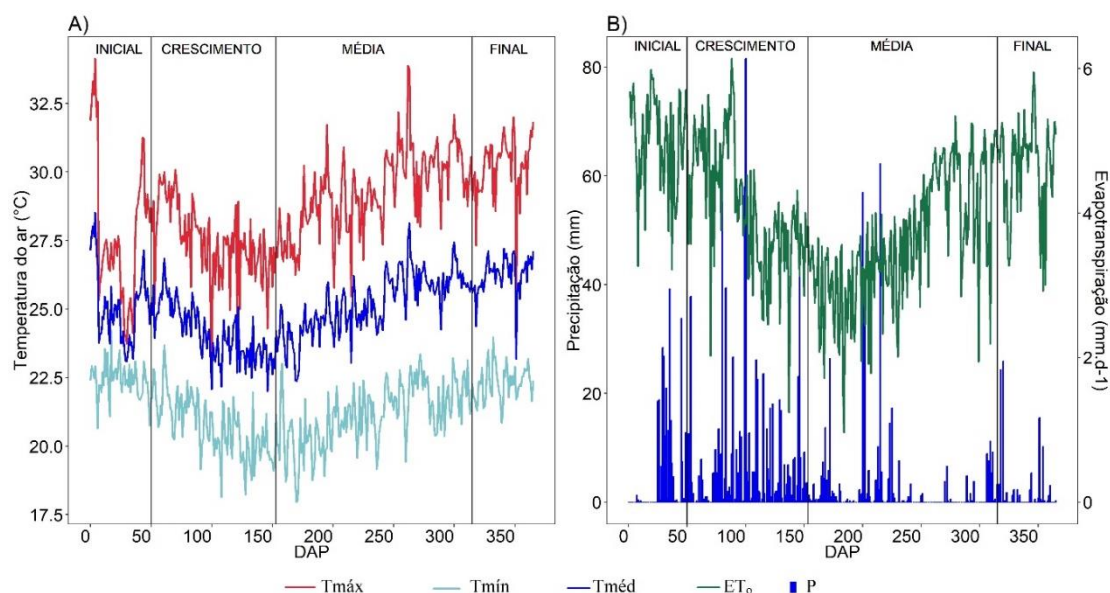


Figura 2. a) Valores diários de temperatura máxima, mínima, média b) precipitação e evapotranspiração de referência durante o período de cultivo da cana-de-açúcar em Rio Largo, AL.

A frequência de precipitação entre as fases inicial, média e final foram similares e, de aproximadamente, um evento a cada 2 dias, entretanto, a magnitude dos eventos de precipitação diminuiu da fase inicial até a fase final (Tabela 1). Devido ao menor número de dias de chuva e menor acumulado de precipitação, a fase final apresentou menor magnitude de precipitação em comparação as outras fases. Durante a fase de crescimento a ocorrência de precipitação foi inferior à observada nas demais fases (um evento a cada 1,2 dias) que totalizou 88 dias com precipitação e magnitude de 9,5 mm dia⁻¹.

Tabela 1. Precipitação (mm) acumulada, frequência, magnitude, dias de chuva e evapotranspiração de referência subdivida por estádios.

	Precipitação			Dias chuva (dias)	ET _o	
	Acumulado (mm)	Frequência	Magnitude		Acumulado (mm)	Média (mm d ⁻¹)
Inicial	270,2	2,0	10,8	25	194,4	3,9
Crescimento	833,0	1,2	9,5	88	320,0	3,1
Médio	439,6	2,0	5,5	80	731,4	4,5
Final	108,2	2,1	4,5	24	239,5	4,7
Total	1651,0			217	1485,4	

Frequência = número de eventos/total de dias, magnitude = total de precipitação/número de eventos.

Observaram-se maiores acumulados de ET_o durante as fases de crescimento e média, 320,0 e 731,4 mm respectivamente e menores na fase inicial (194,4 mm) e final (239,5 mm), (Tabela 1). O máximo diário de ET_o (6,1 mm d⁻¹) ocorreu durante a fase inicial (DAP 5) (Figura 1, b) e menor (1,0 mm d⁻¹) na fase de crescimento (DAP 101). A evapotranspiração total foi inferior a precipitação. De acordo com Silva et al. (2015), em períodos de maior precipitação a evapotranspiração é menor devido à redução da radiação solar, que é atenuada pela maior nebulosidade no período chuvoso.

4.2 Coeficientes da cultura e basal otimizados

Na Figura 3 são apresentados os valores diários do coeficiente de cultura (K_c) observados durante a fase de crescimento e média. Observou-se durante a fase de crescimento aumento do K_c experimental e menor variação entre os valores na fase média, mantendo assim padrão similar ao FAO-56. Durante as fases de crescimento e média o K_c variou entre 0,39 e 0,93, sendo que os maiores valores se concentraram durante a fase de crescimento mesmo período em que ocorreu maior volume e frequência de precipitação. Durante a fase de crescimento, houve o aumento do K_c de 0,47 para 0,93. Padrão similar foi observado por Silva et al. (2012), em que o K_c variou de 0,85 para 1,0. De acordo com os autores esse aumento ocorre devido ao incremento de área foliar da cultura durante a fase.

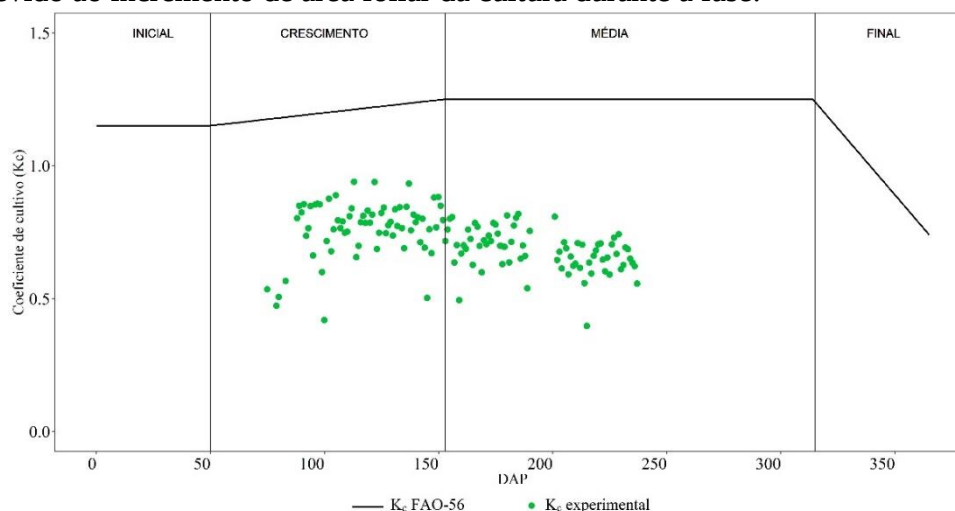


Figura 3. Valores diários do coeficiente da cultura FAO-56 e K_c experimental durante a fase de crescimento e média da cana-de-açúcar.

Os valores de K_c ajustados, otimizados com ETR e umidade volumétrica foram inferiores aos valores da FAO-56 em 5,6, 28 e 69,6%, respectivamente (Tabela 2). Valores inferiores ao da FAO-56 foram observados em outras pesquisas. Martins et al. (2022), e da Silva et al. 2012 obtiveram valores de K_c na fase média inferiores ao da FAO-56 em 16% (1,05) e 12,0% (1,10) para cana-de-açúcar, respectivamente. De acordo com Dingre e Gorantiwar (2020), as diferenças dos valores do K_c em relação aos valores estabelecidos pela FAO-56 estão associadas ao tipo de clima, solo e variedade da cultura.

Tabela 2. Coeficientes da cultura, coeficientes da cultura basal e fator de disponibilidade de água (f), propostos pela FAO-56, ajustado, otimizados com ETR e umidade volumétrica

Modelo	Coeficientes	FAO-56	Ajustado	Otimizado com ETR	Otimizado com umidade volumétrica
ThM	$K_{c\text{ ini}}$	1,15	-	-	-
	$K_{c\text{ med}}$	1,25	1,18	0,90	0,38
	$K_{c\text{ fim}}$	0,75	0,71	-	-
Kc dual	$K_{c\text{ ini}}$	0,15	-	-	-
	$K_{c\text{ med}}$	1,20	1,13	0,89	1,04
	$K_{c\text{ fim}}$	0,70	0,66	-	-
	f	0,55	-	0,23	0,25

O K_c médio (0,90) e K_{cb} médio (0,89) otimizado com ETR foi 14,3% e 15,3% inferior ao obtido por Martins et al. 2022, (1,05 e 1,03) em condições de clima megatérmico úmido, com moderado déficit hídrico no verão e excesso de água no inverno. O K_{cb} otimizado com ETR e umidade volumétrica foram inferiores aos valores propostos pela FAO-56 em 25,8% e 13,3%, respectivamente.

A otimização do parâmetro f que representa a fração de água disponível na zona radicular retornou a valores inferiores ao da FAO-56 em 58,2 % para o otimizado com ETR e 54,5% quando otimizado com umidade volumétrica. Valores distintos ao da FAO-56 eram esperados após a otimização pois, esse parâmetro varia de acordo com o tipo de solo e variedade cultivada. Furtado (2017), em cultivo de milho em solos de textura franco argilo-arenoso obteve valor mínimo de f (0,20) em período com maior taxa de ET_c . De acordo com Furtado (2017), a disponibilidade de água na zona radicular é maior em períodos com baixa ET_c quando comparado com períodos com alta taxa de ET_c .

4.3 Simulações dos modelos para estimativa da ETR

Observou-se que as estimativas dos modelos apresentaram padrão de variação similar ao observado durante a fase de crescimento, exceto o modelo de ThM otimizado com umidade volumétrica que subestimou a ET_c e ETR (Figura 4). Maiores diferenças entre o observado e estimado pelos modelos ocorrem entre o DAP 184 A 197.

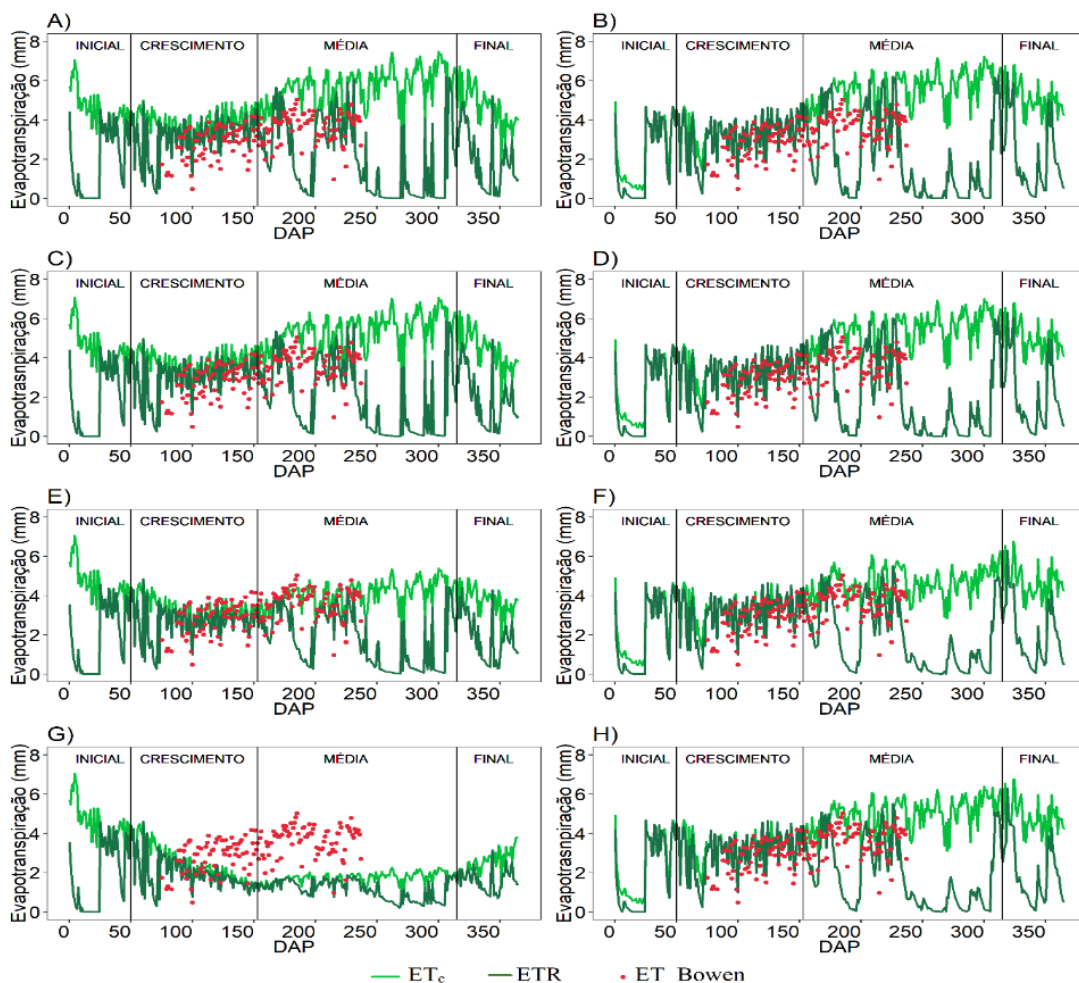


Figura 4. Valores diários de evapotranspiração obtida por Bowen, da cultura e real estimado pelo modelo de a) Thornthwaite e Mather com dados de K_c tabelado, b) K_c dual dados de K_c tabelado, c) Thornthwaite e Mather dados de K_c ajustado, d) K_c dual dados de K_c ajustado, e) Thornthwaite e Mather dados de K_c otimizado com ETR, f) K_c dual dados de K_c otimizado com ETR, g) K_c dual dados de K_c otimizado com umidade volumétrica. h) K_c dual dados de K_c otimizado com umidade volumétrica.

Observou-se aumento da ET_c durante a fase de crescimento e redução durante a fase final (Figura 4). A diferença de padrão da ET_c (Figura 4, G) simulada pelo modelo de ThM pode estar relacionada ao baixo valor do K_c obtido após a otimização.

Durante a fase de crescimento ocorreram menores diferenças entre ET_c e ETR, pois durante o período houve maior disponibilidade de água para cultura, devido ao maior volume e frequência de precipitação. No entanto, maiores diferenças entre ET_c e ETR foram observadas na fase média e final. Durante a fase final foi observado a redução da ETR e ET_c , de acordo com Allen et al. (1998), essa redução ocorre devido ao processo de senescência das culturas, enquanto ETR foi influenciada também pela menor disponibilidade de água para cultura.

A Tabela 3 apresenta os valores acumulados de ETR e ET_c por fases de desenvolvimento estimada pelos modelos de Thornthwaite e Mather e K_c dual. Os maiores acumulados de ETR e ET_c ocorreram nas fases de crescimento e média para os dois modelos. A ETR total estimada pelo modelo K_c dual foi superior ao modelo ThM em todos os ajustes realizados. As diferenças entre as estimativas da ETR pelos modelos podem estar associadas a forma de penalização dos modelos a evapotranspiração. O modelo de ThM começa a penalizar a ETR quando a umidade está abaixo da capacidade de campo de forma exponencial (FURTADO, 2017). O modelo K_c

dual penaliza a evapotranspiração quando a umidade do solo encontra abaixo da AFD. Após o consumo de água na zona radicular da cultura excede a AFD e a cultura limita-se a valores de evapotranspiração menores que os potenciais e assim a evapotranspiração reduz proporcionalmente à quantidade remanescente na zona radicular (ALLEN et al., 1995).

Tabela 3. Valores de evapotranspiração real e da cultura acumulada por estádios de desenvolvimento estimada pelos modelos de Thornthwaite e Mather e K_c dual.

		Tabelado		Ajustado		Otimizado ETR		Otimizado umidade volumétrica	
		ETR	Etc	ETR	Etc	ETR	Etc	ETR	Etc
ThM	Inicial	90,5	223,6	90,5	223,6	89,7	223,6	89,7	223,6
	Crescimento	315,5	384,0	306,9	372,8	271,0	327,9	199,2	244,8
	Médio	322,8	914,3	316,2	863,1	283,2	657,6	182,6	276,6
	Final	99,0	236,9	97,8	223,9	94,7	190,5	82,1	130,8
	Total	827,7	1758,7	811,4	1683,3	738,6	1399,5	553,6	875,9
K_c dual	Inicial	96,2	115,4	96,2	115,4	95,3	115,2	95,4	115,3
	Crescimento	324,2	340,1	322,8	338,3	315,3	333,8	315,3	335,0
	Médio	317,9	897,9	316,7	869,1	296,4	746,6	292,3	800,1
	Final	103,2	255,1	103,3	250,0	102,2	237,9	101,7	245,7
	Total	841,6	1608,5	839,0	1572,7	809,2	1433,5	804,7	1496,1

4.4 Análise de desempenho dos modelos para estimativa da ETR em escala diária

4.4.1 Modelo de Thornthwaite e Mather

Observou-se maior precisão da estimativa na condição $P-ET_c \geq 0$ (0,81 a 0,83) (Figura 5 A, B e C) após otimização com ETR. A maior dispersão dos dados foi observada na condição de $P-ET_c < 0$.

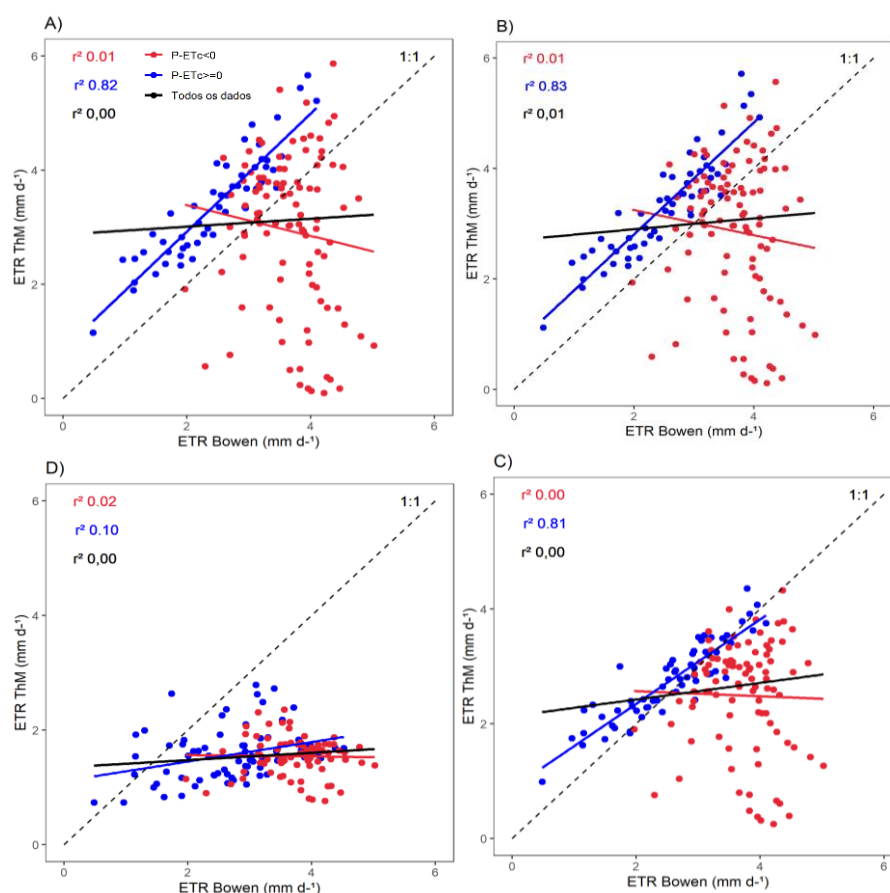


Figura 5. Análise de regressão linear entre os valores de ETR Bowen estimados pelo modelo de Thornthwaite e Mather com dados de a) K_c tabelado b) ajustado c) otimizado com ETR d) otimizado com umidade volumétrica.

Em ambos os ajustes houve subestimativa da ETR na condição de $P-T_c < 0$. Barros et al. (2021), em estudos com modelo de ThM para estimativa da ETR em cultivo de pastagem observaram no período de menor frequência de precipitação maior dispersão entre os dados. De acordo com Barros et al. (2021), a subestimação dos valores da evapotranspiração podem estar associadas ao tipo de solo da região. Em solos onde o lençol freático é alto pode haver contribuição através de ascensão capilar, que não é contabilizado no modelo de ThM.

Na condição de $P-ET_c \geq 0$, houve superestimativa quando utilizado dados tabelados no FAO-56, dados ajustados e subestimativa quando otimizado com umidade volumétrica (Figura 5A, B e D). Após a otimização dos parâmetros com ETR, os dados apresentaram proximidade maior conforme a reta 1:1. No entanto, quando otimizado com umidade volumétrica houve subestimativa da ETR para as duas condições analisadas.

Após a otimização dos parâmetros foi observado pouca variação da precisão. Martins et al. (2021) também não obtiveram melhoria na precisão após otimização do modelo de ThM e K_c dual, mas após otimização, a exatidão aumentou de 0,44 para 0,75. O mesmo foi observado neste estudo. A exatidão aumentou em todas as condições analisadas após otimização com ETR. Quando comparado com dados tabelados no FAO-56 o melhor desempenho do modelo foi obtido quando otimizado com ETR para a condição em que $P-ET_c \geq 0$, a exatidão aumentou de 0,32 para 0,75 e RMSE reduziu de 1,05 mm dia⁻¹ para 0,41 mm dia⁻¹ (Tabela 4). O menor desempenho do modelo ThM foi obtido quando otimizado com umidade volumétrica, pois obteve valores de precisão e exatidão inferiores a 0,33 e subestimação da ETR de 2,30 mm d⁻¹.

Tabela 4. Índices de desempenho estatístico modelo de Thornthwaite e Mather para estimativa da ETR em escala diária.

		r^2	d_m	RMSE	RMSE%	MSEs %	MSEu %
Tabelado	Todos	0,00	0,32	1,51	46,56	28,63	71,37
	P - $ET \geq 0$	0,82	0,32	1,05	42,36	84,21	15,79
	P - $ET < 0$	0,01	0,23	1,71	46,70	36,71	63,29
Ajustado	Todos	0,01	0,35	1,45	44,52	31,88	68,12
	P - $ET \geq 0$	0,83	0,50	0,90	36,12	82,21	17,79
	P - $ET < 0$	0,01	0,25	1,68	45,63	49,77	50,23
Otimizado ETR	Todos	0,02	0,42	1,31	40,20	57,15	42,85
	P - $ET \geq 0$	0,81	0,75	0,41	15,99	50,64	49,36
	P - $ET < 0$	0,00	0,26	1,67	44,76	67,37	32,63
Otimizado Teta	Todos	0,02	0,27	1,93	59,31	95,55	4,45
	P - $ET \geq 0$	0,10	0,33	1,41	52,13	90,48	9,52
	P - $ET < 0$	0,00	0,17	2,30	61,40	97,87	2,13

A otimização do modelo ThM com umidade volumétrica aumentou o erro sistemático. A otimização a partir da umidade volumétrica para o modelo de ThM não foi eficiente, por apresentar baixa precisão, exatidão e alto erro sistemático. De acordo com Barros et al. (2021), os altos valores de erros sistemáticos podem estar relacionados ao K_c . Após a otimização com ETR foi observado redução do erro sistemático apenas na condição de $P-ET_c \geq 0$ (Tabela 4).

4. 4. 2 Modelo K_c dual

O modelo K_c dual apresentou melhor precisão na condição de $P-ET_c \geq 0$ (Figura 6). A maior dispersão entre os dados foi observada na condição de $P-ET_c < 0$ quando K_s estava entre 0,0 e 0,5, ou seja, quando a cultura estava em condição de déficit hídrico.

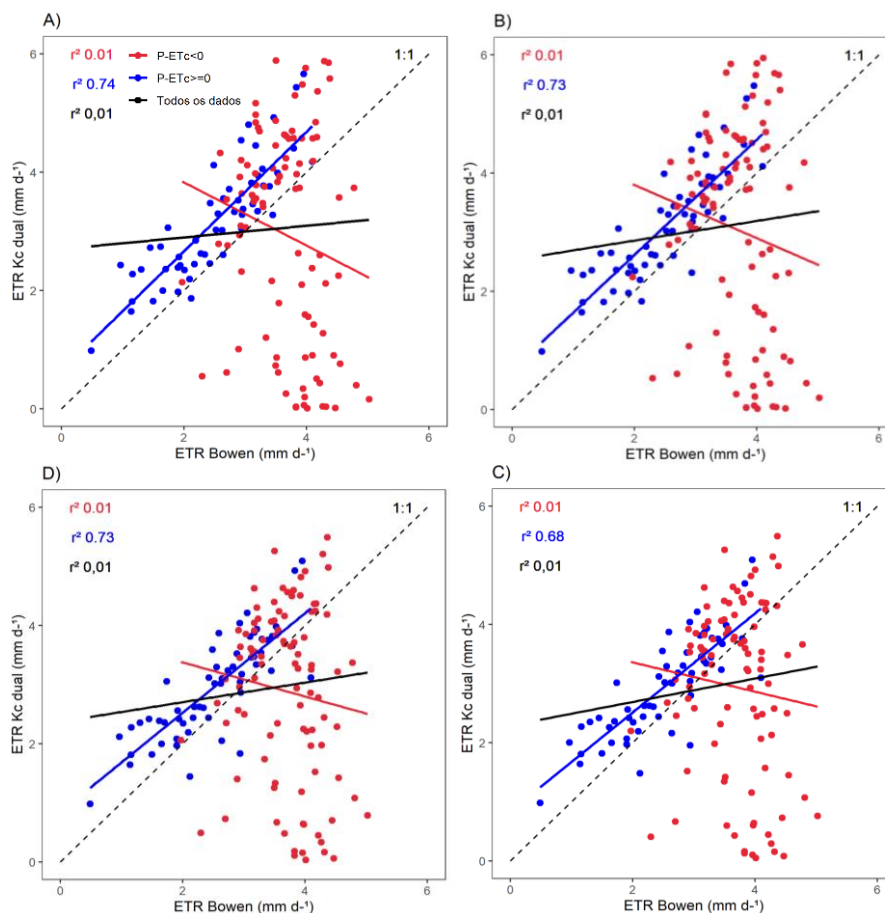


Figura 6. Análise de regressão linear entre os valores de ETR Bowen estimados pelo modelo K_c dual-FAO 56 com dados de a) K_c tabelado b) ajustado c) otimizado com ETR d) otimizado com umidade volumétrica.

Após otimização do modelo com ETR a precisão para condição de $P-ET_c \geq 0$ reduziu de 0,74 para 0,68 (Tabela 5). A exatidão aumentou após otimização com ETR e umidade para todas as condições, exceto na condição $P-ET_c$ em que a exatidão se manteve em 0,19. Quando comparado com dados tabelados no FAO-56 o melhor desempenho do modelo foi obtido quando otimizado com ETR. O menor desempenho do modelo K_c dual foi obtido quando utilizados dados tabelados no FAO-56 para condição de todos os dados e $P-ET_c < 0$.

Os altos valores de erros não sistemáticos contribuíram para baixa precisão do modelo na condição de todos os dados e $P-ET_c < 0$. Similar ao modelo de ThM a redução do erro sistemático ocorreu na condição de $P-ET_c \geq 0$.

Os modelos de ThM e K_c dual apresentaram maior precisão e exatidão quando otimizados com ETR na condição de $P-ET_c \geq 0$. No entanto, o modelo K_c dual apresentou desempenho superior ao modelo de ThM quando otimizado com umidade volumétrica. O menor desempenho do modelo de ThM em relação ao K_c dual otimizado com umidade volumétrica pode estar relacionado ao valor do K_c obtido após otimização com umidade volumétrica.

Tabela 5. Índices de desempenho estatístico do modelo de K_c dual para estimativa da ETR em escala diária.

		r^2	d_m	RMSE	RMSE%	MSEs %	MSEu %
Tabelado	Todos	0,01	0,35	1,76	54,12	17,39	82,61
	P - $ET \geq 0$	0,74	0,33	0,84	33,32	64,12	35,88
	P - $ET < 0$	0,01	0,19	2,10	57,13	22,95	77,05
Ajustado	Todos	0,01	0,36	1,71	52,53	17,95	82,05
	P - $ET \geq 0$	0,73	0,58	0,78	31,29	60,18	39,82
	P - $ET < 0$	0,01	0,19	2,05	55,78	31,54	68,46
Otimizado ETR	Todos	0,02	0,41	1,47	45,30	27,01	72,99
	P - $ET \geq 0$	0,68	0,61	0,65	26,07	47,99	52,01
	P - $ET < 0$	0,01	0,23	1,79	48,42	33,65	66,35
Otimizado Teta	Todos	0,01	0,35	1,76	51,56	28,57	71,43
	P - $ET \geq 0$	0,73	0,57	0,84	27,05	47,25	52,75
	P - $ET < 0$	0,01	0,19	2,10	69,32	18,13	81,87

4.5 Análise de desempenho dos modelos para estimativa da ETR em escala decencial

O modelo de ThM apresentou maior proximidade dos dados à reta 1:1, com precisão e exatidão de 0,78 e 0,80 respectivamente, o que indicou melhor correlação direta entre os valores (Figura 7, A). Foi observado superestimativa apenas do modelo K_c dual (Figura 7, B).

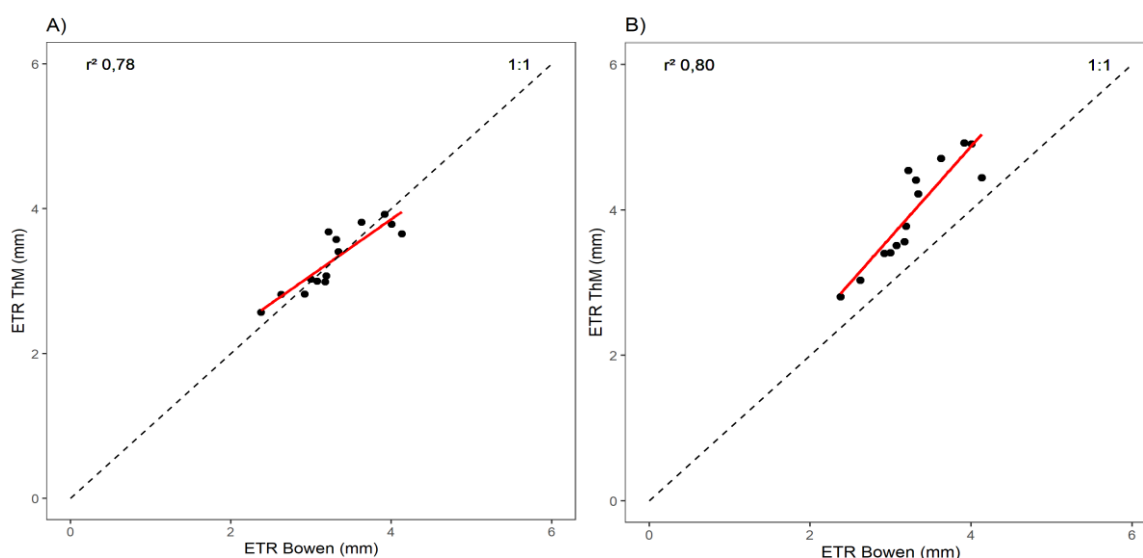


Figura 7. Análise de regressão linear entre os valores de ETR Bowen estimados pelo modelo de a) Thornthwaite e Mather, b) K_c dual em escala decencial.

Ao realizar as simulações em escala decencial foi observado aumento da precisão, exatidão e redução do erro médio quadrado para os dois modelos (Tabela 6). A precisão do modelo de ThM aumentou de 0,02 (escala diária otimizado ETR) para 0,78 em escala decencial. O modelo K_c dual aumentou a precisão de 0,01 (escala diária otimizado ETR) para 0,80. O modelo de ThM obteve menor porcentagem de erro médio e maior exatidão em relação ao K_c dual. O modelo K_c dual apresentou maior contribuição de erro sistemático.

Tabela 6. Índices de desempenho estatístico modelo de Thornthwaite e Mather e K_c dual para estimativa da ETR em escala decendial.

	r ²	d _m	RMSE	RMSE%	MSEs %	MSEu %
ThM	0,78	0,98	0,23	6,99	23,04	76,96
Kc dual	0,80	0,41	0,77	23,41	84,21	15,79

Ao comparar o desempenho dos modelos em escala diária e decendial foi observado melhor desempenho dos modelos para as simulações em escala decendial. O melhor desempenho do modelo de ThM em escala decendial pode estar associado ao modelo ter sido desenvolvido inicialmente em escala de tempo maiores com a finalidade de caracterização climática e identificação de períodos de deficiência e excedente hídrico. Outro fator a ser considerado é que alguns processos podem ser melhor simulados ou representados nos modelos em intervalos de tempo maiores que diário.

De acordo com Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007) a escala de tempo adotada deve ser compatível com o objetivo da utilização do balanço hídrico. Os métodos de irrigação mais utilizados em áreas de cultivo de cana-de-açúcar são por aspersão. Nesses sistemas podem ser aplicados turnos de regas maiores. De acordo com Lyra et al. (2010), o modelo de ThM é indicado para manejo de irrigação de baixa frequência e alta intensidade. Desta forma, os modelos de ThM e K_c dual em escala decendial torna-se uma ferramenta para auxiliar o manejo de irrigação em áreas com solo e culturas que necessitam de maiores intervalos entre irrigações.

4.6 Simulação dos modelos para estimativa da umidade volumétrica

Os dois modelos retornaram valores de umidade similar até a fase de crescimento, após esse período a umidade estimada pelo modelo ThM foi menor que a simulada pelo Kc dual e próxima ao ponto de murcha permanente (DAP 239 a 306) (Figura 8). A umidade volumétrica estimada pelos modelos ThM e K_c dual apresentaram padrão similar ao estimado durante a fase média. Foram observadas diferenças máximas entre os dois modelos de 0,02 m³m⁻³, DAP 258 (Figura 8 A, B e C).

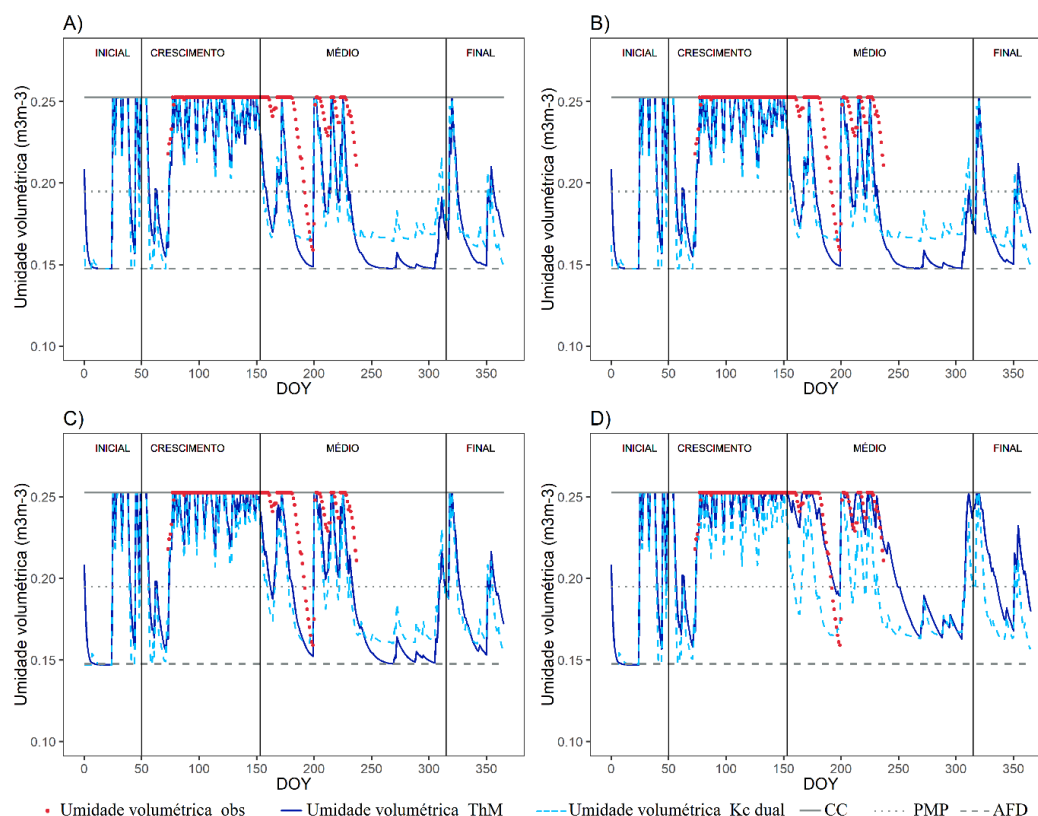


Figura 8. Variação diária da umidade volumétrica observada, e estimada pelos modelos de ThM e Kc dual com dados tabelados (a), ajustados (c), otimizados com ETR e (d) otimizados com umidade volumétrica.

Na fase inicial a umidade volumétrica permaneceu abaixo da água facilmente disponível por 24 dias para o modelo ThM (DAP 2 a 25) e 25 dias para o modelo K_c dual (DAP 0 a 25). Devido à alta frequência e totais de precipitação durante a fase de crescimento, a umidade permaneceu em 86% dos dias acima da AFD (Figura 8, A, B, C e D). A umidade durante a fase média e de crescimento sofreu grandes variações, permanecendo por 82 dias consecutivos abaixo da AFD. A depender da variedade e fase em que a cultura se encontra, o déficit hídrico pode comprometer seu crescimento, desenvolvimento e a produtividade da cultura (Abreu et al. 2015). Abreu et al. (2015) observaram que o déficit hídrico no período inicial da cana-planta afetou o desenvolvimento, porém o déficit hídrico ao final do ciclo em níveis adequados favorece a produção de sacarose (ARAÚJO; ALVES JUNIOR; CASAROLI; EVANGELISTA, 2016, INMAN-BAMBER e SMITH, 2005).

Foi observado em ambos os modelos a superestimação da umidade volumétrica após a recarga de água no solo pela precipitação. Esse fato foi verificado quando a umidade volumétrica estimada passou de 0,149 m³.m⁻³ para 0,253 m³.m⁻³ (DAP 201) por ocorrência de uma precipitação de 56,9 mm d⁻¹ antecedida de 10 dias com precipitação inferior a 3 mm.d⁻¹. A umidade volumétrica medida foi 0,159 e 0,175 m³.m⁻³ DAP 200 e 201, respectivamente. Superestimativa da umidade volumétrica também foi observada por Melo (2020), em solo de textura argilosa em cultivo de cana-de-açúcar pelo modelo SWAP/WOSFOST. De acordo com o autor em períodos de elevada precipitação há tendência do modelo superestimar a umidade do solo e subestimar em períodos de menor frequência de precipitação. Furtado (2017), em solo de textura franco argilo-arenoso com cultivo de milho observou que os modelos de Thornthwaite e Mather e K_c dual tendem a subestimar a umidade volumétrica após recarga do solo pela precipitação e superestimar após período de secamento. Da Rocha et al. (2014), em

estudos com milho em solo de textura arenosa observaram que o método FAO-56 e método de penalização do K_s logarítmica apresentam maiores erros de estimativa em períodos prolongados de déficit hídrico.

4.7 Desempenho dos modelos para estimativa da umidade volumétrica em escala diária

4.7.1 Modelo de Thornthwaite e Mather

A maior precisão entre os dados foi observada após a otimização dos parâmetros com umidade volumétrica para a condição de $P-ET_c < 0$ (Figura 9, D). O modelo subestimou a umidade quando estimado com dados tabelados, ajustados e otimizados com ETR.

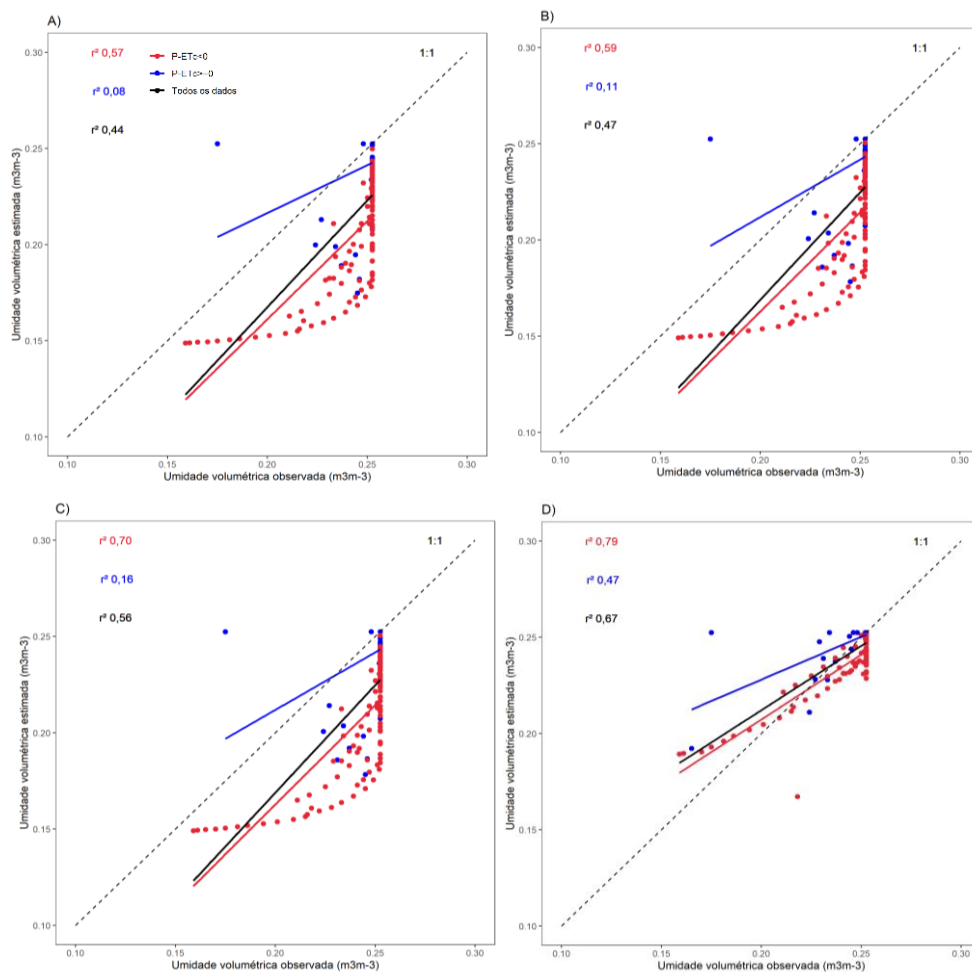


Figura 9. Análise de regressão linear entre os valores de umidade volumétrica estimada pelo modelo de Thornthwaite e Mather com dados de a) K_c tabelado b) ajustado c) otimizado com ETR d) otimizado com umidade volumétrica.

Observou-se o aumento da precisão, exatidão e redução do RMSE após os otimização com ETR e umidade volumétrica em todas as condições (Tabela 7). A maior contribuição do erro sistemático ocorreu na condição de $P-ET_c < 0$. Quando utilizado dados ajustados e após otimização houve redução da contribuição do erro sistemático.

Tabela 7. Índices de desempenho estatístico modelo de Thornthwaite e Mather para estimativa da umidade volumétrica.

		r^2	d_m	RMSE	RMSE%	MSEs %	MSEu %
Tabelado	Todos	0,44	0,36	0,0370	15,21	56,29	43,71
	P - ET ≥ 0	0,08	0,39	0,0225	9,03	20,00	80,00
	P - ET < 0	0,57	0,30	0,0428	17,79	78,91	21,09
Ajustado	Todos	0,47	0,38	0,0351	14,34	55,18	44,82
	P - ET ≥ 0	0,11	0,43	0,0215	8,66	17,65	82,35
	P - ET < 0	0,59	0,31	0,0406	16,89	78,06	21,94
Otimizado ETR	Todos	0,56	0,46	0,0268	11,01	49,06	50,94
	P - ET ≥ 0	0,16	0,53	0,0166	6,66	18,11	81,89
	P - ET < 0	0,70	0,39	0,0318	13,28	75,57	24,43
Otimizado Teta	Todos	0,67	0,72	0,0115	4,71	35,95	64,05
	P - ET ≥ 0	0,47	0,75	0,0106	4,28	58,93	41,07
	P - ET < 0	0,79	0,66	0,0122	5,09	57,27	42,73

4.7. 2 Modelo K_c dual

A melhor precisão foi observada quando otimizado com umidade volumétrica na condição de $P-ET_c < 0$ e maior dispersão na condição de $P-ET_c \geq 0$. O modelo K_c dual subestimou a umidade volumétrica em todos os ajustes realizados (Figura 10).

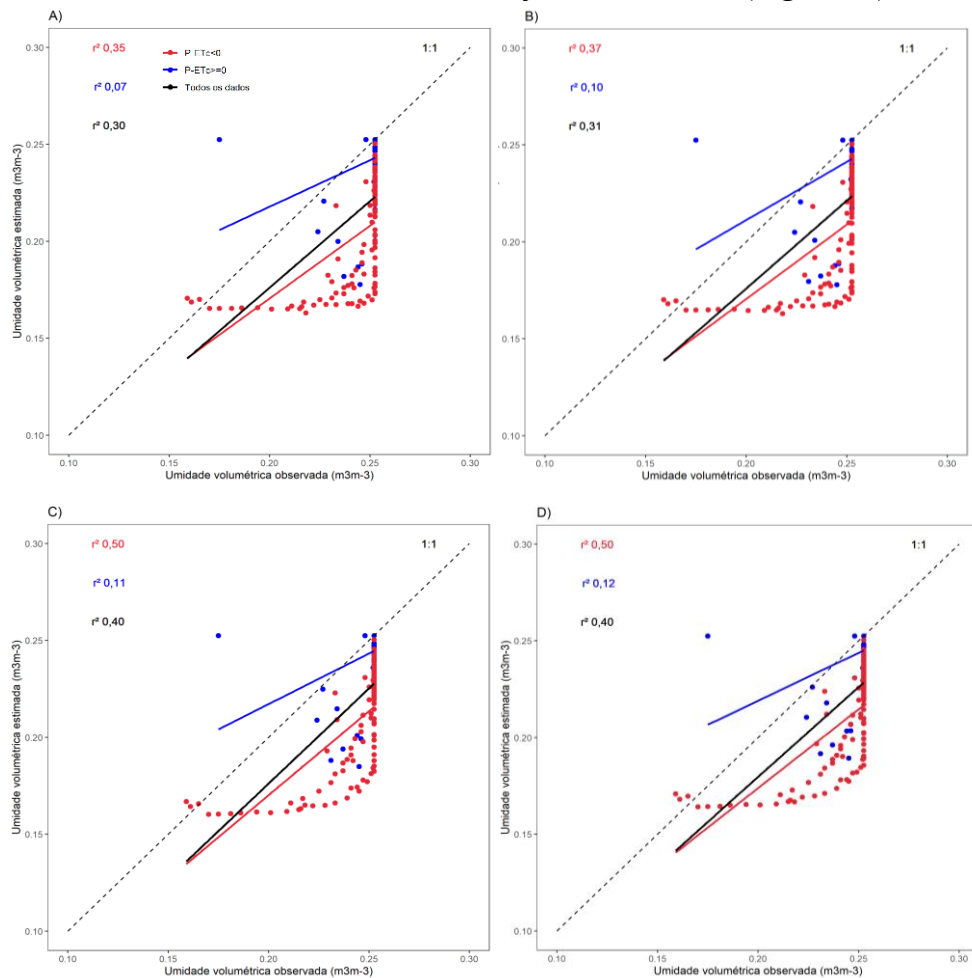


Figura 10. Análise de regressão linear entre os valores de umidade volumétrica estimada pelo modelo K_c dual com dados de a) K_c tabelado b) ajustado c) otimizado com ETR d) otimizado com umidade volumétrica.

A maior precisão foi obtida após otimização com ETR e umidade volumétrica na condição de $P-ET_c < 0$ (Tabela 8). Em média houve aumento de 13,4% da exatidão após a otimização. Houve menor diferença de desempenho entre o modelo otimizado com ETR e umidade volumétrica. O desempenho do modelo K_c dual foi inferior ao obtido por Furtado (2017) em cultivo de milho. Furtado (2017) obteve entre r^2 0,74 e 0,95, RMSE entre 0,006 e 0,009 (m^3m^{-3}) para os quatro tratamentos. Vale ressaltar que os solos possuem características diferentes.

Tabela 8. Índices de desempenho estatístico modelo de K_c dual para estimativa da umidade volumétrica.

		r^2	d_m	RMSE	RMSE%	MSE _s %	MSE _u %
Tabelado	Todos	0,30	0,35	0,0393	16,17	52,91	47,09
	P - $ET \geq 0$	0,07	0,40	0,0223	8,94	19,18	80,82
	P - $ET < 0$	0,35	0,28	0,0459	19,08	76,22	23,78
Ajustado	Todos	0,31	0,35	0,0388	15,96	52,51	47,49
	P - $ET \geq 0$	0,10	0,42	0,0228	9,16	17,15	82,85
	P - $ET < 0$	0,37	0,29	0,0452	18,80	75,18	24,82
Otimizado ETR	Todos	0,40	0,39	0,0341	14,01	52,10	47,9
	P - $ET \geq 0$	0,11	0,46	0,0187	7,53	19,50	80,5
	P - $ET < 0$	0,50	0,31	0,0403	16,78	76,47	23,53
Otimizado Teta	Todos	0,40	0,39	0,0325	14,80	51,98	48,02
	P - $ET \geq 0$	0,12	0,50	0,0177	7,12	20,74	79,26
	P - $ET < 0$	0,50	0,32	0,0384	16,00	77,19	22,81

Não foram obtidas reduções expressivas dos erros sistemáticos no modelo após otimização. O melhor desempenho dos modelos para estimativa da umidade volumétrica foi obtido após a otimização com umidade volumétrica. Entre os dois modelos o melhor desempenho foi obtido pelo ThM.

4.8 Análise de desempenho dos modelos para estimativa da umidade volumétrica em escala decendial

Em escala decendial os dois modelos apresentaram menor tendência em subestimar a umidade volumétrica (Figura 11). No entanto, os dois modelos superestimaram a umidade volumétrica quando a umidade medida esteve abaixo de $0,180 m^3m^{-3}$.

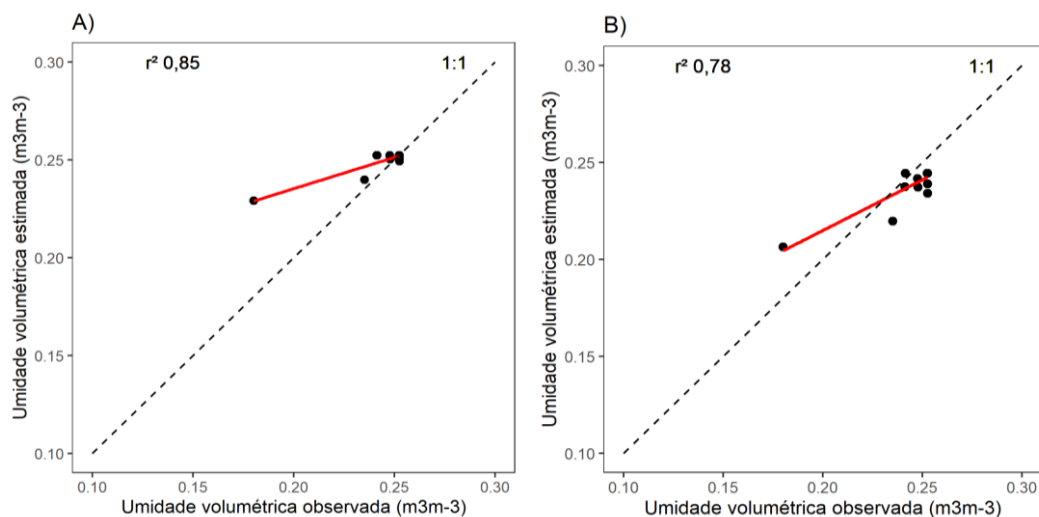


Figura 11. Análise de regressão linear entre os valores de umidade volumétrica medida e estimadas pelo modelo de a) Thornthwaite e Mather, b) K_c dual em escala decendial.

Em escala decendial houve aumento da precisão, exatidão e redução do RMSE para o modelo de ThM quando comparado em escala diária após otimização com umidade volumétrica (Tabela 9). De forma contrária foi obtido menor exatidão do modelo K_c dual em escala decendial. Os dois modelos apresentaram erros sistemáticos superior a 80%. Quando comparado as escalas os melhores resultados foram obtidos em escala decendial.

Tabela 9. Índices de desempenho estatístico modelo Thornthwaite e Mather e K_c dual para estimativa da umidade volumétrica em escala decendial.

	r^2	d_m	RMSE	RMSE%	MSEs%	MSEu%
ThM	0,85	0,66	0,0135	6,99	96,68	3,32
K_c dual	0,78	0,40	0,0117	4,79	82,11	17,89

5 CONCLUSÕES

Em escala diária, quando otimizados com ETR os modelos de Thornthwaite e Mather e K_c dual apresentam precisão e exatidão satisfatório para estimativa da ETR apenas em condições de $P - ET_c \geq 0$. Para estimativa da umidade volumétrica em escala diária, o modelo de Thornthwaite e Mather mostra, em todas as condições melhor precisão, exatidão e menores erros médio quando otimizados com umidade volumétrica.

O melhor desempenho para estimativa da ETR e umidade volumétrica foi obtido pelo modelo de Thornthwaite e Mather em escala decendial. Assim, para auxílio no manejo de irrigação da cana-de-açúcar em solos textura média argilosa recomenda-se o uso do modelo de Thornthwaite e Mather em escala decendial. Os dois modelos apresentaram menor precisão e exatidão ao estimar a evapotranspiração na condição de $P - ET_c < 0$, mesmo após a otimização dos parâmetros. Portanto, há necessidade em ajustar além dos parâmetros da cultura e do solo, avaliar outras parametrizações para penalização da ETR.

A otimização dos modelos apresentam menores erros nas estimativas da ETR e umidade volumétrica quando comparados com os ajustes recomendados no boletim-FAO 56. Desse modo, recomenda-se para estimativa da ETR a otimização dos parâmetros dos modelos a partir de dados medidos da ETR e para estimar o conteúdo de água no solo a otimização a partir de dados de umidade volumétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, T. Otimização de modelos para estimativa do armazenamento de água no solo em cultivo de feijão irrigado. p. 82. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Federal de Alagoas, UFAL, Rio Largo, 2022.
- ABREU, M. L.; SILVA, M. A.; TEODORO, I.; HOLANDA, L. A.; SAMPAIO NETO, G. D. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, v.72, p.262-270, 2013.
- ALMEIDA, Alexsandro Claudio dos Santos et al. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 1441-1448, 2008.
- ALBERTO, Cleber Maus. **Modelagem do desenvolvimento e do balanço de água no solo em trigo**. 2008. 123 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- ALLEN, Richard G. et al. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. 2005. Journal of irrigation and drainage engineering 2005 v.131 no.1 pp. 2-13
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization, 1998. 300p. Drainage and Irrigation Paper, 56.
- AUDE, Maria Isabel da Silva. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência rural**, v. 23, p. 241-248, 1993.
- BARROS, Fabiana da Costa; MARTINS, Suelen da Costa Faria; LYRA, Gustavo Bastos; SILVA, Leonardo Duarte Batista da; FRANCISCO, João Paulo; ABREU, Marcel Carvalho de; LYRA, Guilherme Bastos. Thornthwaite and mather soil water balance model adapted for estimation of real evapotranspiration of the pasture. **Revista Engenharia na Agricultura - Reveng**, [S.L.], v. 29, p. 146-156, 6 ago. 2021. Revista Engenharia na Agricultura.
- BRUNINI, Rodrigo Garcia. Índices de estresse hídrico em cana-de-açúcar nas diferentes fases de desenvolvimento. p. 97. **Tese** (Doutorado em Agronomia)- Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal, 2017.
- BARBOSA, Fernando da Silva. Produtividade de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento: interações entre variedades lâminas e intensidade do déficit hídrico na fase de maturação. **Tese** (Doutorado em Ciências). p 178. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2015.
- BALDOCCHI, D.A. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide. exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, v. 9, n. 4, p.479-492, 2003.
- CONAB**. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileira – cana-de-açúcar: Quarto levantamento, abril 2020 – safra 2019/2020. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento.

COSTA, N. G. Modelo de Feddes acoplado ao modelo Kc dual para simulação de dinâmica de água no solo em cultivos agrícolas. p. 71. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Biosistemas) - Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, UFF, Niterói, 2020

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileira – cana-de-açúcar: Quarto levantamento, abril 2019 – safra 2018/2019. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento.

CRUZ, Guilherme Henrique Terra; SANTOS, Lucas da Costa; SILVA, Sandra Máscimo da Costa; REIS, Elton Fialho dos. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Rio Verde, GO.

Carvalho, O. M: Classificação e caracterização físico-hídrica de solos de Rio-largo, cultivados com cana-de-açúcar. Rio Largo: Universidade Federal de Alagoas, 2003. 74p. Dissertação Mestrado

DINGRE, S.K.; GORANTIWAR, S.D. Determination of the water requirement and crop coefficient values of sugarcane by field water balance method in semiarid region. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 232, p. 106042, abr. 2020. Elsevier BV.

DA SILVA, A. E. Q.; DE SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; LYRA, G. B.; ENDRES, L.; SANTOS, M. V. C. Micrometeorological methods to estimate sugarcane evapotranspiration in costal northeastern region of Brazil. **Australian Journal of Crop Science**. [S.L.], n. 13092019, p. 1422-1428, 20 set. 2019.

DA SILVA, Vicente de PR; TAVARES, Alexandra L.; SOUSA, Inajá Francisco de. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo simples e dual do coentro. **Horticultura Brasileira**, v. 31, p. 255-259, 2013.

DA SILVA, Thieres GF et al. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 64-71, 2012.

DA ROCHA, A, E, Q. Fluxos de energia, água e CO₂ em cultivo de cana-de-açúcar por métodos micrometeorológicos. p. 83. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Alagoas, UFAL, Rio Largo, 2015.

DA ROCHA, A. E. Q.; LYRA, G. B.; DE SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; MEDEIROS, R. P.; TEODORO, I. Conteúdo de água no solo por reflectometria no domínio do tempo e balanço de água no solo em cultivo de milho. **IRRIGA**, v. 19, n. 2, p. 267–278, 2014.

DE MEDEIROS, Gerson Araujo; ARRUDA, Flávio Bussmeyer. Adaptação e avaliação de evapotranspirômetros para a obtenção do coeficiente de cultura basal (K_{cb}) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Irriga**, v. 3, n. 3, p. 73-80, 1998.

DOURADO-NETO, Durval et al. Principles of crop modelling and simulation: II. The implications of the objective in model development. **Scientia Agricola**, v. 55, p. 51-57, 1998.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and drainage paper**, v. 33, p. 257, 1979.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 27 jun. 2022

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Zoneamento Agroecológico do Estado de Alagoas. Potencial Pedológico do Estado de Alagoas para Culturas Agrícolas. Recife, Pernambuco. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/77202/1/Relatorio-Pot-Pedologico.pdf>. Acesso em 27 jan. 2022

FERREIRA, F. F.; LYRA, G. B.; TEMPERINI, M. O.; TELLES, W. R.; SILVA NETO, R. M. C. Modelagem inversa para obtenção de parâmetros a equação de Richards. **Cereus**, v.12 n1, 2020.

FURTADO, T. F. Comparação de modelos para estimativa do conteúdo de água no solo em cultivo de milho no município de Arapiraca, AL. p. 74. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Biosistemas) - Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, UFF, Niterói, 2017.

FERREIRA JUNIOR, Ricardo A. et al. Cana-de-açúcar com irrigação por gotejamento em dois espaçamentos entrelinhas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 798-804, 2014.

GONÇALVES, I. V. COSTA, L. G. MARIN, F. R. Simulating sugarcane yield response to ET_c replacements and green cane trash blanket maintenance in Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n8, p. 586-593, 2022.

GRECCO, Katarina Lira. Caracterização do volume de solo molhado em diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar sob gotejamento subsuperficial. **Dissertação** (Mestrado em Ciências). p 126. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

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.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção agrícola-lavoura temporária. IBGE, 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/rio-largo/pesquisa/14/10193?indicador=10246>. Acesso em: 15 set. 2021.

LYRA, Gustavo Bastos; SOUZA, José Leonaldo de; SILVA, Eduardo Cabral da; LYRA, Guilherme Bastos; TEODORO, Iedo; FERREIRA-JÚNIOR, Ricardo Araújo; SOUZA, Renan Cantalice de. Soil water stress co-efficient for estimating actual evapotranspiration of maize in northeastern Brazil. **Meteorological Applications**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 26-34, jan. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/met.1516>

LYRA, G. B.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; SANTOS, M. A. dos. Balanço hídrico sequencial de água no solo para o manejo da irrigação de baixa frequência e alta intensidade na cana-de-açúcar. Piracicaba: STAB, 2010. v. 28, n. 4, 30 p.

MARTINS, Suelen da Costa Faria et al. Actual Evapotranspiration for Sugarcane Based on Bowen Ratio-Energy Balance and Soil Water Balance Models with Optimized Crop Coefficients. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 36, n. 12, p. 4557-4574, 4 ago. 2022.

MEHDINEJADIANI, Behrouz; FATHI, Parviz; KHODAVERDILOO, Habib. An inverse model-based Bees algorithm for estimating ratio of hydraulic conductivity to drainable porosity. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 608, p. 127673, maio 2022.

MELO, Marina Luciana Abreu de. **Condição hidráulica determinante à ocorrência de estresse hídrico na cultura da cana-de-açúcar**. 2020. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo-Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", Piracicaba, 2020.

MARIN, Fabio; NASSIF, Daniel SP. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: Fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 232-239, 2013.

MARAFON, Anderson Carlos. Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012. 29 p. (Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1953; 168).

MARIN, F. R. Cana-de-açúcar. "Pré-produção características". Brasília: Agência de Informação Embrapa, 2007. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar>. Acesso em: 24 mar. 2022.

PEREIRA, Antonio Roberto; SEDIYAMA, Gilberto Chodaku; NOVA, Nilson Augusto Villa. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundag, 2013. 323 p.

PASSOS, Máximo Lages Vieira; ZAMBRZYCKI, Geraldo Cesar; PEREIRA, Reginaldo Sérgio. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Balsas-MA. **Scientia Agraria**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 83-89, abr. 2017. ISSN 1983-2443.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L.R; SENTELHAS, P. C. Meteorologia Agrícola. Piracicaba, SP. 2007.

PEREIRA, Antonio Roberto. Simplificado o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, v. 64, n. 2, p. 311-313, 2005.

PANIGRAHI, B.; PANDA, Sudhindra N. Field test of a soil water balance simulation model. **Agricultural Water Management**, v. 58, n. 3, p. 223-240, 2003.

STOLF, Rubismar; OLIVEIRA, Ana Paula Rodrigues de. THE SUCCESS OF THE BRAZILIAN ALCOHOL PROGRAM (PROÁLCOOL) - A DECADE-BY-DECADE BRIEF HISTORY OF ETHANOL IN BRAZIL. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 2, p. 243-248, abr. 2020. FapUNIFESP (SciELO).

SCHERGER, Leonardo Ezequiel; ZANELLO, Victoria; LEXOW, Claudio. Comparison of the inverse modeling approach and traditional methods to estimate the unsaturated hydraulic properties in a sandy loam soil. **Águas Subterrâneas**, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 310-324, 8 set. 2020. Lepidus Tecnologia.

SILVA, S; DANTAS NETO, J; TEODORO, I; SOUZA, J L. de; LYRA, G B.; SANTOS, M A. L. dos. Demanda hídrica da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 19, n. 9, p. 849-856, set. 2015. FapUNIFESP (SciELO).

SILVA JUNIOR, João José da. Aplicação do método inverso pelo modelo Hydrus-2d para obtenção de propriedades físico hídricas de solos tropicais. **Tese** (Doutorado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2015.

SHAHROKHANIA, M. H.; SEPASKHAH, A. R. Single and dual crop coefficients and crop evapotranspiration for wheat and maize in a semi-arid region. **Theoretical and applied climatology**, v. 114, n. 3, p. 495-510, 2013.

SHIMADA, Shiziele de Oliveira. A produção do açúcar e a exploração do trabalho no campo brasileiro. **Scientia Plena**, v. 9, n. 5, p. 1-13, 2013.

DA SILVA, T. G.; MOURA, M. S.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; JUNIOR WALTER, G. F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n1, p64-71, 2012.

SOUZA, J.L.; MOURA FILHO, G.; LYRA, R.F.F. TEODORO, I.; SANTOS, E.A.; SILVA, J.L.; SILVA, P.R.T.; CARDIM, A.H.; AMORIN, E.C. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na região do tabuleiro costeiro de Maceió, AL, período de 1972-2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n.2, p.131-141, 2004

TEODORO, Iêdo; DANTAS NETO, José; HOLANDA, Lucas A. de; SAMPAIO NETO, Givaldo D.; SOUZA, José L. de; BARBOSA, Geraldo V. de S.; LYRA, Guilherme B. Weather variables, water balance, growth, and agro industrial yield of sugarcane. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 35, n. 1, p. 76-88, fev. 2015. FapUNIFESP (SciELO).

THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. The budget and its use in irrigation. In: The yearbook of agriculture . Water. Washington. Departament of Agriculture,1955. 346 . 358 p.

VALE, B. S. do. Comparação entre os modelos SEBAL e SSEBop na estimativa da evapotranspiração do trigo no Cerrado. 135p. **Dissertação de Mestrado** – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília – Distrito Federal, 2021.

VIANNA, Murilo dos Santos; SENTELHAS, Paulo Cesar. Simulação do risco de déficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 237-246, 2014.

WANG, Yunfei et al. Evapotranspiration partitioning and crop coefficient of maize in dry semi-humid climate regime. **Agricultural water management**, v. 236, p. 106164, 2020.

WILLMOTT, Cort J.; ACKLESON, Steven G.; DAVIS, Robert E.; FEDDEMA, Johannes J.; KLINK, Katherine M.; LEGATES, David R.; O'DONNELL, James; ROWE, Clinton M.. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal Of Geophysical Research**, [S.L.], v. 90, n. 5, p. 8995, 1985. American Geophysical Union (AGU).

ANEXOS

A- Rotina para cálculo do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather adaptado para cultivos agrícolas

// Chamar os dados no Data Sheets

doy = Meteoro.doy(t)

tx = Meteoro.tx(t)

tn = Meteoro.tn(t)

Urx = Meteoro.Urx(t)

Urn = Meteoro.Urn(t)

u2 = Meteoro.u2(t)

Qg = Meteoro.Qg(t)

P = Meteoro.P(t)

// TERMO AERODINÂMICO

tm = (tx + tn)/2

es = (0.6108* EXP (17.27*tx/(237.3+tx))+ 0.6108* EXP (17.27*tn/(237.3+tn)))/2

ea = (Urn * 0.6108* EXP (17.27*tx/(237.3+tx))+ Urx * 0.6108* EXP (17.27*tn/(237.3+tn)))/
200

S = 4098 * 0.6108* EXP (17.27*tm/(237.3+tm))/((237.3 + tm)^2)

Patm = 101.3*((293-0.0065*Z)/(293))^5.26

lamb = 0.665E-3*Patm

// TERMO RADIATIVO

// Radiação solar extraterrestre

dr = 1 + 0.033 * COS(2*pi/365*doy)

```

decl = 0.409 * SIN((2*pi/365*doy)-1.39)

ws = ARCCOS(-TAN(fi*pi/180)*TAN(decl))

Qo = 37.568*dr*((ws*SIN(fi*pi/180)*SIN(decl))+(COS(fi*pi/180)*COS(decl)*SIN(ws)))

// Balanço de radiação

Qso = (0.75 + 2E-5*Z)*Qo

Qoc = 0.77 * Qg

Qol = 4.903E-9*(((tx + 273.16)^4)+ ((tn + 273.16)^4))/2*(0.34-
0.14*ea^0.5)*(1.35*(Qg/Qso)-0.35)

Qn = Qoc - Qol

// Evapotranspiração de referência

ETo_PM = (0.408*S*(Qn)+lamb*900*u2*(es-ea)/(tm+273))/(S+lamb*(1+0.34*u2))

// Evapotranspiração da cultura

if t < L_ini

    Kc = Kc_ini

else

    if t < (L_cres+L_ini)

        Kc = Kc_ini+(t-L_ini)/L_cres*(Kc_mid-Kc_ini)

    else

        if t < (L_ini+L_cres+L_mid)

            Kc = Kc_mid

        else

            Kc = Kc_mid+(t-(L_ini+L_cres+L_mid))/L_fim*(Kc_fim-Kc_mid)

        endif

    endif

endif

```

```

endif

ETc = Kc * ETo_PM

// Balanço de água no solo sequencial Thornthwaite and Mather

if t <= (L_ini+L_cres+L_mid)

    Zr = ((Kc - Kc_ini)/(Kc_mid - Kc_ini))*(Zrx-Zrn)+Zrn

else

    Zr = Zrx

endif

CAD = (CC-PM)*1000*Zr

AFD = (1-f) * CAD

if (P - ETc) < 0

    if ARM + (P - ETc) > CAD

        ALT = 0

    else

        ALT = CAD * exp((NegAcum + (P - ETc))/CAD) - ARM

    endif

else

    ALT = P - ETc

    if ARM + (P - ETc) > CAD

        if ARM > CAD

            ALT = 0

        else

            ALT = CAD - ARM

        endif

    endif

```

```

endif

endif

if (P - ETc) < 0

    NegAcum = NegAcum + (P - ETc)

    ARM = CAD * exp(NegAcum/CAD)

    if ARM > CAD

        ARM = CAD

        NegAcum = 0

    endif

else

    ARM = ARM + (P - ETc)

    NegAcum = CAD*ln(ARM/CAD)

    if ARM > CAD

        ARM = CAD

        NegAcum = 0

    endif

endif

endif

if (P - ETc) >= 0

    ETR = ETc

    DEF = 0

    EXC =(P - ETc)-ALT

else

    ETR = P + abs(ALT)

    if ETR > ETc

```

```

    ETR = ETc

endif

DEF = ETc - ETR

EXC = 0

endif

PMP = PM

CCT = CC

fAD = (1-f) * (CCT - PMP)

Teta = (ARM/(Zr*1000)) + PM

```

B- Rotina de cálculo do balanço hídrico modelo K_c dual

```

// Chamar os dados no Data Sheets

doy = Meteoro.doy(t)
tx = Meteoro.tx(t)
tn = Meteoro.tn(t)
Urx = Meteoro.Urx(t)
Urn = Meteoro.Urn(t)
u2 = Meteoro.u2(t)
Qg = Meteoro.Qg(t)
P = Meteoro.P(t)

// Evapotranspiração de Referência - PMFAO56
// Termo Aerodinâmico

tm = (tx + tn)/2

es = (0.6108* EXP (17.27*tx/(237.3+tx))+ 0.6108* EXP (17.27*tn/(237.3+tn)))/2

ea = (Urn * 0.6108* EXP (17.27*tx/(237.3+tx))+ Urx * 0.6108* EXP (17.27*tn/(237.3+tn)))/
200

S = 4098 * 0.6108* EXP (17.27*tm/(237.3+tm))/((237.3 + tm)^2)

Patm = 101.3*((293-0.0065*Z)/(293))^5.26

lamb = 0.665E-3*Patm

// Termo Radioativo

```

```

// Radiação solar extraterrestre

dr = 1 + 0.033 * COS(2*pi/365*doy)

decl = 0.409 * SIN((2*pi/365*doy)-1.39)

ws = ARCCOS(-TAN(fi*pi/180)*TAN(decl))

Qo = 37.568*dr*((ws*SIN(fi*pi/180)*SIN(decl))+(COS(fi*pi/180)*COS(decl)*SIN(ws)))

trans = Qg / Qo

// Balanço de radiação

// Ondas curtas

Qso = (0.75 + 2E-5*Z)*Qo

Qoc = 0.77 * Qg

// Ondas longas

Qol = 4.903E-9*(((tx + 273.16)^4)+ ((tn + 273.16)^4))/2*(0.34-0.14*ea^0.5)*(1.35*(Qg/Qso)-0.35)

Qn = Qoc - Qol

ETo_PM = (0.408*S*(Qn)+lamb*900*u2*(es-ea)/(tm + 273))/(S+lamb*(1+0.34*u2))

// Transpiração Potencial

if t < L_ini
    Kcb = Kcb_ini
else
    if t < (L_cres+L_ini)
        Kcb = Kcb_ini+(t-L_ini)/L_cres*(Kcb_mid-Kcb_ini)
    else
        if t < (L_ini+L_cres+L_mid)
            Kcb = Kcb_mid
        else
            Kcb = Kcb_mid+(t-(L_ini+L_cres+L_mid))/L_fim*(Kcb_fim-Kcb_mid)
        endif
    endif
endif

Trp = Kcb * ETo_PM

h = max((kcb/kcb_mid)*hx,h)

```

```
kcx = max(1.2+(0.04*(u2-2)-0.004*(URn-45))*(h/3)^0.3,kcb+0.05)
```

```
// Balanço de água no solo
```

```
// Camada subsuperficial - Evaporação
```

```
fc = max(abs(((kcb-kcb_ini)/(kcx-kcb_ini)))^(1 + 0.5*h),0.01)
```

```
if P > 0
```

```
    fw = 1
```

```
    else
```

```
        fw = fw_ini
```

```
endif
```

```
few = min(1-fc,fw)
```

```
TAE = 1000*(CC-0.5*PM)*Ze
```

```
if t = 1
```

```
    De_i = TAE - AFE
```

```
    if De_i < AFE
```

```
        kr = 1
```

```
    else
```

```
        kr = max((TAE-De_i)/(TAE-AFE),0)
```

```
    endif
```

```
    ke = min(kr*(kcx-kcb),few*kcx)
```

```
    E = ke * ETo_PM
```

```
    Dp = max(P,0)
```

```
    De_f = min(De_i-P+(E/few)+DP,TAE)
```

```
    else
```

```
    De_i = max(De_f-P,0)
```

```
    if De_i < AFE
```

```
        kr = 1
```

```
    else
```

```
        kr = max((TAE-De_i)/(TAE-AFE),0)
```

```
    endif
```

```
    ke = min(kr*(kcx-kcb),few*kcx)
```

```
    E = ke * ETo_PM
```

```
    Dp = max(P-De_f,0)
```

```
    De_f = min(De_f-P+(E/few)+DP,TAE)
```

```
endif
```

```
Kc = kcb + ke
```

```
ETc = kc * ETo_PM
```

```
// Camada zona radicular - Evapotranspiração real
```

```

if t <= (L_ini+L_cres+L_mid)
    Zr = ((Kcb - Kcb_ini)/(Kcb_mid - Kcb_ini))*(Zrx-Zrn)+Zrn
else
    Zr = Zrx
endif

```

```

TAR = 1000*(CC-PM)*Zr
AFR = f*TAR

```

```

if t = 1
    Dr_i = min(max((TAR-AFR)-p+ETc,0),TAR)
    if Dr_i < AFR
        ks = 1
    else
        ks = max((TAR-Dr_i)/(TAR-AFR),0)
    endif
    Dp = max(P-ETc-De_i,0)
    kcr = ke + ks*kcb
    ETR = kcr * ETo_PM
    Tr = ks*kcb*ETo_PM
    Dr_f = max(min((TAR-AFR)-P+ETR+Dp,TAR),0)
    else
    Dr_i = min(max(Dr_f-P+ETc,0),TAR)
    if Dr_i < AFR
        ks = 1
    else
        ks = max((TAR-Dr_i)/(TAR-AFR),0)
    endif
    kcr = ke + ks*kcb
    ETR = kcr * ETo_PM
    Tr = ks*kcb*ETo_PM
    Dp = max(P-ETc-Dr_f,0)
    Dr_f = min(Dr_f-P+ETR+DP,TAR)
endif

```

```

ARM = max(TAR - Dr_f,0)

```

```

Teta = (ARM/(zr*1000))+ PM

```