

UFCCG

UFCCG



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**



**CONSUMO HÍDRICO E COEFICIENTE DE CULTIVO DUAL DA CANA-DE-
AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO**

WALKER GOMES DE ALBUQUERQUE

Campina Grande – PB

Março de 2012

UFCCG

UFCCG

UFCCG/BIBLIOTECA/BC

WALKER GOMES DE ALBUQUERQUE

**CONSUMO HÍDRICO E COEFICIENTE DE CULTIVO DUAL DA CANA-DE-
AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Meteorologia.

Área de Concentração: **Agrometeorologia**

Orientadores:

Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva

Dr. Carlos Henrique de Azevedo Farias

Campina Grande – PB

Março de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- A354c Albuquerque, Walker Gomes de.
Consumo hídrico e coeficiente de cultivo dual da cana-de-açúcar cultivada sob diferentes lâminas de irrigação / Walker Gomes de Albuquerque. – Campina Grande, 2012.
89 f. : il. color.
- Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
Orientadores: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, Prof. Dr. Carlos Henrique de Azevedo Farias.
- Referências.
1. Irrigação. 2. Evapotranspiração. 3. Eficiência de Uso da Água.
4. Produtividade. I. Título.


CDU 631.67(043)

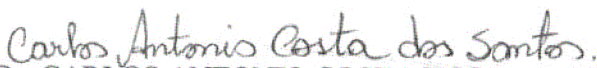
WALKER GOMES DE ALBUQUERQUE


CONSUMO HÍDRICO E COEFICIENTE DE CULTIVO DUAL DA CANA-DE-
AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO

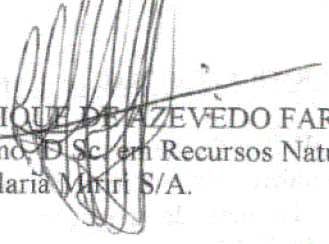
TESE APROVADA EM 30/03/2012

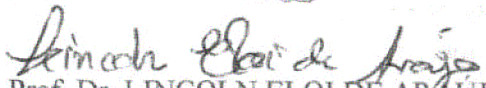
BANCA EXAMINADORA

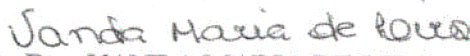

Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. RENILSON TARGINO D'ANTAS
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Dr. CARLOS HENRIQUE DE AZEVEDO FARIAS
Engenheiro Agrônomo, D.Sc. em Recursos Naturais
Destilaria Mirri S/A.


Prof. Dr. LINCOLN ELOI DE ARAÚJO
Departamento de Engenharia e Meio Ambiente
Universidade Federal da Paraíba


Prof. Dra. VANDA MARIA DE LIRA
Departamento de Agropecuária.
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

*Às pessoas mais importantes, amadas e
companheiras de minha longa trajetória
de vida: Walbert Willys da Costa Gomes
e Cibele de Albuquerque Gomes (pais),
Shirley Stella Gomes de Albuquerque
(irmã e madrinha) e a Rafaela Durand
(filha de coração e sobrinha), DEDICO*

*A Vicente de Paulo Rodrigues da Silva,
Gutemberg Francisco Pinto Gomes
(Berg) e Antônio Emídio (Toin Mago),
pessoas que sem a sua ajuda jamais
conseguiria realizar este sonho,
OFEREÇO*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre fazer das barreiras encontradas em minha caminhada lições para meu crescimento pessoal, por ser a minha fortaleza e por ter me dado a oportunidade (dentre muitos) de ter feito um curso de Doutorado;

A minha família, pela confiança em mim depositada fazendo com que eu acreditasse em meu potencial;

A Roseane Queiroz (minha querida Rose), por seu companheirismo e incentivo;

Ao Dr. Carlos Henrique de Azevedo Farias pela orientação e por todo o apoio para condução e execução do experimento;

À empresa Miriri na pessoa do Dr. Gilvan Celso Cavalcanti de Moraes Sobrinho, Diretor-Superintendente da Miriri Alimentos e Bioenergia S/A, pelo apoio a pesquisa;

Ao Gerente Agrícola, Gabriel Saturnino de Oliveira, pela ajuda na execução deste trabalho;

A Divanete, por mostrar-me que passar por dificuldades não é motivo para não seguir em frente com simpatia, honra, dignidade e, sobretudo, profissionalismo;

Aos colegas e funcionários da Miriri: Marcos, Denise, Joelson e Léo, pelo apoio prestado durante o experimento e por sua amizade;

Aos amigos: Thiago Pereira Chaves, Eric Beserra e Daniela Gomes, por fazerem de sua amizade um refúgio para os momentos difíceis;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, pela transmissão de seus ensinamentos;

Aos amigos do curso de pós-graduação (em especial, Valéria Peixoto Borges, Carlos Herriot e Cícera Borges) que estiveram comigo em todas as etapas do nosso curso;

À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante o curso de Doutorado;

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, pela oportunidade de realizar este curso.

A todos que de alguma forma contribuíram de forma direta ou indireta para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
1. INTRODUÇÃO	17
2. REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1. A cultura da cana-de-açúcar	20
2.2. Necessidade de água das culturas	23
2.3. Estimativa da evapotranspiração	27
3. MATERIAL E MÉTODO	31
3.1. Caracterização da área experimental	31
3.2. Delineamento experimental e tratamentos de irrigação	32
3.3. Coeficiente de cultivo simples	32
3.4. Coeficiente de cultura dual	33
3.4.1. Coeficiente de cultura basal	33
3.4.2. Coeficiente de evaporação de água no solo	34
3.4.3. Evapotranspiração em condições de estresse de água	38
3.4.4. Total de água disponível (TAW)	38
3.4.5. Água facilmente disponível (RAW)	38
3.4.6. Balanço de água na zona radicular	39
3.5. Evapotranspiração de referência	40
3.6. Umidade do solo	41
3.7. Eficiência do uso de água	43
3.8. Análise estatística	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1. Crescimento e desenvolvimento da cultura	44
4.2. Irrigação e demanda evaporativa	44
4.3. Variáveis de crescimento da cana-de-açúcar	46
4.3.1. Altura dos colmos	46
4.3.2. Diâmetro dos colmos	49
4.4. Análise estatística	50
4.4.1. Altura média dos colmos	50
4.4.2. Diâmetro médio dos colmos	52
4.5. Produtividade e eficiência do uso da água	54
4.6. Coeficientes de cultivo e evapotranspiração	59
4.6.1. Tratamento de sequeiro	59
4.6.2. Tratamento de irrigação de 25% da ETo	64
4.6.3. Tratamento de irrigação de 50% da ETo	67
4.6.4. Tratamento de irrigação de 75% da ETo	71
4.6.5. Tratamento de irrigação de 100% da ETo	73
5. CONCLUSÕES	79
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

CONSUMO HÍDRICO E COEFICIENTE DE CULTIVO DUAL DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO

Resumo: O objetivo deste trabalho foi determinar as necessidades hídricas, coeficiente de cultivo dual e a eficiência do uso de água, bem como analisar as variáveis de crescimento da cana-de-açúcar cultivada nos tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, compreendendo quatro tratamentos de irrigação com dois pivôs centrais, com três repetições, utilizando-se a evapotranspiração de referência (ET_o) no manejo de água, da seguinte forma: 25% ET_o, 50% ET_o, 75% ET_o e 100% ET_o. O coeficiente de cultivo dual foi obtido de acordo com a metodologia da FAO-56 e a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith, utilizando dados de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar coletados na Plataforma de Coleta de Dados próxima da área experimental. Os resultados obtidos indicam que a umidade do solo exerce influência maior na altura dos colmos do que no diâmetro da planta da cana-de-açúcar e que a produtividade da cana-de-açúcar é significativamente afetada pelas condições de déficit hídrico. A eficiência de uso de água diminui e a produtividade aumenta com o aumento na lâmina de água aplicada à cultura da cana-de-açúcar e a evapotranspiração da cana-de-açúcar varia de 2,69 a 3,92 mm d⁻¹.

Palavras chave: Irrigação, evapotranspiração, eficiência de uso de água, produtividade

WATER REQUIREMENTS AND DUAL CROP COEFFICIENT OF SUGARCANE GROWN ON DIFFERENT IRRIGATION LEVELS

Abstract: The main objective of this study was to determine the water requirements, dual crop coefficient and water use efficiency, as well as to analyze the growth variables of sugar cane grown in the coastal plains of the Paraíba state. The experimental design was by randomized block design with four irrigation treatments and three replications using two center pivots. The reference evapotranspiration was obtained based on Penman-Monteith method (FAO/56), using the data of air temperature, relative humidity, wind speed and solar radiation from Data Collection Platform, next to the experimental and dual crop coefficient was obtained according to the FAO-56 nomenclature. The results indicate that soil water moisture has a strong influence on the stem height than the plant diameter, and sugarcane yield is significantly affected by water deficit. The water use efficiency decreases and the productivity increases according to water level, and sugarcane evapotranspiration ranges from 2.69 to 3.92 mm day⁻¹.

Keywords: Irrigation, evapotranspiration, water use efficiency, yield

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Mapa de localização da Fazenda Capim II e seu posicionamento na 31
bacia hidrográfica, com destaque para a área experimental. Fazenda
Capim II, Capim, PB
- Figura 2 Detalhes da sonda FDR (Reflectometria no domínio da frequência), 42
modelo PR2/6, Delta-T (Devices Ltd., Burwell, Cambridge, UK)
(A) e o esquema da sonda PR2 no solo (B)
- Figura 3 (A) Tubos de acesso para cada tratamento de irrigação, instalados a 42
0,20 m de cada ponto de observação, nas profundidades de 10, 20,
30, 40, 60, 70, 80, 90 e 100 cm; (B) Tubo de acesso sendo instalado
em campo; (C) tubo de acesso já instalado no solo da área
experimental
- Figura 4 Correlação entre a altura dos colmos e a umidade do solo média para 47
cada lâmina de irrigação durante o segundo ciclo da cana-de-açúcar
- Figura 5 Comportamento da altura dos colmos ao longo dos estádios 48
fenológicos do segundo (A) e terceiro (B) ciclos
- Figura 6 Comportamento do diâmetro dos colmos ao longo dos estádios 50
fenológicos do segundo (A) e terceiro (B) ciclos da cana-de-açúcar
- Figura 7 Variações temporais do coeficiente de evaporação de água do solo 60
(K_e), coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) e do coeficiente de cultivo
dual (K_c – dual) da cana-de-açúcar cultivada em regime de sequeiro
durante o segundo (A) e terceiro (B) ciclos
- Figura 8 Cursos sazonais da precipitação e da drenagem de água no solo 64

durante o período experimental do segundo (A) e terceiro (B) ciclos da cana-de-açúcar cultivada em regime de sequeiro

- Figura 9 Variações temporais do coeficiente de evaporação de água do solo (Ke), coeficiente de cultivo basal (Kcb) e do coeficiente de cultivo dual (Kc – dual) da cana-de-açúcar irrigada com 25% da ETo durante o segundo ciclo 65
- Figura 10 Curso sazonal da precipitação + irrigação e da drenagem de água no solo durante o período experimental do segundo ciclo da cana-de-açúcar irrigada com 25% da ETo 67
- Figura 11 Variações temporais do coeficiente de evaporação de água do solo (Ke), coeficiente de cultivo basal (Kcb) e do coeficiente de cultivo dual (Kc – dual) da cana-de-açúcar irrigada com 50% da ETo durante o segundo ciclo 68
- Figura 12 Curso sazonal da precipitação + irrigação e da drenagem de água no solo durante o período experimental do segundo ciclo da cana-de-açúcar irrigada com 50% da ETo 70
- Figura 13 Variações temporais do coeficiente de evaporação de água do solo (Ke), coeficiente de cultivo basal (Kcb) e do coeficiente de cultivo dual (Kc-dual) da cana-de-açúcar irrigada com 75% da ETo durante o segundo ciclo 71
- Figura 14 Curso sazonal da precipitação + irrigação e da drenagem de água no 73

solo durante o período experimental do segundo ciclo da cana-de-açúcar irrigada com 75% da ETo

- Figura 15 Variações temporais do coeficiente de evaporação de água do solo (Ke), coeficiente de cultivo basal (Kcb) e do coeficiente de cultivo dual (Kc – dual) da cana-de-açúcar irrigada com 100% da ETo durante o segundo (A) e terceiro (B) ciclos 74
- Figura 16 Cursos sazonais da precipitação e da drenagem de água no solo durante o período experimental do segundo (A) e terceiro (B) ciclos da cana-de-açúcar irrigada com 100% da ETo 78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Duração dos estádios fenológicos da cana-de-açúcar cultivada em latitudes tropicais e os valores dos seus coeficientes de cultivo simples (K_c) e basal (K_{cb})	34
Tabela 2	Duração dos estádios fenológicos da cana-de-açúcar durante o segundo e o terceiro ciclos cultivada nos tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba	44
Tabela 3	Valores médios e acumulados da evapotranspiração de referência (ETo), precipitação acumulada ($Prec$) e irrigação (mm) para cada tratamento durante cada estágio fenológico da cana-de-açúcar no segundo e terceiro ciclos	46
Tabela 4	Valores médios da altura dos colmos e a umidade do solo para os tratamentos de sequeiro e para a lâmina plena de irrigação durante o terceiro ciclo da cana-de-açúcar	47
Tabela 5	Análise de variância da altura média dos colmos de cana-de-açúcar entre o tratamento de sequeiro (TS) e a lâmina de irrigação plena ao longo do segundo ciclo	51
Tabela 6	Análise de variância da altura média dos colmos de cana-de-açúcar entre o tratamento de sequeiro (TS) e a lâmina de irrigação plena ao longo do terceiro ciclo	52

- Tabela 7 Análise de variância do diâmetro médio dos colmos de cana-de-açúcar 53
entre o tratamento de sequeiro (TS) e as lâminas de irrigação aplicadas ao
longo do segundo ciclo
- Tabela 8 Análise de variância do diâmetro médio dos colmos da cana-de-açúcar 54
entre o tratamento de sequeiro (TS) e a lâmina de irrigação plena,
aplicadas ao longo do terceiro ciclo
- Tabela 9 Produtividade média, lâmina de irrigação e eficiência de uso de água 55
(EUA) com base na irrigação aplicada à cana-de-açúcar no segundo e
terceiro ciclos da cultura
- Tabela 10 Produtividade e os valores da eficiência de uso de água (EUA) com base 57
na evapotranspiração da cultura (ET) acumulada para cada tratamento de
irrigação da cana-de-açúcar durante o segundo e terceiro ciclos
- Tabela 11 Valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na 62
metodologia do Kc dual e valores médios (mm d^{-1}) e acumulados (mm) da
evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar cultivada em regime de
sequeiro durante o segundo e terceiro ciclos
- Tabela 12 Valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na 66
metodologia do Kc dual e valores médios diários (mm d^{-1}) e acumulados
(mm) da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar irrigada com
25% da E_{To} durante o segundo ciclo

- Tabela 13 Valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na 69 metodologia do Kc dual e valores médios diários (mm d^{-1}) e acumulados (mm) da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar irrigada com 50% da ETo durante o segundo ciclo
- Tabela 14 Valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na 72 metodologia do Kc dual e valores médios diários (mm d^{-1}) e acumulados (mm) da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar irrigada com 75% da ETo durante o segundo ciclo
- Tabela 15 Valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na 77 metodologia do Kc dual e valores médios (mm d^{-1}) e acumulados (mm) da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar irrigada com 100% da ETo durante o segundo e terceiro ciclos

1. INTRODUÇÃO

A preocupação crescente por fontes de energias renováveis e menos poluentes tem elevado a demanda de biocombustíveis em todo o mundo, dentre os quais se destaca o etanol proveniente da cana-de-açúcar. Com isso, a área de cultivo da cana-de-açúcar tem se expandido significativamente, sobretudo no centro-sul brasileiro. Por outro lado, regiões tradicionalmente canavieiras, como as regiões dos Tabuleiros Costeiros e Zona da Mata do Nordeste do Brasil, não dispõem mais de área para expansão, tornando-se imprescindível manejar a cultura corretamente para aumentar a sua produtividade. O manejo ideal implica em conhecer os padrões de crescimento de cada variedade, fazendo com que as fases de máximo desenvolvimento coincidam com os períodos de maior disponibilidade hídrica e radiação solar, permitindo que a cultura expresse todo seu potencial genético (Keating et al., 1999).

A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima para a fabricação do açúcar e álcool (etanol). Ela é cultivada, principalmente, em clima tropical onde se alternam as estações secas e úmidas. A sua floração, em geral, começa no outono e a colheita se dá na estação seca, durante um período de 3 a 6 meses (Segato et al., 2006). Alguns estudos têm evidenciado que a produtividade da cana-de-açúcar é aumentada substancialmente com a irrigação, principalmente quando os solos são bem drenados (Hurst et al., 2004). Entretanto, o manejo inadequado da irrigação pode causar problemas ambientais, como o aumento do grau de acidez dos solos e perdas de nutrientes via lixiviação (White et al., 1993; Wilson et al., 1999).

Os tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba têm grande potencial para a agricultura irrigada durante o déficit pluviométrico (Varela, 2002), o que justificam os investimentos em técnicas de agriculturas irrigáveis, principalmente na cultura da cana-

de-açúcar. Farias (2001), avaliando o desenvolvimento morfofisiológico da cana-de-açúcar em regime irrigado e sequeiro na zona da mata paraibana, concluiu que o plantio seguido de estresse hídrico reduz o perfilhamento em 41,5% no início do ciclo e o número de colmos em 37,7% no final do ciclo em comparação ao cultivo irrigado.

Segundo Valnir Júnior (2000), vários são os fatores que afetam o desenvolvimento das plantas, ressaltando-se a água, que em excesso ou escassez, contribui para a diminuição dos rendimentos das culturas, sendo assim, o seu manejo racional torna-se imperativo na maximização da produção agrícola. O conhecimento dos componentes do balanço de energia sobre superfícies cultivadas é de grande importância para a estimativa das perdas de água por evapotranspiração e caracterização do micro clima local. A razão de Bowen também tem sido intensamente utilizada por diversos pesquisadores, com a finalidade de resolver a equação do balanço de energia sobre culturas e, assim, determinar a evapotranspiração (Azevedo et al., 2003; Silva, et al., 2007; Souza et al., 2008; Silva et al., 2009).

A estimativa adequada da evapotranspiração da cultura (ET_c) consiste no principal parâmetro a ser considerado no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação, uma vez que ela totaliza a quantidade de água utilizada nos processos de evaporação e transpiração pela cultura durante determinado período (Silva et al., 2009). Em muitas aplicações práticas, a ET_c é obtida através do valor da evapotranspiração potencial de uma cultura de referência (ET_o) corrigida pelo coeficiente da cultura (K_c), sendo ele dependente do tipo de cultura e de seu estágio de desenvolvimento. Para se fazer aplicações da evapotranspiração em diversas atividades, como na utilização de recursos hídricos, por exemplo, essa estimativa é um conhecimento de grande importância prática. Diante deste contexto, este trabalho teve como objetivos:

Geral: determinar as necessidades hídricas e o coeficiente de cultivo dual, a produtividade e a eficiência do uso de água da cana-de-açúcar cultivada nos tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba;

Específicos: (i) analisar o crescimento da cana-de-açúcar em função da umidade média do solo; (ii) determinar as correlações existentes entre as lâminas de irrigação em relação aos parâmetros de crescimento da cana-de-açúcar durante os seus estádios fenológicos; e, (iii) encontrar a lâmina de água mais apropriada para o manejo da irrigação da cana-de-açúcar na região estudada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar, nome comum de uma herbácea vivaz, planta da família das gramíneas, espécie *Saccharum officinarum* L., originária da Ásia Meridional, é muito cultivada em países tropicais e subtropicais para obtenção do açúcar, do álcool e da aguardente, devido à sacarose contida em seu caule que é formado por numerosos nós. Os colmos, caracterizados por nós bem marcados e entrenós distintos, quase sempre fistulosos, são espessos e repletos de suco açucarado (Segato et al., 2006). As flores, muito pequenas, formam espigas florais, agrupadas em panículas e rodeadas por longas fibras sedosas, congregando-se em enormes pendões terminais, de coloração cinzento-prateado. Existem diversas variedades cultivadas de cana-de-açúcar, que se distinguem pela cor e pela altura do caule, que atinge entre 3 e 6 m de altura e 2 a 5 cm de diâmetro, sendo o seu plantio feito, desde a antiguidade, a partir de estacas (algumas variedades não produzem sementes férteis). A cana-de-açúcar é cultivada, principalmente, em clima tropical onde se alternam as estações secas e úmidas. Sua floração, em geral, começa no outono e a colheita se dá na estação seca, durante um período de 3 a 6 meses (Segato et al., 2006).

Ainda de acordo com Segato et al. (2006) existe pelo menos seis espécies do gênero da cana-de-açúcar, sendo aquela que, quando cultivada por um híbrido multiespecífico, recebe a designação *Saccharum* spp. Essa planta é a principal matéria-prima para a fabricação do açúcar e álcool (etanol) e ela é da família Poaceae, representada pelo milho, sorgo, arroz e muitas outras gramas. As principais características dessa família são a forma da inflorescência (espiga), o crescimento do caule em colmos, e as folhas com lâminas de sílica em suas bordas e bainha aberta. Ela

é uma das culturas agrícolas mais importantes dos trópicos, gerando centenas de milhares de empregos diretos.

A cana-de-açúcar é uma cultura com alta capacidade de produção, que em boas condições produz volumes superiores a 100 ton/ha de colmo. Se as folhas e topos, que não são utilizados para a produção de açúcar, estão incluídos, o volume da biomassa aumentaria para 20%. Tem sido demonstrado que o uso de cana-de-açúcar para a obtenção de energia renovável é viável (Suarez, 2005). Ela é uma das culturas agrícolas mais importantes em regiões de clima tropical e subtropical, assumindo grande importância econômica por gerar produtos como o açúcar, a aguardente e o álcool. Além da utilização de outros subprodutos, como o bagaço (resíduo da cana) é aproveitada como hidrolisado, juntamente com a levedura da cana (resíduo da fermentação) em rações para a alimentação de bovinos. A vinhaça ou vinhoto, outro resíduo, também pode ser usado como adubo (Sachs & Martins, 2007).

A produção mundial de cana-de-açúcar totaliza aproximadamente 1,5 bilhões de toneladas por ano e está localizada predominantemente na faixa tropical do planeta, nos países em desenvolvimento da América Latina, África e do Sudeste Asiático. O Brasil, líder mundial na produção de cana-de-açúcar, na safra 2008/2009 produziu cerca de 569 milhões de toneladas. Desse total cerca de 90% foi produzido na região Centro-Sul e 10% na região Nordeste (Unica, 2011). A variabilidade e má distribuição da precipitação pluvial são as principais causas de prejuízos para a cultura da cana-de-açúcar, principalmente pela redução de produtividade e mortalidade das soqueiras que obriga aos agricultores renovarem os canaviais mais precocemente. Isso acontece porque a maior parte dos cultivos brasileiros de cana-de-açúcar é feito em regime de sequeiro. E, nesse regime, o crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas

dependem inevitavelmente da quantidade e distribuição da chuva durante o ciclo de produção (Silva et al., 2002; Dalri et al., 2008; Farias et al., 2008).

A cultura de cana-de-açúcar ocupa no Brasil aproximadamente 6,92 milhões de hectares, com produção em torno de 473,16 milhões de toneladas de colmos na safra de 2007/2008. Os principais produtos gerados são o açúcar, com aproximadamente 30,04 milhões de toneladas, e o álcool, cerca de 21,30 bilhões de litros (Oliveira et al., 2007). A atividade canavieira se destaca, no Brasil, por sua importância socioeconômica e pela alta competitividade internacional de alguns de seus constituintes. O setor emprega cerca de 1,18 milhões de trabalhadores diretos e indiretos, gera 4,1% das exportações e contribui com aproximadamente 8% do Produto Interno Bruto (PIB) agrícola (Carvalho et al., 2008). Segundo Udop (2009), no ranking nacional de estados produtores de cana-de-açúcar, o Estado da Paraíba ocupa a nona posição, contribuindo em 1,2% do total da produção do país seguida por: Mato Grosso do Sul (2,73%), Mato Grosso (3,09%), Pernambuco (3,59%), Goiás (3,79%), Alagoas (5,55%), Minas Gerais (6,82%), Paraná (7,51%) e São Paulo (62,05%).

A baixa pluviosidade e o empobrecimento mineral do solo são os principais fatores da baixa produtividade da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba (Silva, 2002). Esses dados apontam a necessidade de se estabelecer uma política de pesquisa com irrigação e adubação dessa cultura visando resultados diretos, como o aumento da produtividade e rendimento de açúcar e de álcool. A irrigação, como prática suplementar, vem sendo cada vez mais utilizada pelos produtores após a redução na produção de cana-de-açúcar, decorrente das baixas precipitações no nordeste brasileiro nos últimos anos (Silva, 2002).

Silva Júnior (2001) comenta que a temperatura é um dos fatores mais importantes na produção, pois é condição básica e decisiva para as reações químicas e

para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, cujas exigências climáticas estão relacionadas com a temperatura ótima de 25-33°C, bem como pela temperatura do solo por ocasião da germinação das gemas. O setor sucroalcooleiro faz do Brasil o país que mais utiliza em larga escala um combustível alternativo aos derivados do petróleo. A razão disso é que a cana-de-açúcar produz um combustível limpo e renovável, além de ser uma planta de enorme eficiência, pois, cada tonelada de colmos tem o potencial energético equivalente ao de 1,2 barris de petróleo. O álcool é reconhecido mundialmente pelas suas vantagens ambientais, sociais e econômicas e, por isso, alguns países do primeiro mundo já estão interessados nessa tecnologia com vistas à redução de importações de petróleo (UDOP, 2009).

2.2. Necessidade de água das culturas

A disponibilidade de água para a cana-de-açúcar é o principal fator climático causador de variabilidade da sua produtividade (Teramoto, 2003). Na interação do sistema solo-planta-atmosfera há certa quantidade de água que entra e sai, fazendo com que a água armazenada no solo esteja em bastante variação. Essa variação do armazenamento de água no volume de solo considerado representa o balanço de água que entrou e que saiu no sistema (Pereira et al., 2002). Genericamente, as principais fontes de entrada de água no sistema são: orvalho, escoamento superficial (em solos planos), ascensão capilar, irrigação e precipitação; enquanto as fontes de saída são: evapotranspiração, escoamento superficial (em solos com declividade não nula ou acentuada), drenagem lateral e drenagem profunda.

O conhecimento da distribuição das precipitações e da evapotranspiração fornece subsídios para determinar períodos críticos predominantes numa determinada região e, condições de fornecer informações que visem reduzir as conseqüências

causadas pelas flutuações do regime pluviométrico, seja pelo emprego da irrigação ou pela implantação de culturas adaptadas à sazonalidade deste regime (Junqueira Junior et al., 2007). De maneira geral, os projetos de irrigação são dimensionados visando suprir todas as necessidades hídricas da planta, sem levar em conta a parcela provável de precipitação.

Estudos demonstram que a produção de uma cultura é diretamente proporcional à sua taxa de transpiração. Como fator importante no balanço de energia, a transpiração representa uma medida significativa do rendimento da cultura. Para realizar o processo de transpiração, as plantas transportam a água do solo e a lançam na atmosfera, em cujo processo a água é utilizada como meio de transporte de sais minerais da solução do solo para o tecido da planta, onde é utilizada na fotossíntese. Os carboidratos são translocados em solução e armazenados em diversos órgãos, tais como sementes, raízes ou tubérculos (Silva et al., 2001).

A cana-de-açúcar requer umidade adequada durante todo o período vegetativo para se obter rendimentos máximos, porque o crescimento vegetativo, incluindo o crescimento da cana, é diretamente proporcional à água transpirada. Dependendo do clima, as necessidades hídricas da cana-de-açúcar variam de 1500 a 2500 mm distribuídos de maneira uniforme durante o período de desenvolvimento da cultura (Rocha, 2001). Portanto, tanto a escassez quanto o excesso d'água são prejudiciais ao desenvolvimento da cultura. As condições climáticas determinantes para o processo de maturação natural da cana-de-açúcar caracterizam-se pela gradativa queda de temperatura e diminuição das precipitações, o que pode estimular o desenvolvimento vegetativo da planta em contrapartida ao acúmulo de sacarose (Leite et al., 2008).

A utilização de técnicas de aplicação e manejo da água torna-se indispensável quando o objetivo é o incremento da produção e melhor rentabilidade econômica para o

produtor, e isso se torna mais importante quando o suprimento de água às plantas não é completamente atendido pela precipitação, como ocorre no semiárido brasileiro. Com o estudo da resposta da cultura a diferentes níveis de umidade, é possível estabelecer o manejo adequado da irrigação, mesmo sob condições de limitada disponibilidade de água, ou seja, quantificar a produção a ser alcançada considerando-se algumas limitações de insumos necessários à produção (Lima, 2004; Tormena et al., 1999).

O consumo hídrico diário, ou nos subperíodos do ciclo vegetativo das culturas, constitui-se num elemento fundamental para o estudo das relações entre a atividade agrícola e a produtividade das plantas cultivadas (Ramos, 2006). Tais informações se tornam mais relevante quando há necessidade de suplementação de água ao solo através da irrigação, proporcionando o uso da água de forma mais racional e eficaz, de acordo com a exigência da cultura (Ramos, 2006). Se houver um bom suprimento hídrico, a cultura da cana-de-açúcar pode ser cultivada durante todo o ano; no entanto, toda cultura desenvolvida em sistema de sequeiro depende inevitavelmente da quantidade, da distribuição e da intensidade das chuvas. Com isso, a produtividade nesse sistema é absolutamente dependente das interações entre suas fases fenológicas e as variações do tempo e do clima (Ramos, 2006). A influência da água para a cana-de-açúcar é grande, sendo que a germinação e o perfilhamento são os estágios mais críticos ao déficit hídrico (Castro, 1999). Isso tem muito a ver com a época de plantio. No caso do Nordeste, o período de plantio coincide com o final da estação chuvosa o que certamente acarreta prejuízos no enraizamento e perfilhamento da cana planta e no perfilhamento da cana soca, prejudicando inclusive a aplicação dos fertilizantes químicos, uma vez que a chegada da estação seca inviabiliza essa operação geralmente, quando se trata de adubação da cana soca (Castro, 1999). No estágio final do ciclo da

planta, para aumentar o teor de sacarose no colmo, é recomendado um déficit hídrico para ela cessar o seu desenvolvimento e atingir a maturação (Cardoso, 2006).

A determinação das necessidades hídricas de culturas, em seus diferentes estádios de desenvolvimento, é uma etapa importante para o manejo de irrigação. Nos últimos anos, muitas pesquisas têm sido realizadas visando determinar o consumo hídrico de culturas por meio do coeficiente de cultivo, em seus diferentes estádios de desenvolvimento (Silva et al., 2001; Azevedo et al., 2003; Azevedo et al., 2006; Farias 2006; Silva et al., 2007; Silva et al., 2009). Na escolha de um método para a determinação da evapotranspiração, devem ser levadas em consideração a praticidade e a precisão. Atualmente, utilizam-se estações meteorológicas automatizadas que auxiliam na determinação da evapotranspiração de referência, diminuindo, assim, erros na lâmina de água a ser aplicada na cultura.

Para a cana-de-açúcar, uma precipitação pluvial anual a partir de 1.000 mm, bem distribuída, é suficiente para a obtenção de altas produções. Isso implica em que o manejo hídrico seja realizado com eficiência e com suprimentos hídricos adequados durante o desenvolvimento vegetativo (principalmente nas fases de germinação, perfilhamento e alongamento dos colmos) e alguma restrição no período de maturação, para forçar o repouso fisiológico e o enriquecimento em sacarose (Inman-Bamber & Smith, 2005). Esses autores, estudando os efeitos do estresse hídrico sobre a cana de açúcar, em dois experimentos na região de Kalamia, Austrália, sendo um conduzido de modo que o estresse hídrico poderia ser aplicado durante um período de alta evaporação e demanda de uma safra relativamente jovem, com um dossel foliar bem desenvolvido, e o outro controlado de modo que o estresse poderia ser aplicado em uma lavoura durante um período de baixa demanda de evaporação. Tais pesquisadores chegaram a conclusão de que o início do estresse hídrico em cana se manifesta sobre uma ampla

variedade de déficits de água no solo e durante um longo período de tempo. Além disso, eles constataram que o acúmulo de biomassa é reduzido devido ao grande déficit hídrico do solo e o acúmulo de sacarose é reduzido somente após novos aumentos do déficit hídrico.

Hurst et al. (2004), numa pesquisa para avaliar a eficiência do uso da água no cultivo da cana-de-açúcar em local de lençol freático raso concluíram que para os solos estudados, a necessidades de irrigação é dependente do tipo do solo e das características de enraizamento (profundidade e densidade). Por outro lado, Inman Bamber & Smith (2005) avaliaram onde o conhecimento das relações água versus cana-de-açúcar deve ser reforçado a fim de obter progressos no manejo da irrigação e melhoramento genético na cultura. Esses autores concluíram que as condutâncias estomáticas variam consideravelmente entre os genótipos considerados em respostas ao estresse hídrico das raízes e folhas, enquanto a osmorregulação, ao contrário, não pareceu variar consideravelmente entre cultivares.

2.3. Estimativa da evapotranspiração

A grande variabilidade temporal e espacial da distribuição das chuvas, principalmente em regiões áridas e semiáridas, determina altos níveis de risco às atividades agrícolas. A irrigação é uma alternativa utilizada para viabilizar e aumentar a produção agrícola em locais de baixos índices pluviométricos. A estimativa adequada da evapotranspiração da cultura (ET) consiste no principal parâmetro a ser considerado no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação, uma vez que ela totaliza a quantidade de água utilizada nos processos de evaporação e transpiração pela cultura durante determinado período (Sedyama, 1996). A ET é obtida pelo valor da

evapotranspiração de uma cultura de referência (ET_o) corrigida pelo coeficiente da cultura (K_c), sendo esse último dependente do tipo de cultura e seu estágio de desenvolvimento.

Os principais fatores que influenciam na quantidade de água requerida pelas plantas são os climáticos, as características das plantas, as práticas culturais e o tipo de solo, enquanto as principais técnicas de estimativa do requerimento de água pelas plantas baseiam-se em dados climáticos (Sediyama, 1996). Portanto, é importante a obtenção de dados climáticos regionais confiáveis visando às estimativas mais precisas da evapotranspiração e ao melhor aproveitamento das precipitações no dimensionamento de sistemas de irrigação. Existem diversos métodos para se estimar a evapotranspiração, entretanto, normalmente eles são utilizados em condições climáticas e agronômicas muito diferentes daquelas em que inicialmente foram concebidas (Doorenbos & Pruitt, 1977). Portanto, é de extrema importância avaliar o grau de exatidão desses métodos antes de utilizá-los para nova condição.

Novas metodologias estão sendo desenvolvidas para se estimar o consumo de água pelas culturas, com vistas no incremento da eficiência do uso da água. Neste particular, o coeficiente dual de cultivo, apresentado inicialmente por Allen et al. (1998), tem sido amplamente utilizado por vários pesquisadores (Allen et al. 2005; López-Urrea et al., 2009; Liu & Luo, 2010; Flumignan et al., 2011). O coeficiente de cultura representa a integração dos efeitos de três características que distinguem a ET da ET_o : a altura da cultura, a resistência aerodinâmica de superfície e o albedo da superfície cultura-solo (Oliveira et al., 2003). Esses autores ressaltam que durante o período vegetativo, o valor de K_c varia com o desenvolvimento da cultura e com a fração de cobertura da superfície do solo pela vegetação.

Em condições de cobertura completa (estádio intermediário e final), o K_c é pouco variável para certa cultura, mas em condições de cobertura parcial (fases inicial e de crescimento rápido), depende fundamentalmente do conteúdo de água na camada superficial do solo, uma vez que, nesse momento, a evaporação direta da água do solo representa grande parte da evapotranspiração da cultura (Soares et al., 2001). A estimativa da quantidade de água que é transferida para atmosfera pode ser determinada por métodos diretos e indiretos. De acordo com Miranda et al. (2006), a E_{To} pode ser mensurada utilizando métodos diretos ou estimada por meio de informações climáticas. No primeiro grupo, estão incluídos os diferentes tipos de lisímetros e o balanço de água no solo, enquanto que no segundo, estão enquadrados os métodos teóricos e empíricos, como o tanque “Classe A”, dentre outros (Sentelhas, 2003).

De acordo com Allen et al. (1998), a evapotranspiração pode ser determinada com a avaliação de alguns componentes do balanço de água no solo. De forma resumida, o método consiste na avaliação dos fluxos de entrada e saída de água na zona radicular da cultura em um determinado período. Diversos trabalhos vêm mostrando que o desempenho do método do balanço de água no solo é satisfatório, quando comparado com medidas em lisímetros (Jensen et al., 1990; Allen et al., 1994; Maggiotto, 1996; Camargo & Sentelhas, 1997; Hussein, 1999; Pereira, 2002 e Sentelhas, 2003;). Muitas vezes, no entanto, seu emprego é restringido pela disponibilidade de dados meteorológicos, o que acaba exigindo o uso de métodos mais simples. Atualmente, no Nordeste brasileiro, especificamente no Ceará, o método de estimativa de E_{To} proposto por Hargreaves (1974) vem sendo empregado para determinação de E_{Tc} , apesar de não ser o mais adequado, por resultar em superestimativas nas condições de semiaridez do Nordeste (Souza & Yoder, 1994).

Consultores da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) (Allen et al., 1998), revisando os métodos de estimativa da ETo, deliberaram que a equação de Penman-Monteith deve ser utilizada como método padrão, porque é baseada em processos físicos e incorpora parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos. Segundo Camargo & Camargo (2000) a equação de Penman-Monteith prediz com eficácia a ETo em diversas condições de umidade atmosférica, necessitando, entretanto, de vários elementos meteorológicos, que nem sempre se encontram disponíveis em algumas regiões. A alternativa, segundo os autores, é o uso de equações simplificadas que considerem a ETo um elemento meteorológico padrão para emprego na agrometeorologia.

Dentre as variáveis do balanço de água no solo, a precipitação e a irrigação são aqueles mais facilmente avaliados. De acordo com Silva (2007), o armazenamento da água no perfil do solo pode ser obtido pela integração dos perfis de conteúdo de água no solo, o qual pode ser obtido por diferentes métodos de medição. A importância do balanço de água no solo como ferramenta para avaliar a intensidade de entradas e saídas de água no solo está relacionada não apenas ao conhecimento dos fatores que o compõe, mas também, pelo conhecimento da cultura, que representa o ponto de partida para uma interpretação adequada dos dados obtidos no balanço hídrico (Cintra et al., 2000).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área experimental

A variedade de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) estudada foi a RB 92579 (segunda folha), muito difundida na região Nordeste do Brasil. O experimento foi conduzido na Fazenda Capim II (latitude 6°54'59,88"S, longitude 35°09'17,86" O e altitude de 121 m), localizada no município de Capim, PB (Figura 1). A fazenda está situada sobre a bacia hidrográfica do Litoral Norte da Paraíba, sub bacia do Rio Miriri; a sua área de drenagem mede cerca de 436,5 km² e tem como principais usos o abastecimento humano e animal, irrigação e pesca.

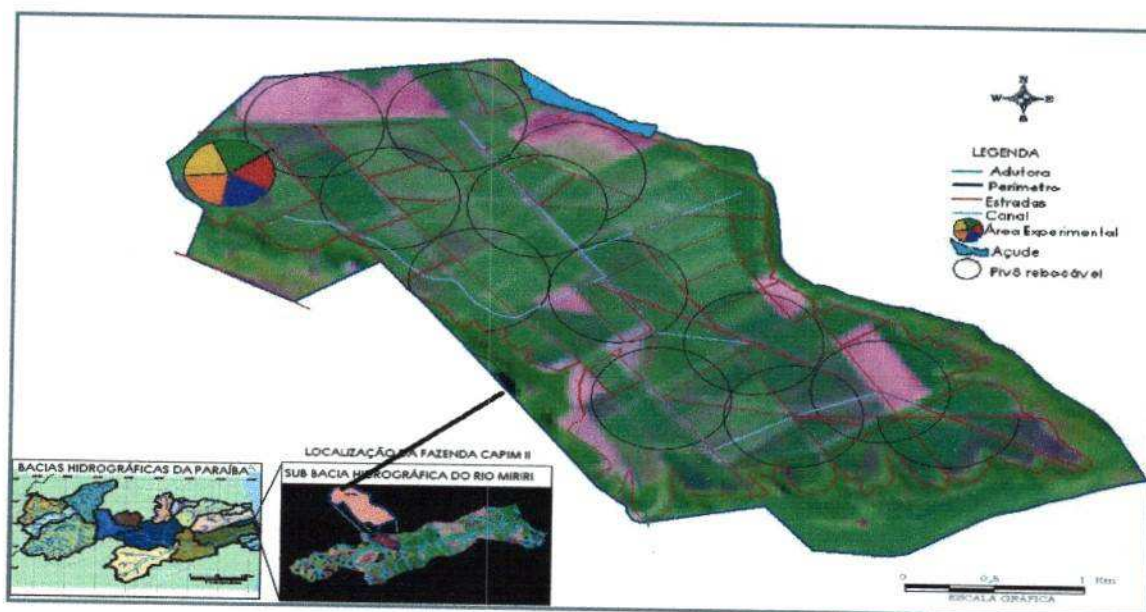


Figura 1. Mapa de localização da Fazenda Capim II e seu posicionamento na bacia hidrográfica, com destaque para a área experimental. Fazenda Capim II, Capim, PB, 2005 (Fonte: Farias, 2006)

A precipitação anual média na região é superior a 1350 mm, com seis meses secos; o clima é quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, e seca atenuada. A área de estudo pertence à Miriri Alimentos e Bioenergia S/A, que possui 6.879 ha,

plantados, dos quais cerca de 3.000 ha são irrigados com uma lâmina equivalente a 40% da ETo, com turno de rega que varia de 12 a 14 dias; Dessa área 1.000 ha são irrigados como forma de “salvamento” (irrigações com lâminas de água entre 80 mm e 120 mm, aplicados após o plantio ou colheita da cultura) (Farias, 2006).

3.2. Delineamento experimental e tratamentos de irrigação

Durante o segundo ciclo o delineamento experimental foi em blocos ao acaso, compreendendo quatro tratamentos de irrigação com um pivô central, com três repetições, utilizando-se a evapotranspiração de referência (ETo) no manejo de água, da seguinte forma: 25%, 50%, 75% e 100% ETo.

Durante os períodos experimentais, foram mantidos todos os procedimentos de tratamentos culturais adotados pela empresa agroindustrial, tais como o controle de pragas e doenças, capinas e adubação via água de irrigação. A área experimental foi dividida em cinco parcelas, de quatro hectares cada, para a determinação da umidade do solo e análise de produtividade da cultura.

3.3. Coeficiente de cultivo simples

O coeficiente de cultivo é definido como a razão entre ET da cultura e a evapotranspiração de referência Eto, definida por dados meteorológicos. Na nomenclatura da FAO-56 o K_c é expressa por:

$$K_c = \frac{ET}{ETo} \quad (1)$$

em que ET é a evapotranspiração da cultura (mm d^{-1}); ETo é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}) e K_c é o coeficiente da cultura, adimensional.

3.4. Coeficiente de cultura dual

O coeficiente da cultura dual (K_c), representado conforme a equação 2, é a soma entre os coeficientes basal da cultura (K_{cb}) que descreve a transpiração da planta e o coeficiente de evaporação da água do solo (K_e) que descreve a evaporação que ocorre na superfície do solo:

$$K_{c\text{dual}} = K_{cb} + K_e \quad (2)$$

3.4.1. Coeficiente de cultura basal

O primeiro passo para a estimativa do K_{cb} é a definição da duração dos estádios de crescimento da cultura, definidas como: estágio inicial, desenvolvimento, média e final. Em seguida, será feita a seleção de valores de K_{cb} ($K_{cb}(\text{Tab})$) para essas fases conforme sugeridos por Allen et al. (1998). Estes autores apresentaram valores tabelados de K_{cb} para diversas culturas. No entanto, tais valores foram determinados para climas sub-úmidos ($UR \approx 45\%$) e com velocidades de vento moderadas ($U_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$). Para condições climáticas diferentes desta, como e o caso da região que foi realizada a presente pesquisa, é necessário ajustar os valores de $K_{cb}(\text{Tab})$, utilizando-se a seguinte equação:

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

em que K_{cb} é coeficiente de cultura basal, para cada fase fenológica, $K_{cb}(\text{Tab})$ é o valor do K_{cb} tabelado conforme sugerido por Allen et al. (1998), u_2 é velocidade do vento média diária, a 2 m de altura (m s^{-1}); UR_{min} é a umidade relativa mínima média diária (%) e h é altura da planta (m). Os valores dos coeficientes de cultivo simples (K_c) e basal (K_{cb}), bem como a duração dos estádios fenológicos da cana-de-açúcar, de acordo com o Boletim 56 da FAO (Allen et al., 1998), são apresentados na Tabela 1. Por outro

lado, os valores de K_{cb} e K_c simples para qualquer dia i do ciclo da cultura serão calculados pela equação:

$$K_{c(i)} = K_{c(ant)} + \left(\frac{i - \sum L_{(ant)}}{L_{(período)}} \right) (K_{c(prox)} - K_{c(ant)}) \quad (4)$$

em que $K_c(i)$ é o coeficiente da cultura no dia i ; i é o número do dia do período de crescimento; $L_{período}$ é a duração do período; $\sum L_{(ant)}$ é o somatório das durações dos períodos anteriores; $K_{c(ant)}$ é o coeficiente da cultura do período anterior e $K_{c(prox)}$ é o K_c do próximo período.

Tabela 1. Duração dos estádios fenológicos da cana-de-açúcar cultivada em latitudes tropicais e os valores dos seus coeficientes de cultivo simples (K_c) e basal (K_{cb})

Estádio Fenológico	Inicial	Desenvolvimento	Médio	Final
Duração (dias)	30	50	180	60
K_c - simples	0,40	0,40	1,25	0,75
K_{cb} - basal	0,15	0,15	1,20	0,70

Fonte: Allen et al. (1998)

3.4.2. Coeficiente de evaporação de água no solo

O coeficiente de evaporação de água do solo após molhamento pela chuva ou irrigação é representado pelo K_e (coeficiente de evaporação), definida pela seguinte equação:

$$K_e = K_r (K_{c \text{ máx}} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{c \text{ máx}} \quad (5)$$

em que K_e é o coeficiente de evaporação de água do solo, adimensional; $K_{c \text{ máx}}$ é o máximo valor do K_c após chuva ou irrigação, adimensional; K_r é o coeficiente de redução da evaporação, dependente do acúmulo da lâmina de água evaporada da superfície do solo diariamente, adimensional; e f_{ew} é a fração do solo exposta e

molhada, em %. A evaporação ocorre predominantemente na fração exposta do solo e, conseqüentemente, a evaporação é restrita pela energia disponível na fração exposta do solo. Por isso, K_e não pode exceder $f_{ew} \times K_{c \text{ max}}$ (segundo termo da equação). Para o cálculo diário do K_e , então, é necessário seguir três passos: calcular $K_{c \text{ max}}$, K_r e f_{ew} .

O $K_{c \text{ max}}$ representa o limite máximo da evapotranspiração de qualquer superfície cultivada, variando dentro da faixa de 1,05 a 1,30 e pode ser calculado pela equação:

$$K_{c \text{ max}} = \max \left\{ \left[1,2 + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(UR_{\min} - 45)] \times \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \right], \{K_{cb} + 0,05\} \right\} \quad (6)$$

Os valores de u_2 , UR_{\min} e h , utilizados nesta equação foram os mesmos utilizados para a estimativa do K_{cb} (Eq. 3). Quando os valores dos K_{cs} médio e final são inferiores a 0,45 e a umidade relativa e velocidade do vento diferem de 45% e 2 m s^{-1} , respectivamente, eles devem ser ajustados de acordo com as seguintes equações:

$$K_{c \text{ med}} = K_{c \text{ méd(Tab)}} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(UR_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \quad (7)$$

$$K_{c \text{ fin}} = K_{c \text{ fin(Tab)}} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(UR_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \quad (8)$$

No primeiro estágio, a energia incidente é que limita a evaporação, pois a superfície está molhada (após chuva ou irrigação); nesse estágio, o K_r é igual a 1. Quando a água contida na superfície do solo se torna limitante para o processo evaporativo, o K_r decresce e torna-se zero quando a quantidade total de água evaporável da superfície do solo se extingue. No segundo estágio, o K_r será calculado pela equação abaixo (Allen et al., 1998).

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i}}{TEW - REW} \quad (9)$$

em que TEW é a lâmina d'água total evaporável da camada superficial do solo, em mm; e $D_{e,i}$ (início) é a lâmina d'água acumulada evaporada da camada superfície do solo no início do dia (=final do dia anterior), quando a precipitação ou irrigação ocorre no início do dia, em mm; e REW é a lâmina d'água facilmente evaporável no primeiro estágio (quando $K_r=1$). A lâmina total evaporável da camada superficial (TEW) é dependente dos limites de água disponível do solo e da profundidade da superfície do solo que perde água por meio da evaporação, ou seja:

$$TEW = \frac{(CC - 0,5PMP)}{10} \times Z_e \quad (10)$$

em que CC é a capacidade de campo, em %; PMP é o ponto de murcha permanente, em %; e Z_e é a profundidade da superfície do solo sujeita a evaporação, em cm (10 a 15 cm). A água facilmente evaporável (REW) é estimada pela equação a seguir:

$$REW = 8 + 0,08Arg \quad (11)$$

em que Arg = teor médio de argila no solo, na camada de 0-30 cm. As lâminas d'água acumuladas evaporadas da camada superficial do solo são determinadas a partir do balanço hídrico diário da camada superficial do solo com objetivo de determinar a lâmina acumulada de evaporação. Este balanço é determinado por meio da seguinte equação:

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + T_{ew,i} + DP_{e,i} \quad (12)$$

em que P_i é a precipitação no dia i , em mm; RO_i é o escoamento superficial no dia i , em mm; I_i é a lâmina de irrigação no dia i , em mm; E_i é a evaporação no dia i , em mm; $T_{ew,i}$ é a lâmina transpirada na fração exposta e umedecida da superfície do solo no dia i , em mm; DP_{ei} representa as perdas por percolação profunda no dia i , em mm; f_w é a

fração da superfície do solo molhada pela irrigação ou precipitação; f_{ew} a fração exposta e molhada da superfície. Os termos E_i e $DP_{e,i}$ são dados pelas equações a seguir.

$$E_i = K_e \times ET_o \quad (13)$$

$$DP_{e,i} = (P_i - RO_i) + \frac{I_i}{f_w} - D_{e,i-1} \quad (14)$$

A Eq. (14) é válida para $DP_{e,i} > 0$, caso contrário, $DP_{e,i} = 0$. O termo $T_{ew,i}$ é considerado zero com base nas observações feitas por Allen et al. (1998) de que a transpiração ocorrida na camada evaporante do solo é pequena e pode ser ignorada. Os valores de P_i foram obtidos na PCD e I_i foi determinado com base em 100% da ET_o . A fração exposta e molhada da superfície (f_{ew}) define a percentagem da área de cultivo mais susceptível ao processo evaporativo e é calculada pela seguinte equação:

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad (15)$$

em que f_c é a fração média de solo coberto; $1 - f_c$ é a fração média de solo exposto e não coberto (ou sombreado) por vegetação, variando de 0,01 a 1; e f_w é a fração da superfície do solo molhada pela irrigação ou precipitação, variando de 0,01 a 1.

Quando f_c não é medido em campo, ela pode ser estimada pela seguinte equação:

$$f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{c \min}}{K_{c \max} - K_{c \min}} \right)^{(1+0,5h)} \quad (16)$$

em que f_c é a fração média de solo coberto, K_{cb} o coeficiente de cultura basal, $K_{c \min}$ é o K_c mínimo para solo seco nu sem nenhuma cobertura de solo (0,15-0,20), $K_{c \max}$ é o K_c máximo logo após o umedecimento do solo e h a altura da planta.

3.4.3. Evapotranspiração em condições de estresse de água

Os efeitos de estresse de água no solo são obtidos pelo produto do coeficiente de cultivo basal e o coeficiente de estresse de água (K_s), da seguinte forma:

$$ET_{aj} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o \quad (17)$$

Para condições em que ocorrem limitações de água no solo $K_s < 1$; entretanto, quando não existe estresse de água no solo $K_s = 1$. O termo K_s incorpora os efeitos do estresse de água na evapotranspiração da cultura. Quando é usado o coeficiente de cultivo simples, tem-se:

$$ET_{aj} = K_s K_c ET_o \quad (18)$$

Como o estresse de água no solo impacta apenas a evapotranspiração, a Eq. (17) oferece estimativas mais precisas do que a Eq. (18). Os procedimentos para a obtenção do coeficiente de estresse de água são apresentados a seguir.

3.4.4. Total de água disponível (TAW)

Após uma chuva forte ou irrigação, o solo drena até alcançar a capacidade de campo, o total de água disponível na zona de raiz é dado por:

$$TAW = 1000(\theta_{cc} - \theta_{PMP})Z_r \quad (19)$$

em que TAW = total de água disponível na zona de raiz (mm), θ_{cc} = conteúdo de água à capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{PMP} = conteúdo de água no ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e Z_r = profundidade da raiz (m).

3.4.5. Água facilmente disponível (RAW)

A fração de TAW que a cultura pode extrair sem sofrer estresse é chamada de água no solo facilmente disponível (RAW)

$$RAW = pTAW \quad (20)$$

em que RAW = água no solo facilmente disponível na zona de raiz (mm), P = fração média de TAW que pode ser reduzida da zona de raiz antes do estresse de umidade. O valor adotado nesta pesquisa foi de 0,65 para a cana-de-açúcar (Allen et al., 1998).

Os efeitos do estresse hídrico na ET da cultura são descritos pela redução do valor do coeficiente de cultivo. Tais efeitos são obtidos através da multiplicação do coeficiente de cultura pelo coeficiente de estresse hídrico (K_s). Portanto, o coeficiente de estresse hídrico assume as seguintes condições:

$$K_s = 1, \text{ para } Dr_{i-1} \leq RAW \quad (21)$$

$$K_s = \frac{TAW - Dr_{i-1}}{TAW - RAW} \text{ para } Dr_{i-1} > RAW \quad (22)$$

em que K_s = coeficiente de estresse hídrico, depende da água disponível no solo [0-1], Dr_{i-1} = redução de água na zona radicular no dia anterior [mm].

3.4.6. Balanço de água na zona radicular

A depleção (ou redução) de água na zona radicular no final do dia i pode ser estimada por:

$$Dr_i = Dr_{i-1} - P_i + RO_i - I_i - CR_i + ET_i + DP_i \quad (23)$$

em que Dr_i = redução de água na zona radicular no final do dia i [mm], Dr_{i-1} = Redução de água na zona radicular no fim do dia anterior, $i-1$ [mm], P_i = Precipitação no dia i [mm], RO_i = Escoamento superficial do solo no dia i [mm], I_i = Irrigação no dia i [mm], CR_i = Ascensão capilar a partir da coluna do lençol freático no dia i [mm], ET_i = Evapotranspiração da cultura no dia i [mm] e DP_i = Perdas de água fora da zona radicular por percolação no dia i [mm]. No primeiro dia de elaboração do balanço $Dr_{i-1} = RAW$; em seguida, o Dr_i no final do dia é obtido pela Eq. 23.

Para iniciar o balanço de água na zona radicular, a depleção inicial (Dr_{i-1}) na zona radicular no primeiro dia deve ser estimada. A redução inicial pode ser derivada a partir da quantidade de água no solo por:

$$Dr_{i-1} = 1000(\theta_{cc} - \theta_{i-1})Z_r \quad (24)$$

em que Dr_{i-1} = redução de água da zona radicular no fim do dia anterior, $i-1$ [mm], θ_{cc} = umidade do solo à capacidade de campo em (m^3/m^3), θ_{i-1} = umidade de solo médio na zona radicular em (m^3/m^3), Z_r = Profundidade radicular (m).

Após forte chuva ou irrigação, a umidade do solo na zona radicular pode exceder a capacidade campo. Nesse caso, presume-se que a umidade do solo está em capacidade de campo nesse dia, de forma que a Dr_{i-1} na Eq. 23 torna-se nula. Assim, após fortes chuvas ou irrigação a percolação é dada por:

$$DP_i = (P_i - RO_i) + I_i - Dr_{i-1} \quad (25)$$

3.5. Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência foi calculada pelo método de Penman-Monteith (FAO/56), considerando-se a resistência estomática de 70 sm^{-1} , albedo de 23% e a altura da cultura hipotética fixada em 0,12m (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900U_2}{T + 273} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (26)$$

em que ET_o é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}), R_n (saldo de radiação) e G (densidade do fluxo de calor no solo) são expressos em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, Δ é a declinação da curva de saturação do vapor da água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) e U_2 é a velocidade do vento (média diária) a 2 m acima da superfície do solo (m s^{-1}), T é a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$), e_s é a

pressão de saturação do vapor de água (kPa), e_a é a pressão real do vapor (kPa) e γ é o fator psicrométrico (MJ kg^{-1}). Os dados para a obtenção da evapotranspiração de referência foram obtidos na plataforma de coleta de dados (PCD) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), instalada a 2 km da área experimental na sede da Fazenda Capim II, pertencente à Miriri Alimentos e Bioenergia S/A, no Estado da Paraíba.

3.6. Umidade do solo

As análises das características físicas e químicas do solo das áreas experimentais foram realizadas com base em amostras indeformadas, coletadas a partir de trincheiras abertas no interior das parcelas experimentais nas camadas de solo: 0,00-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80; 0,80-1,00 m, com três repetições. As amostras foram utilizadas para determinação da densidade global, textura e a curva de retenção de água no solo.

A condutividade hidráulica do solo da área experimental foi determinada com base em amostras coletadas na camada de solo com a maior concentração de raízes. Essas análises foram efetuadas no Laboratório de Física dos Solos da Universidade Federal de Viçosa, MG. A umidade do solo foi monitorada utilizando-se sondas FDR (Frequency Domain Reflectometry), modelo PR2/6, Delta-T (Devices Ltd., Burwell, Cambridge, UK) (Figura 2), com três tubos de acesso para cada tratamento de irrigação, instalados a 0,20 m de cada ponto de observação, nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60, 70, 80, 90 e 100 cm (Figura 3).

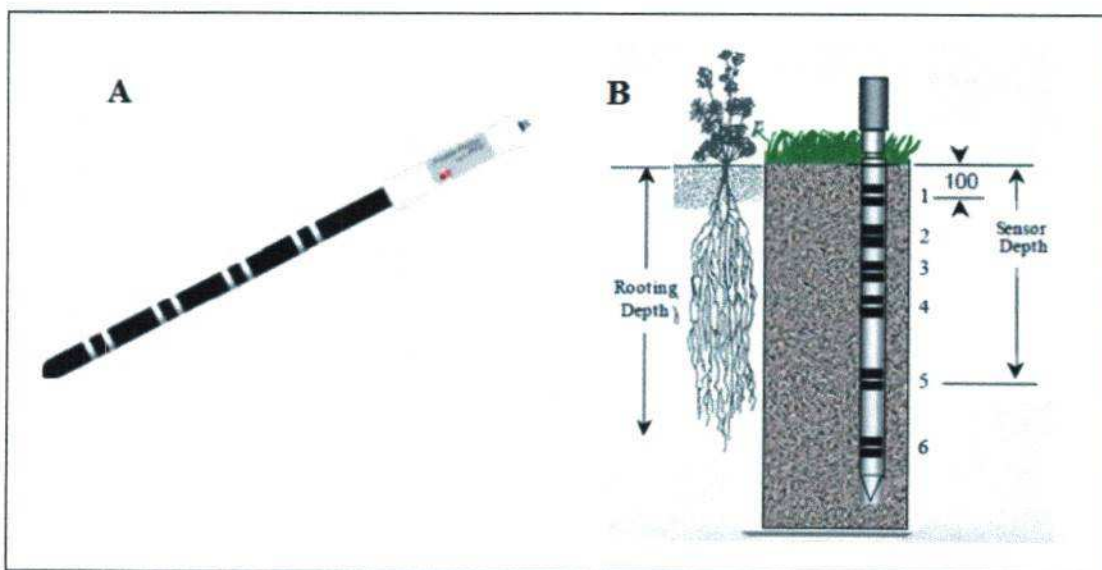


Figura 2. Detalhes da sonda FDR (Reflectometria no domínio da frequência), modelo PR2/6, Delta-T (Devices Ltd., Burwell, Cambridge, UK) (A) e o esquema da sonda PR2 no solo (B)

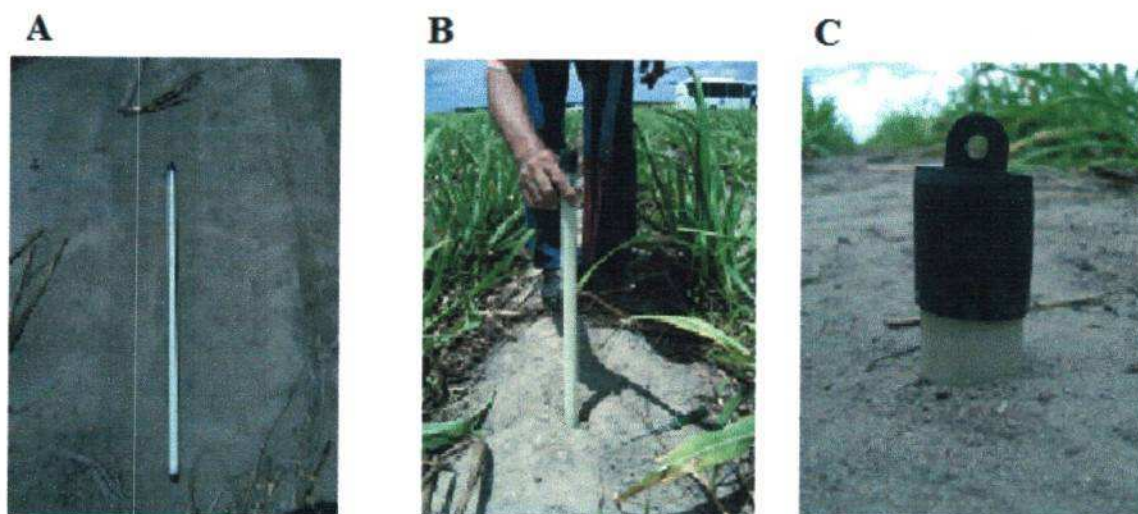


Figura 3. (A) Tubos de acesso para cada tratamento de irrigação, instalados a 0,20 m de cada ponto de observação, nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60, 70, 80, 90 e 100 cm; (B) Tubo de acesso sendo instalado em campo; (C) tubo de acesso já instalado no solo da área experimental

3.7. Eficiência do uso de água

A eficiência do uso de água (EUA) foi avaliada com base na produtividade total, utilizando-se a quantidade de água aplicada por irrigação e na evapotranspiração da cultura, através das seguintes equações:

$$EUA_i = \frac{\text{Prod.}}{\text{Irrig}} \quad (27)$$

$$EUA_{ET} = \frac{\text{Prod.}}{\text{ET}} \quad (28)$$

em que EUA é a eficiência do uso de água ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$), Prod. é a produtividade da cana-de-açúcar (kg ha^{-1}), Irrig. é a irrigação (mm) e ET é a evapotranspiração da cultura (mm).

3.8. Análise estatística

Análise de variância (ANOVA) foi aplicada para testar se houve diferença estatisticamente significativa entre a altura e diâmetro dos colmos das plantas com a variação das lâminas de irrigação aplicadas na cana-de-açúcar. O teste de Tukey foi utilizado para avaliar a significância estatística dessas diferenças, em níveis de 5% de probabilidade com base no “software” Assistat (Silva, 1996).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Crescimento e desenvolvimento da cultura

O corte da variedade de cana-de-açúcar (RB 92579) durante o segundo ciclo ocorreu no dia 10 de outubro de 2009. O ciclo da cana-de-açúcar foi dividido da seguinte forma: 30 dias para o estágio inicial (correspondente à brotação e emergência dos colmos primários), 50 dias para o estágio de desenvolvimento (perfilhamento e estabelecimento da cultura), 180 dias para o estágio médio (crescimento dos colmos) e 60 dias para o estágio final (maturação dos colmos), conforme estabelecido por Allen et al. (1998) para a cana-de-açúcar cultivada em regiões tropicais. Por outro lado, o terceiro ciclo da variedade de cana-de-açúcar foi completado no dia 23 de julho de 2011 totalizando também 320 dias, que foi dividido conforme as datas na Tabela 2.

Tabela 2. Duração dos estádios fenológicos da cana-de-açúcar durante o segundo e o terceiro ciclos cultivada nos tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba

Estádios		Especificações	Período	Nº de dias
Segundo ciclo				
I	Inicial	Brotação e emergência dos colmos	10 Out/08 Nov.	30
II	Desenv.	Perfilhamento e estabelecimento da cultura	09 Nov/28 Dez.	50
III	Médio	Crescimento dos colmos	29 Dez/26 Jun.	180
IV	Final	Maturação dos colmos	27 Jun/25 Ago.	60
Total				320
Terceiro ciclo				
I	Inicial	Brotação e emergência dos colmos	07 Set/06 Out	30
II	Desenv.	Perfilhamento e estabelecimento da cultura	07 Out/25 Nov	50
III	Médio	Crescimento dos colmos	26 Nov/24 Mai	180
IV	Final	Maturação dos colmos	25 Mai/23 Julho	60
Total				320

4.2. Irrigação e demanda evaporativa

A Tabela 3 exibe os valores médios diários e acumulados da evapotranspiração de referência, da precipitação acumulada e o total de água aplicada para cada tratamento de irrigação de acordo com os estádios fenológicos durante os dois ciclos da cultura da

cana-de-açúcar. No segundo ciclo, os valores médios da ETo variaram entre 5,62 mm d⁻¹ no estágio médio (correspondente ao crescimento dos colmos) a 8,00 mm d⁻¹, no estágio final (que corresponde a maturação dos colmos). A precipitação total durante o segundo ciclo da cana-de-açúcar foi de 621,0 mm e a maior volume de água aplicado por irrigação foi de 1312,2 mm, referente à lâmina plena de 100% da ETo.

No final do segundo ciclo da cana-de-açúcar, o valor da ETo acumulada foi de 2029,42 mm, sendo que o maior valor registrado foi de 1011,6 mm no estágio médio que envolve o período de crescimento dos colmos. Já o menor valor da ETo acumulada ocorreu no estágio inicial, que correspondeu à brotação e emergência dos colmos, com 207,8 mm, em face desse estágio ser de apenas 30 dias, bem como pela menor demanda evaporativa da região. Com relação ao terceiro ciclo da cana-de-açúcar os valores médios da ETo variaram entre 5,59 mm d⁻¹, no estágio médio que corresponde ao crescimento dos colmos, a 6,27 mm d⁻¹ no estágio inicial que corresponde a brotação e emergência dos colmos.

A precipitação total durante o terceiro ciclo da cultura foi de 1319,25 mm e a maior volume de água aplicado por irrigação foi de 840,34 mm, referente à lâmina plena (100% da ETo). O valor da ETo acumulada no final do terceiro ciclo foi de 1829,1 mm, sendo o maior valor acumulado de 1005,4 mm também durante o estágio médio da cultura. O menor valor da ETo nesse período foi de 188,2 mm que correspondeu ao estágio inicial da cultura, considerado o estágio mais curto do ciclo. O total pluviométrico do terceiro ciclo foi 698,25 mm maior do que aquele observado durante o segundo ciclo da cana-de-açúcar. Isso provocou uma redução de 13,7 % da ETo diária em relação ao segundo ciclo da cana-de-açúcar, em face da redução da demanda evaporativa. A ETo total durante o terceiro ciclo da cultura analisada representa 90,13% da ETo total do segundo ciclo.

Tabela 3. Valores médios e acumulados da evapotranspiração de referência (ET_o), precipitação acumulada (Prec) e irrigação (mm) para cada tratamento durante cada estágio fenológico da cana-de-açúcar no segundo e terceiro ciclos

Estádios		ET _o (mm d ⁻¹)		Prec (mm)	Irrigação (mm)			
		Diário	Total		25%ET _o	50%ET _o	75%ET _o	100%ET _o
Segundo ciclo								
I	Inicial	6,93	207,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
II	Desenv.	6,60	330,1	12,0	34,2	71,8	109,4	146,9
III	Médio	5,62	1011,6	421,0	300,8	531,5	748,5	932,2
IV	Final	8,00	479,9	188,0	66,5	110,9	157,6	233,1
Média		6,79	-	-	-	-	-	-
Total			2029,42	621,0	401,6	714,2	1015,5	1312,2
Terceiro ciclo								
I	Inicial	6,27	188,2	0,0	-	-	-	0,0
II	Desenv.	5,87	293,3	93,5	-	-	-	0,0
III	Médio	5,59	1005,4	1113,75	-	-	-	511,25
IV	Final	5,70	342,2	112,0	-	-	-	329,09
Média		5,86	-	-	-	-	-	-
Total			1829,1	1319,25	-	-	-	840,34

4.3. Variáveis de crescimento da cana-de-açúcar

4.3.1. Altura dos colmos

A correlação entre a altura dos colmos e a umidade do solo média para cada lâmina de irrigação durante o segundo ciclo da cana-de-açúcar é apresentado na Figura 4. Os valores médios da altura dos colmos (AC) para os tratamentos de sequeiro (TS), 25, 50, 75 e 100% da ET_o foram de 1,83; 2,41; 2,64; 3,05 e 3,30 m, respectivamente. Portanto, o TS representa 56 % do valor obtido para a altura dos colmos da cana-de-açúcar quando submetida à lâmina plena de irrigação, que corresponde a 100% da ET_o. Os maiores valores da altura da planta, como esperado, ocorreram quando a cultura foi submetida à lâmina de 100% da ET_o, que correspondeu a umidade média do solo de 0,166 m³ m⁻³. Por outro lado, a umidade média do solo para o TS e os tratamentos de 25% ET_o, 50% ET_o e 75% ET_o foram, respectivamente, de 0,094; 0,097; 0,114 e 0,131 m³ m⁻³. Este resultado indica que o crescimento da cana-de-açúcar é significativamente afetado pelas condições de umidade do solo. O alto valor do coeficiente de

determinação ($r^2 = 0,92$) indica o alto grau de correlação entre a umidade do solo e o crescimento da planta.

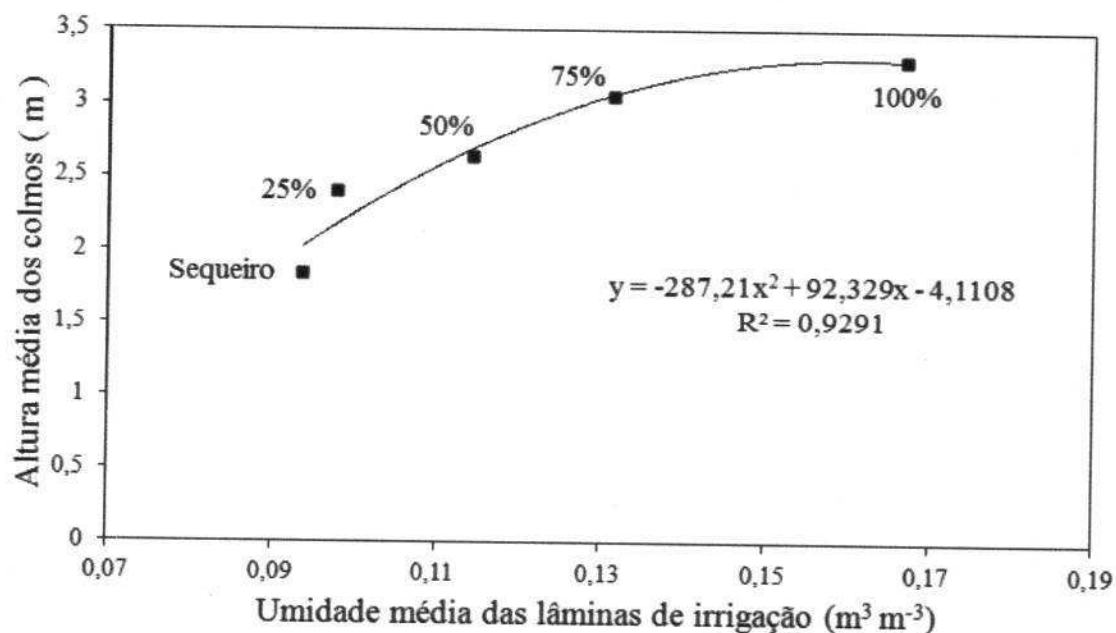


Figura 4. Correlação entre a altura dos colmos e a umidade do solo média para cada lâmina de irrigação durante o segundo ciclo da cana-de-açúcar

Os valores médios da altura dos colmos e a umidade do solo para os tratamentos de sequeiro e para a lâmina plena de irrigação durante o terceiro ciclo da cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 4. Os valores médios da AC para TS e os tratamentos de 100% da ETo foram de 2,57 e 3,29 m, respectivamente.

Tabela 4. Valores médios da altura dos colmos e a umidade do solo para os tratamentos de sequeiro e para a lâmina plena de irrigação durante o terceiro ciclo da cana-de-açúcar

Tratamentos	Umidade do solo ($m^3 m^{-3}$)	Altura dos colmos (m)
Sequeiro	0,13	2,57
100% da ETo	0,97	3,29

Portanto, o TS representou 78,11% do valor obtido para a altura dos colmos da cana-de-açúcar quando submetida à lâmina plena de irrigação. Os maiores valores da

altura da planta, como esperado, ocorreram quando a cultura foi submetida à lâmina de 100% da ETo, que correspondeu a umidade média do solo de $0,97 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Por outro lado, a umidade média do solo para o TS foi de $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. O comportamento da altura médias dos colmos da cana-de-açúcar ao longo dos estádios fenológicos de segundo e terceiro ciclos são exibidos na Figura 5. Pode-se verificar que o crescimento da planta exibe comportamento quase que exponencial em todos os tratamentos de irrigação e de sequeiro durante o segundo e terceiro ciclos da cultura.

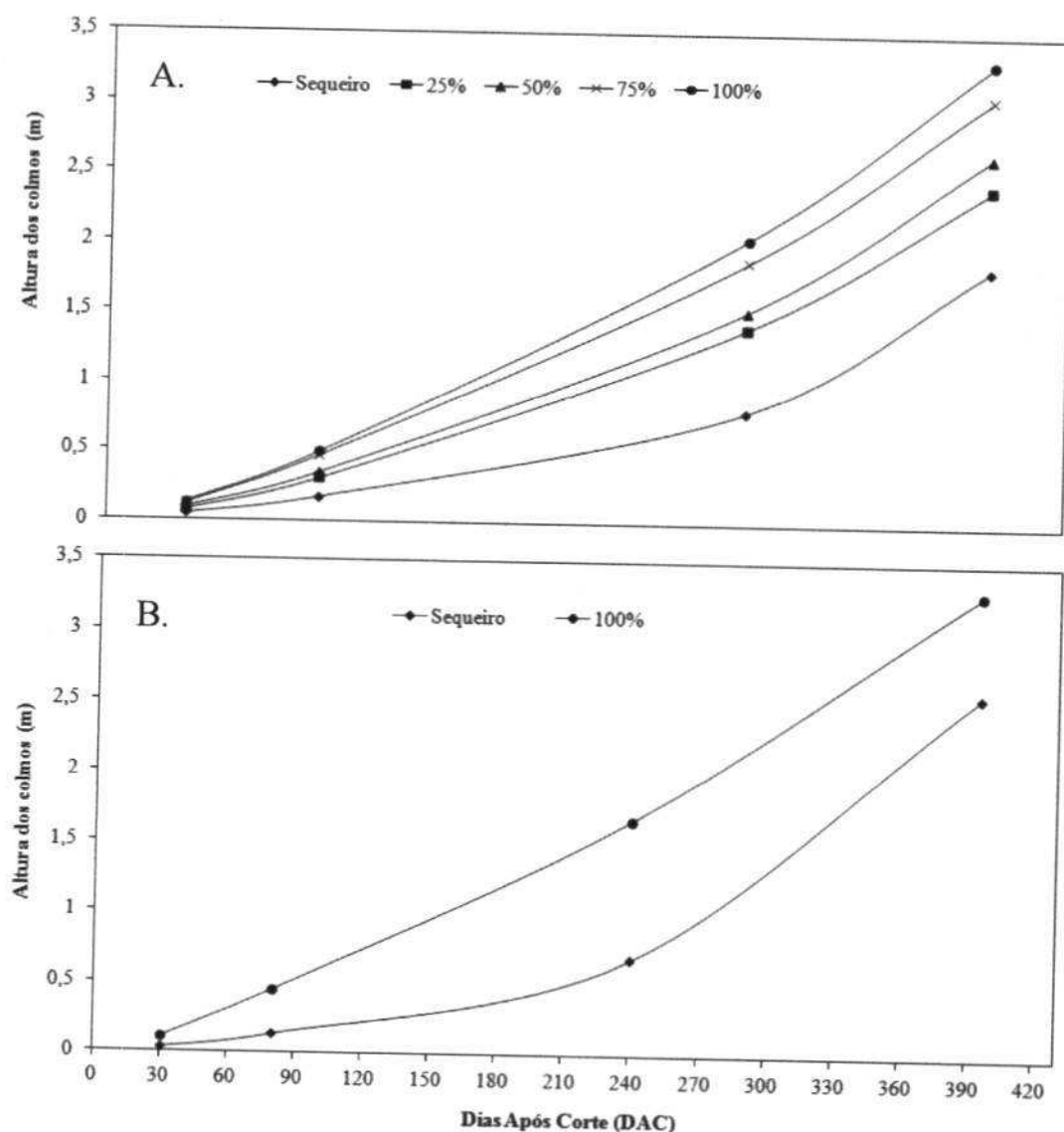


Figura 5. Comportamento da altura dos colmos ao longo dos estádios fenológicos do segundo (A) e terceiro (B) ciclos

4.3.2. Diâmetro dos colmos

O comportamento temporal do diâmetro dos colmos (DC) da cana-de-açúcar ao longo do segundo e terceiro ciclos são exibidos na Figura 6. Os valores médios do DC no segundo ciclo no TS e nos tratamentos de 25, 50, 75 e 100% da ETo foram de 2,29; 2,52; 2,57; 2,91 e 2,93 cm, respectivamente. O diâmetro dos colmos da cana-de-açúcar para o TS representa 78,16% daquele obtido para lâmina plena de irrigação. Portanto, a umidade do solo exerceu influência maior na altura dos colmos do que no diâmetro da planta da cana-de-açúcar. Apesar disso, o diâmetro do colmo da cana-de-açúcar é influenciado pela quantidade de água aplicada, principalmente quando comparado o TS com a aplicação de água de 25, 50 e 75% da ETo. Por outro lado, no estágio final da planta, o diâmetro dos colmos nos tratamentos de 75 e 100% da ETo são praticamente iguais. Ao contrário da altura dos colmos, o diâmetro da planta apresenta relacionamento praticamente linear ao longo do segundo ciclo.

Ao longo do terceiro ciclo, os valores médios do DC para os tratamentos TS e de 100% da ETo foram de 2,5 e 2,9 cm, respectivamente. O TS representa 86,20% do valor obtido para o diâmetro dos colmos da cana-de-açúcar quando submetida à lâmina plena de irrigação. Portanto, a umidade do solo continua a exercer influência maior na altura dos colmos do que no diâmetro da planta da cana-de-açúcar também no terceiro ciclo. Apesar disso, o diâmetro do colmo da cana-de-açúcar continuou sendo influenciado pela quantidade de água aplicada, principalmente quando se compara o TS com a aplicação de água de 100% da ETo.

Os resultados aqui apresentados são consistentes com aqueles obtidos por Silva et al. (2009) em estudo realizado para analisar o crescimento da cana-de-açúcar com e sem irrigação complementar. Esses autores concluíram que quando submetida à

irrigação, a cultura da cana apresentou melhor rendimento em todas as variáveis avaliadas, quando comparado na ausência de irrigação.

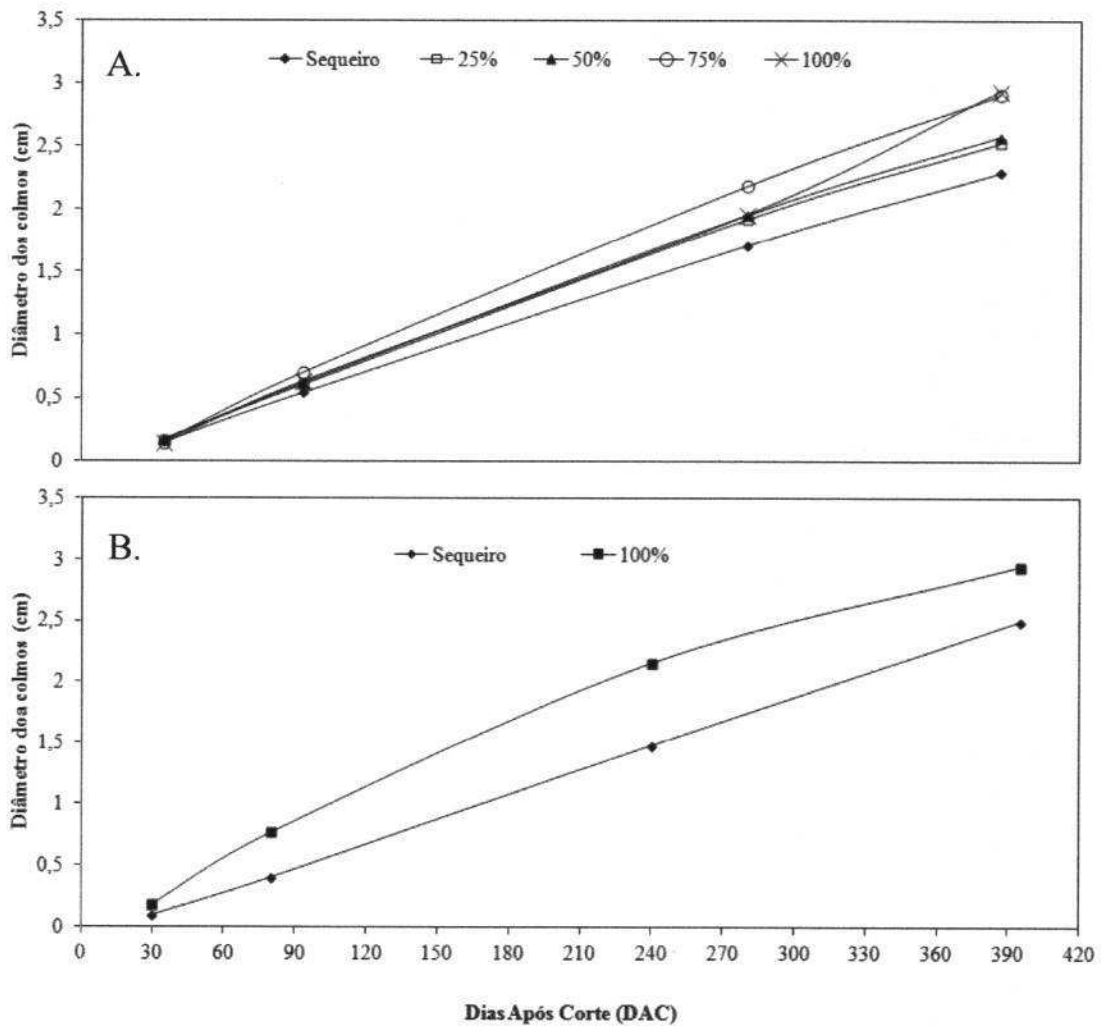


Figura 6. Comportamento do diâmetro dos colmos ao longo dos estádios fenológicos do segundo (A) e terceiro (B) ciclos da cana-de-açúcar

4.4. Análise estatística

4.4.1. Altura média dos colmos

A análise de variância aplicada para os valores médios da altura dos colmos da cana-de-açúcar nos estádios fenológicos da planta durante o segundo ciclo para cada

lâmina de irrigação revelou que no estágio inicial não houve diferença significativa entre o TS e praticamente todos os tratamentos de irrigação (Tabela 5). Por outro lado, também não houve diferença significativa pelo teste de Tukey entre os valores da altura dos colmos nos tratamentos TS e 25% da ETo; 25 e 50% da ETo; 50 e 75% da ETo e 75 e 100% da ETo durante o estágio de desenvolvimento.

Tabela 5. Análise de variância da altura média dos colmos de cana-de-açúcar entre o tratamento de sequeiro (TS) e as lâminas de irrigação ao longo do segundo ciclo

TRAT.	INICIAL	DESENVOLVIMENTO	MÉDIO	FINAL
TS	0,04 a	0,15 b	0,80c	1,83 c
25%	0,07 a	0,31 ab	1,41 b	2,41 bc
50%	0,09 a	0,34 ab	1,52 b	2,64 ab
75%	0,12 a	0,47 ab	1,87 a	3,05 ab
100%	0,13 a	0,49 a	2,04 a	3,48a

*As médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

No estágio final, verificou-se que o valor médio da altura dos colmos no TS não diferiu estatisticamente daquele com o tratamento com a lâmina de irrigação de 25% da ETo. Apesar dos valores de altura dos colmos na lâmina plena terem sido os maiores (348,44 cm), no estágio final esses valores não diferiram estatisticamente dos valores das lâminas de 50 (2,64m) e 75% da ETo (3,05m). Resultados semelhantes foram obtidos por Dantas Neto et al. (2006) quando estudaram a resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, com diferentes níveis de irrigação e adubação. Eles verificaram que essa variável de crescimento foi influenciada pela quantidade de água aplicada através de lâminas de irrigação. No presente estudo, destaca-se que houve um crescimento linear da altura dos colmos com o aumento da irrigação em todos os estágios fenológicos da planta. Os valores médios da altura dos colmos no estágio final para o TS e os tratamentos de 25, 50, 75 e 100% da ET foram, respectivamente, de 1,83; 2,41; 2,64; 3,05e 3,48 m.

A análise de variância da altura média dos colmos de cana-de-açúcar entre o tratamento de sequeiro (TS) e a lâmina de irrigação plena, aplicadas ao longo do terceiro ciclo é exibida na Tabela 6. Constatou-se que os valores da altura dos colmos entre os estádios inicial e final apresentaram diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade entre o TS (0,03 m) e a lâmina plena de irrigação, correspondente a 100 ETo (0,10 m) no estádio inicial (Tabela 6).

Tabela 6. Análise de variância da altura média dos colmos de cana-de-açúcar entre o tratamento de sequeiro (TS) e a lâmina de irrigação plena ao longo do terceiro ciclo

Tratamentos	Inicial	Desenvolvimento	Médio	Final
TS	0,03 b	0,13b	0,69 b	2,57 b
100%	0,10 a	0,45a	1,67a	3,29 a

*As médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Os valores médios da altura dos colmos no estádio final no TS e no tratamento de 100% da ETo foram, respectivamente, de 2,57 e 3,29 m. Em todos os estádios fenológicos pode-se observar que os maiores valores da altura dos colmos no terceiro ciclo da cana-de-açúcar ocorreram com lâmina plena de irrigação. Coelho et al. (2002), analisando o crescimento da cana-soca em solo de cerrado, no município de Pompeu, MG, encontraram valores médios para altura dos colmos de 1,02 m em plantio sem irrigação e de 2,54 m com irrigação.

4.4.2. Diâmetro médio dos colmos

A análise de variância aplicada ao diâmetro médio dos colmos da cana-de-açúcar durante o segundo ciclo ao longo dos estádios fenológicos é apresentada na Tabela 7. Constata-se que durante o estádio fenológico inicial, que corresponde à brotação e emergência dos colmos, houve diferença significativa do TS apenas em relação ao

tratamento com a lâmina de irrigação 75% da ETo; enquanto os demais tratamentos de irrigação não diferiram estatisticamente em relação ao tratamento TS ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey . O padrão de comportamento de aumento linear do diâmetro dos colmos da cana-de-açúcar foi mantido em todos os estádios fenológicos ao longo do ciclo da cultura, porém apenas do TS ao tratamento de 75% da ETo. Especificamente, do estágio inicial ao estágio médio, os maiores valores do diâmetro dos colmos ocorreram em relação à lâmina de irrigação 75% da ETo, sendo de 0,14; 0,69 e de 2,18 cm, respectivamente, nos estádios inicial, desenvolvimento, médio e final.

Tabela 7. Análise de variância do diâmetro médio dos colmos de cana-de-açúcar entre o tratamento de sequeiro (TS) e as lâminas de irrigação aplicadas ao longo do segundo ciclo

Tratamentos	Inicial	Desenvolvimento	Médio	Final
TS%	0,11 b	0,54 b	1,71 b	2,29 b
25%	0,12 ab	0,60 b	1,92 ab	2,52 ab
50%	0,12 ab	0,61 ab	1,95 ab	2,57 ab
75%	0,14 a	0,69 a	2,18 a	2,90 a
100%	0,13 ab	0,63 ab	1,95 ab	2,93 a

* As médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Os valores médios do diâmetro dos colmos no tratamento de 75% da ETo, quando comparados com aqueles do tratamento de 100% da ETo, não apresentaram diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. O crescimento do diâmetro da planta com a lâmina de irrigação não apresentou diferença estatisticamente significativa entre nenhum tratamento de irrigação e o TS no estágio inicial. Já no estágio final, o maior valor do diâmetro dos colmos correspondeu à lâmina plena, com diâmetro médio de 2,93 cm, enquanto a lâmina de 75% da ETo produziu o diâmetro médio de 2,9 cm, cuja diferença é muito pequena que não é estaticamente diferente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 8 é apresentada a análise de variância do diâmetro médio dos colmos de cana-de-açúcar entre o tratamento de sequeiro (TS) e a lâmina de irrigação plena, aplicadas ao longo do terceiro ciclo. Constatou-se que houve diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey entre o tratamento de sequeiro e de 100% da ETo em todos os estádios fenológicos.

Tabela 8. Análise de variância do diâmetro médio dos colmos da cana-de-açúcar entre o tratamento de sequeiro (TS) e a lâmina de irrigação plena, aplicadas ao longo do terceiro ciclo

Tratamentos	Inicial	Desenvolvimento	Médio	Final
TS%	0,09 b	0,43 b	1,48 b	2,49 b
100%	0,18 a	0,75 a	2,16 a	2,94 a

*As médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

O padrão de aumento linear do diâmetro dos colmos da cana-de-açúcar (terceira ciclo) foi mantido em todos os estádios fenológicos ao longo de seu ciclo. Especificamente, do estágio inicial ao estágio final, os maiores valores do diâmetro dos colmos ocorreram em relação à lâmina de irrigação de 100% da ETo, sendo respectivamente, 0,18; 0,75; 2,16 e 2,94 cm, nos estádios inicial, desenvolvimento, médio e final. Azevedo (2002), quando analisou a resposta da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e de adubação de cobertura nos tabuleiros costeiros da Paraíba, constatou que os menores diâmetros foram encontrados nas parcelas com tratamento de sequeiro.

4.5. Produtividade e eficiência do uso da água

Os valores da produtividade, lâminas de irrigação e a eficiência de uso de água (EUA) com base na irrigação da cana-de-açúcar no segundo e terceiro ciclos são apresentados na Tabela 9. Durante o segundo ciclo, os valores de produtividade no TS

e nos tratamentos de 25, 50, 75 e 100% da ETo foram, respectivamente, 62,6; 67,85; 100,61; 110,28 e 136,05 t ha⁻¹. Assim, a produtividade do TS correspondeu a 46,01% da produtividade da cana-de-açúcar quando submetida à lâmina de 100% da ETo. Esse resultado indica que a produtividade da cana-de-açúcar é significativamente afetada pelas condições de déficit hídrico, pois a diferença de produtividade entre o TS e a lâmina de 100% da ETo foi de 73,45 t ha⁻¹ de matéria-prima.

Tabela 9. Produtividade média, lâmina de irrigação e eficiência de uso de água (EUA) com base na irrigação aplicada à cana-de-açúcar no segundo e terceiro ciclos da cultura

Tratamentos	Lâmina (mm)	Produtividade (t ha ⁻¹)	EUA (t ha ⁻¹ mm ⁻¹)
Segundo ciclo			
Sequeiro	-	62,60	-
25%	462,22	67,85	0,147
50%	724,76	100,61	0,139
75%	1022,52	110,28	0,108
100%	1403,71	136,05	0,097
Terceiro ciclo			
Sequeiro	-	70,0	-
100%	840,34	131,00	0,156

Os valores de produtividade no terceiro ciclo no TS e no tratamento de 100% da ETo foram, respectivamente, de 70,0 e 131,0 t ha⁻¹. A produtividade do TS correspondeu a 53,44% da produtividade da cana-de-açúcar quando submetida à lâmina de 100% da ETo. Para este ciclo, o resultado continua indicando que a produtividade da cana-de-açúcar é significativamente afetada pelas condições de déficit hídrico, pois a diferença de produtividade entre o TS e a lâmina de 100% da ETo foi de 61,0 t ha⁻¹ de matéria-prima. Farias (2001) encontrou diferença significativa de 28,26 t ha⁻¹ entre a cana irrigada e a cana de sequeiro. Por outro lado, nas condições de Brasil Central, a produção de cana-de-açúcar integral fresca por hectare por corte varia entre 60 e 120 toneladas, por um período de até cinco anos, obtendo maior produtividade no primeiro ano (Thiago & Vieira, 2002). Assim, a produtividade da cana-de-açúcar está

diretamente relacionada com o seu perfilhamento, que é uma característica varietal. A capacidade que uma planta de mobilizar as suas reservas, emitindo mais ou menos brotos em determinada condição ambiental, é o que a caracteriza em alto, médio ou baixo índice de brotação. O clima, a variedade, o tipo de solo, o estágio de corte, a data do plantio, dentre outros fatores também influenciam na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (Maximiliano, 2002).

A lâmina de água total aplicada nos tratamentos de 25, 50, 75 e 100% da ETo no segundo ciclo da cana-de-açúcar foram, respectivamente, 462,22; 724,76; 1022,52 e 1403,71 mm. A reposição de água baseada na lâmina de 100% da ETo proporcionou a máxima produção da cana-de-açúcar ($136,05 \text{ t ha}^{-1}$) superando em 46,01; 49,87 ; 73,95 e 81,06% àquelas obtidas no TS e nos tratamentos de 25, 50, 75 e 100% da ETo, que foram de 62,6; 67,85; 100,61 e $110,28 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente. Evidencia-se o decréscimo na EUA com o aumento da lâmina aplicada, sendo o máximo valor, correspondente a $0,147 \text{ t ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, gerado pela lâmina de 25% da ETo. Os valores da EUA nos tratamentos de irrigação de 50, 75 e 100% da ETo foram, respectivamente, de 0,139; 0,108 e $0,097 \text{ t ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

A lâmina de água total aplicada para o tratamento de 100% da ETo durante o terceiro ciclo foi de 840,34 mm, enquanto a reposição de água baseada na lâmina de 100% da ETo proporcionou a máxima produção da cana-de-açúcar de $131,0 \text{ t ha}^{-1}$, superando em 53,44% àquela obtida no TS, que foi de $70,0 \text{ t ha}^{-1}$. Evidencia-se neste caso, que a EUA com a lâmina aplicada de 100% da ETo foi de $0,156 \text{ t ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. A EUA relaciona a produtividade biológica ou produtividade de frutos com o consumo hídrico/evapotranspiração. Coelho et al. (2005) relatam que na Espanha foi possível a redução média de 30% da necessidade de água em pomares cítricos com redução de 10% na produtividade.

Nesse sentido, as pesquisas devem ser direcionadas para alcançar altos valores de EUA sem diminuir tanto a produtividade. Coelho et al. (2005) afirmam ainda que a eficiência do uso da água pode ser aumentada reduzindo-se a lâmina aplicável (evapotranspiração) de forma a não diminuir drasticamente a produtividade. Pesquisas relacionadas com outras culturas também encontraram maiores valores de EUA a partir de menores lâminas de irrigação (Azevedo et al., 2007; Farias et al., 2007; Lima et al., 2007). Estes resultados mostram a importância da definição apropriada da lâmina de irrigação para maximizar a produção por unidade de água aplicada, sobretudo para minimizar os custos de produção. Na Tabela 10 são apresentados a produtividade, a evapotranspiração e os valores da EUA com base na evapotranspiração da cultura (ET) acumulada para cada tratamento de irrigação da cana-de-açúcar durante o segundo e terceiro ciclos.

Tabela 10. Produtividade e os valores da eficiência de uso de água (EUA) com base na evapotranspiração da cultura (ET) acumulada para cada tratamento de irrigação da cana-de-açúcar durante o segundo e terceiro ciclos

Tratamentos	ET (mm)	Produtividade (t ha ⁻¹)	EUA (t ha ⁻¹ m m ⁻¹)
Segundo ciclo			
Sequeiro	1066,2	62,60	0,059
25%	1207,5	67,85	0,056
50%	1390,6	100,61	0,072
75%	1620,7	110,28	0,068
100%	1664,6	136,05	0,082
Terceiro ciclo			
Sequeiro	1286,5	70,0	0,05
100%	1626,4	131,0	0,08

A evapotranspiração da cultura (ET) acumulada para o TS e os tratamentos de 25, 50, 75 e 100% da ETo no segundo ciclo foram, respectivamente, 1066,2; 1207,5; 1390,6; 1620,7 e 1664,6 mm. Por outro lado, os valores para EUA da cana-de-açúcar para o tratamento de sequeiro e os tratamentos de irrigação foram, respectivamente,

0,059; 0,056; 0,072; 0,068 e 0,082 t ha⁻¹ mm⁻¹. Portanto, a diferença quanto ao uso eficiente da água entre a lâmina irrigada com 100% da ETo (0,082 t ha⁻¹ mm⁻¹) e a cana sob regime de sequeiro (0,059 t ha⁻¹ mm⁻¹) foi de 0,023 t ha⁻¹ mm⁻¹. A EUA do tratamento de sequeiro correspondeu a 71,95 % da EUA da cana-de-açúcar quando submetida à lâmina de 100% da ETo.

Os valores de ET acumulados nos TS e no tratamento de 100% da ETo durante o terceiro ciclo foram, respectivamente, 1286,5 e 1626,40 mm. Já os valores para EUA da cana-de-açúcar foram para o TS e a lâmina plena, respectivamente, de 0,05 e 0,08 t ha⁻¹ mm⁻¹. Portanto, a diferença quanto ao uso eficiente da água entre a parcela irrigada com 100% da ETo (0,08 t ha⁻¹ mm⁻¹) e a cana sob regime de sequeiro (0,05 t ha⁻¹ mm⁻¹) foi de 0,03 t ha⁻¹ mm⁻¹. Assim, a EUA do tratamento de sequeiro correspondeu a 62,5 % da EUA da cana-de-açúcar quando submetida à lâmina de 100% da ETo. Com relação ao segundo ciclo da cana-de-açúcar, a ET acumulada para os tratamentos de sequeiro (1066,0 mm) e a lâmina plena (1542,0 mm) representam, respectivamente, 82,89 e 94,83% dos valores acumulados da ET durante o terceiro ciclo. Isso proporcionou uma diferença com relação à eficiência do uso da água entre os dois ciclos de 0,01 t ha⁻¹ mm⁻¹ entre ambos os tratamentos.

Os resultados para a EUA no segundo ciclo da cana-de-açúcar condizem com os resultados obtidos por Payero et al. (2008), que estudando o efeito da quantidade de irrigação aplicada por gotejamento subsuperficial na eficiência do uso da água (Produtividade/ ETc e Produtividade/ Irrigação) da cultura do milho em clima semiárido no estado de Nebraska-EUA, concluíram que os valores da eficiência do uso da água (produtividade/ ETc) aumentavam com o aumento da lâmina de água aplicada enquanto que para a eficiência do uso da água (produtividade/Irrigação) tiveram efeitos opostos.

Do ponto de vista sócio-ambiental se deseja uma agricultura sustentável que proporcione a utilização da água de forma mais eficiente. Assim, o produtor pode manejar de forma mais adequada a sua irrigação, no sentido de economizar a energia e a água, que por sua vez se torna cada vez mais limitante à produção. A busca por um sistema de produção que tenha maior eficiência no uso da água pode trazer à sociedade um benefício, uma água mais socializada entre agropecuaristas, comunidades e indústrias (Farias, 2006).

4.6. Coeficientes de cultivo e evapotranspiração

4.6.1. Tratamento de sequeiro

As variações temporais do coeficiente de evaporação de água do solo (K_e), coeficiente de cultivo dual ($K_c - \text{dual}$) e do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) da cana-de-açúcar em regime de sequeiro durante o segundo e terceiro ciclos são exibidas na Figura 7. Durante o segundo ciclo, os valores médios \pm desvio padrão do K_e , K_{cb} e do $K_c - \text{dual}$ foram, respectivamente, $0,071 \pm 0,08$; $0,99 \pm 0,36$ e $1,06 \pm 0,38$; portanto, o K_e apresentou a menor contribuição para a determinação do $K_c - \text{dual}$ (Figura 7A). Por outro lado, o valor do K_{cb} representa 93,39% do $K_c - \text{dual}$. Os valores mínimos dos coeficientes K_e , K_{cb} e $K_c - \text{dual}$ no estágio inicial foram, respectivamente, 0,0; 0,15 e 0,15. Já o valor máximo do K_e foi 0,51 (no estágio final); do K_{cb} de 1,2 (no estágio médio) e do $K_c - \text{dual}$ de 1,4 (também estágio médio da cultura).

Os valores médios \pm desvio padrão do K_e , K_{cb} e do $K_c - \text{dual}$ durante terceiro ciclo foram, respectivamente, $0,122 \pm 0,089$; $1,01 \pm 0,36$ e $1,13 \pm 0,42$, sendo também neste ciclo o K_e a menor contribuição para a determinação do $K_c - \text{dual}$, tal como

ocorreu no segundo ciclo (Figura 7B). O valor do K_{cb} representa 89,38% do K_c - dual, bastante inferior daquele encontrado no segundo ciclo em razão dos altos índices pluviométricos registrados durante o terceiro ciclo de cultivo da cana-de-açúcar.

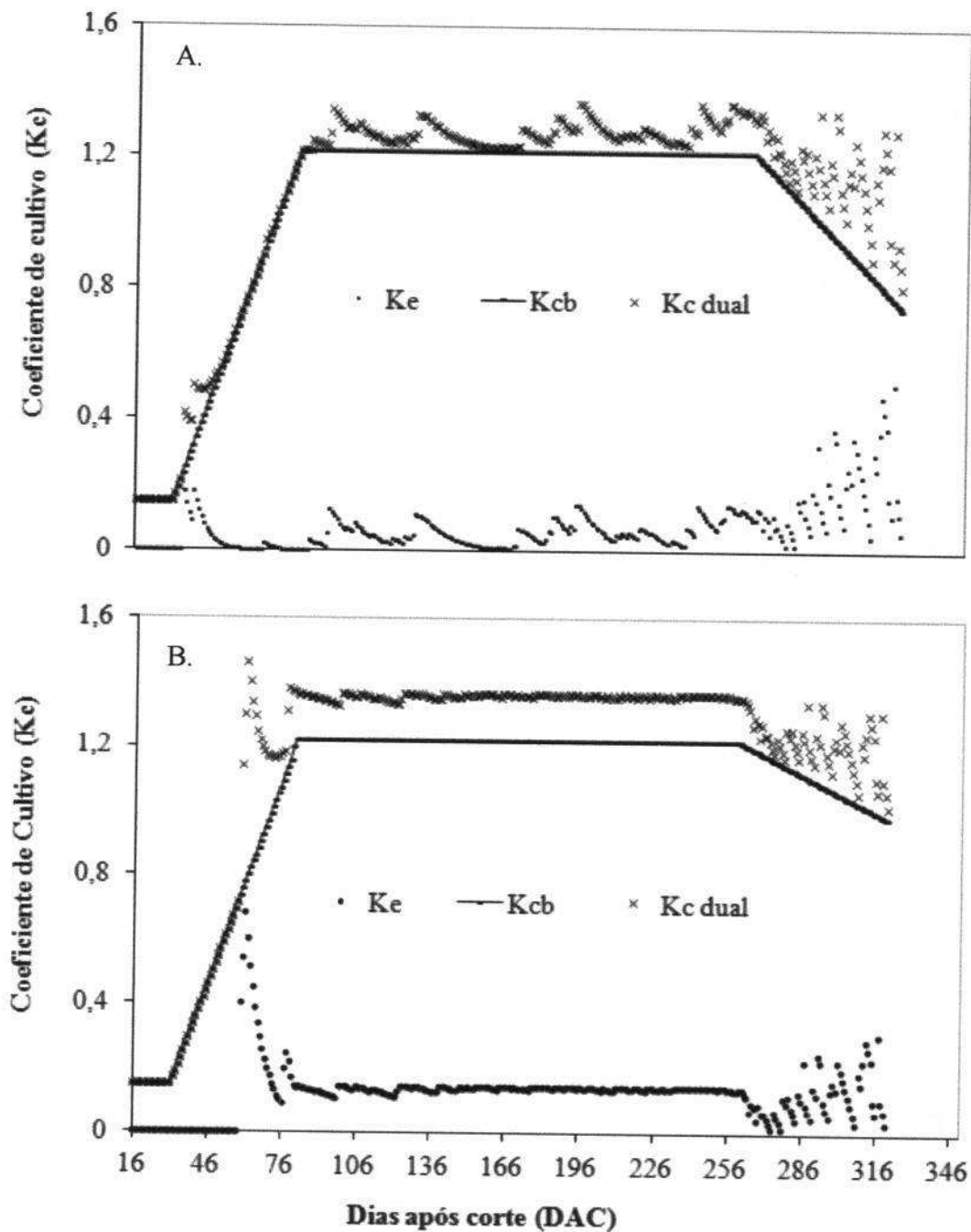


Figura 7. Variações temporais do coeficiente de evaporação de água do solo (K_e), coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) e do coeficiente de cultivo dual (K_c - dual) da cana-de-açúcar cultivada em regime de sequeiro durante o segundo (A) e terceiro (B) ciclos

Os valores mínimos dos coeficientes K_e , K_{cb} e do K_c – dual foram, respectivamente, 0,0; 0,15 e 0,15 e ocorreram todos no estágio inicial de cultivo. Já os valores máximos do K_e , do K_{cb} e do K_c – dual foram, respectivamente, 0,68 (no estágio final); 1,2 (no estágio) e 1,5 (também no estágio médio da cultura). Em relação ao segundo ciclo, os valores médios dos coeficientes K_e , K_{cb} e do K_c – dual representaram, respectivamente, 58,20 ; 98,02 e 93,80% dos valores relativos ao terceiro ciclo da cultura.

A evaporação de água do solo da cana-de-açúcar em regime de sequeiro durante todo o segundo ciclo foi de 98,32 mm, sendo próximo de zero no estágio inicial; 8,71 mm no estágio de desenvolvimento da cultura; 48,94 mm no estágio médio e 40,67 mm no estágio final. Por outro lado, a evaporação de água do solo durante o terceiro ciclo foi de 211,36 mm, sendo zero no estágio inicial; 37,53 mm no estágio de desenvolvimento; 141,29 mm no estágio médio e 32,54 mm no estágio final. O estágio de desenvolvimento apresentou uma evaporação média diária de $0,17 \text{ mm d}^{-1}$ e no estágio médio foi de $0,27 \text{ mm d}^{-1}$ durante o segundo ciclo. O estágio final durante o segundo ciclo exibiu valor médio diário de $0,68 \text{ mm d}^{-1}$.

No terceiro ciclo, as médias diárias da evaporação nos estágios de desenvolvimento e final foram, respectivamente, $0,75$ e $0,54 \text{ mm d}^{-1}$. O estágio inicial, que tem a duração de 30 dias, apresentou um valor praticamente nulo para a evaporação, conforme se pode verificar na Figura 7 em ambos os ciclos. Isso ocorreu devido à escassez de chuvas durante este estágio. Durante o estágio médio da cana-de-açúcar no terceiro ciclo, o valor da média diária da evaporação foi de $0,78 \text{ mm d}^{-1}$. Diante destes resultados, a evaporação do solo e a transpiração da cultura da cana-de-açúcar representaram, respectivamente, 6,69 e 93,31% da evapotranspiração total obtida com base no K_c – dual no segundo ciclo enquanto que no terceiro ciclo, elas representaram

10,74 e 89,26% da ET total. A razão disso é que a evaporação do solo sob um dossel ou entre plantas é controlada pela quantidade de energia disponível na superfície do solo; portanto, essa energia é o que resta depois do consumo de energia pela transpiração (Allen, 2000).

Na Tabela 11 são apresentados os valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na metodologia do Kc dual e os valores médios e acumulados da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar cultivada em regime de sequeiro durante o segundo e terceiro ciclos da cultura.

Tabela 11. Valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na metodologia do Kc dual e valores médios (mm d^{-1}) e acumulados (mm) da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar cultivada em regime de sequeiro durante o segundo e terceiro ciclos

Estádios	Segundo ciclo		
	Kc	ET- média	ET - total
Inicial	0,15	0,67	20,07
Desenvolvimento	0,71	3,65	182,59
Médio	0,81	3,76	676,28
Final	0,80	3,17	187,29
Total	-	-	1066,2
Média	0,61	2,8	-
Estádios	Terceiro ciclo		
	Kc	ET- média	ET - total
Inicial	0,15	0,95	28,5
Desenvolvimento	0,65	3,68	184,0
Médio	0,95	4,70	846,0
Final	0,94	3,80	228,0
Total	-	-	1286,5
Média	0,67	3,28	-

O coeficiente de cultivo e a evapotranspiração são maiores no estágio médio da cultura. Assim, no sistema de sequeiro o consumo hídrico da cana-de-açúcar no segundo ciclo foi de 1066,2 mm e a evapotranspiração média foi 2,8 mm, enquanto no terceiro ciclo o consumo hídrico da cultura foi 1286,5 mm e a evapotranspiração média

de 3,28 mm. O consumo hídrico da cultura foi maior no terceiro ciclo em face do aumento da precipitação nesse período que foi de 1829,1 mm, enquanto no segundo ciclo foi de apenas 621 mm. O K_c da cana-de-açúcar variou de 0,15 (estádio inicial) a 0,81 (estádio médio) no segundo ciclo; enquanto que no terceiro ciclo ele variou de 0,15 (estádio inicial) a 0,95 (estádio médio). O estágio médio, em ambos os ciclos, foi o de maior consumo hídrico, sendo de 676,28 e de 846,0 mm no segundo e terceiro ciclos, respectivamente. Esses resultados evidenciam que a metodologia do coeficiente de cultivo dual apresenta estimativas confiáveis das necessidades hídricas da cultura.

Os cursos sazonais da precipitação e da drenagem de água no solo durante o segundo e terceiro ciclos da cana-de-açúcar são exibidos na Figura 8. Os valores médios \pm desvio padrão da drenagem do solo no segundo ciclo foi de $0,5 \pm 0,63 \text{ mm d}^{-1}$, enquanto no terceiro ciclo foi de $1,8 \pm 3,08 \text{ mm d}^{-1}$. A drenagem apenas começou ocorrer a partir do DAC 191, com valor de 3,5 mm, atingindo o máximo de 43,3 mm no DAC 253, após precipitação de 40 mm. No terceiro ciclo, a drenagem apenas começou ocorrer a partir do DAC 61, com valor médio de 1,1 mm e máximo de 107,5 mm no DAC 253, após precipitação de 109 mm. Os valores máximos da drenagem e da precipitação durante o segundo ciclo representaram, respectivamente, 40,28 e 36,70 % daqueles do terceiro ciclo. O total da drenagem durante o terceiro ciclo da cana-de-açúcar foi maior do que no segundo ciclo em face das fortes precipitações ocorridas nesse período na área experimental.

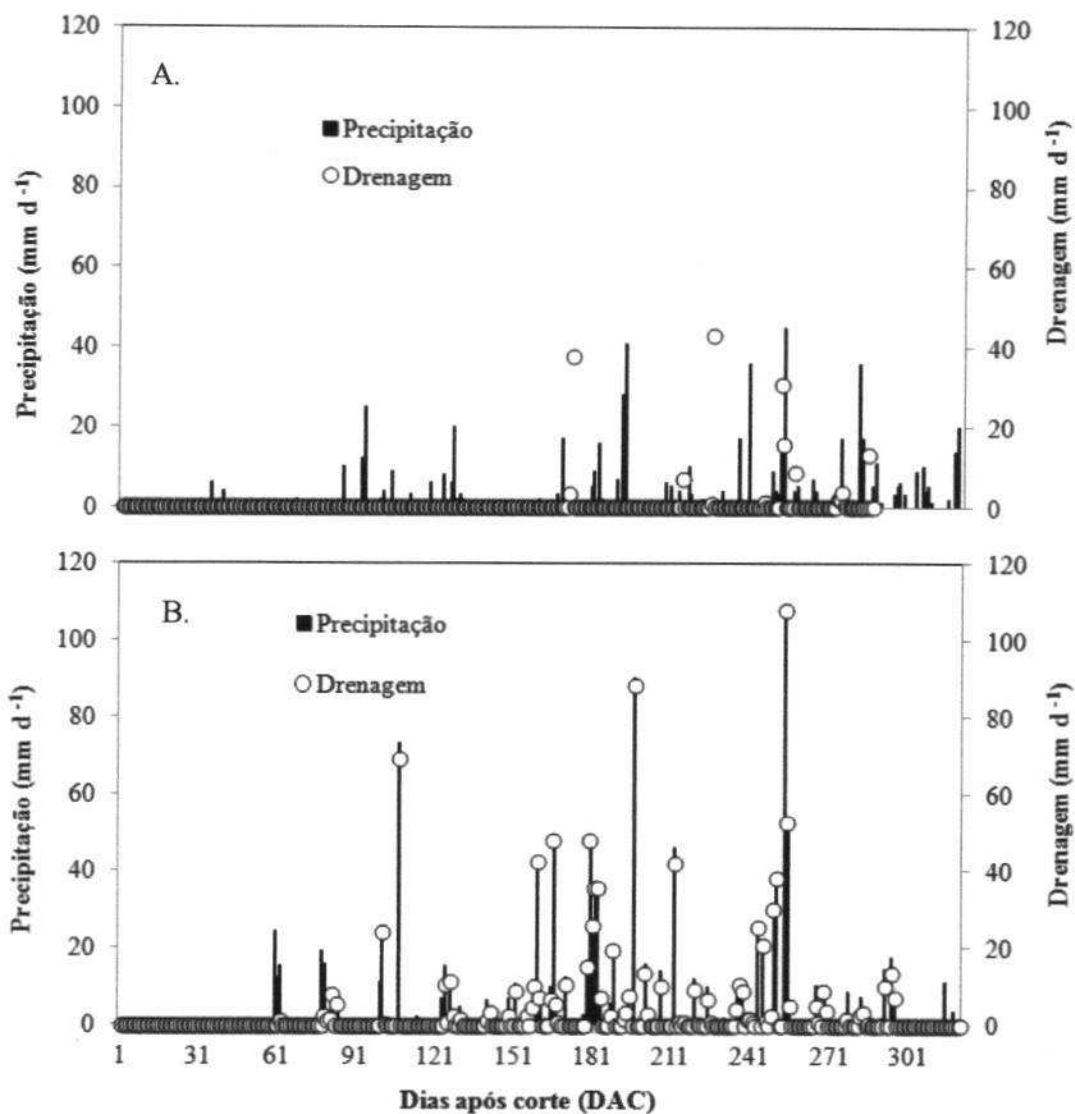


Figura 8. Cursos sazonais da precipitação e da drenagem de água no solo durante o período experimental do segundo (A) e terceiro (B) ciclos da cana-de-açúcar cultivada em regime de sequeiro

4.6.2. Tratamento de irrigação de 25% da ETo

Os resultados apresentados a seguir se referem apenas ao segundo ciclo da cultura em face da decisão da Usina de não utilizar os tratamento de irrigação de 25, 50 e 75% da ETo durante o terceiro ciclo da cana-de-açúcar.

A distribuição temporal do coeficiente de evaporação de água do solo (K_e), do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) e do coeficiente de cultivo dual (K_c – dual) da cana-de-açúcar irrigada com 25% da ETo no segundo ciclo é exibida na Figura 9. Os valores

mínimos dos coeficientes K_e , K_{cb} e do K_c -dual no estágio inicial foram, respectivamente, zero; 0,15 e 0,15; já os valores máximos desses coeficientes foram 0,51 (no estágio final); 1,2 (no estágio médio) e 1,3 (no estágio médio). Por outro lado, os valores médios \pm desvio padrão do K_e , do K_{cb} e do K_c -dual foram, respectivamente, $0,107 \pm 0,073$; $0,99 \pm 0,36$ e $1,10 \pm 0,39$, sendo do coeficiente de evaporação K_e a menor contribuição para determinação do K_c -dual. O valor do K_{cb} representou 90% do K_c -dual, bastante superior quando comparado com aquele do sistema de sequeiro em face da contribuição da umidade do solo perdida pelo processo de evaporação. Esse tratamento de irrigação produziu o total de água evaporada durante todo o segundo ciclo de 151,41 mm, sendo distribuído da seguinte forma: zero mm no estágio inicial, 18,77 mm no estágio de desenvolvimento da cultura, 84,84 mm no estágio médio e 40,80 mm no estágio final. Portanto, o maior valor da evaporação acumulada ocorreu no estágio médio da cultura (180 dias), apresentando um valor médio de $0,53 \text{ mm d}^{-1}$.

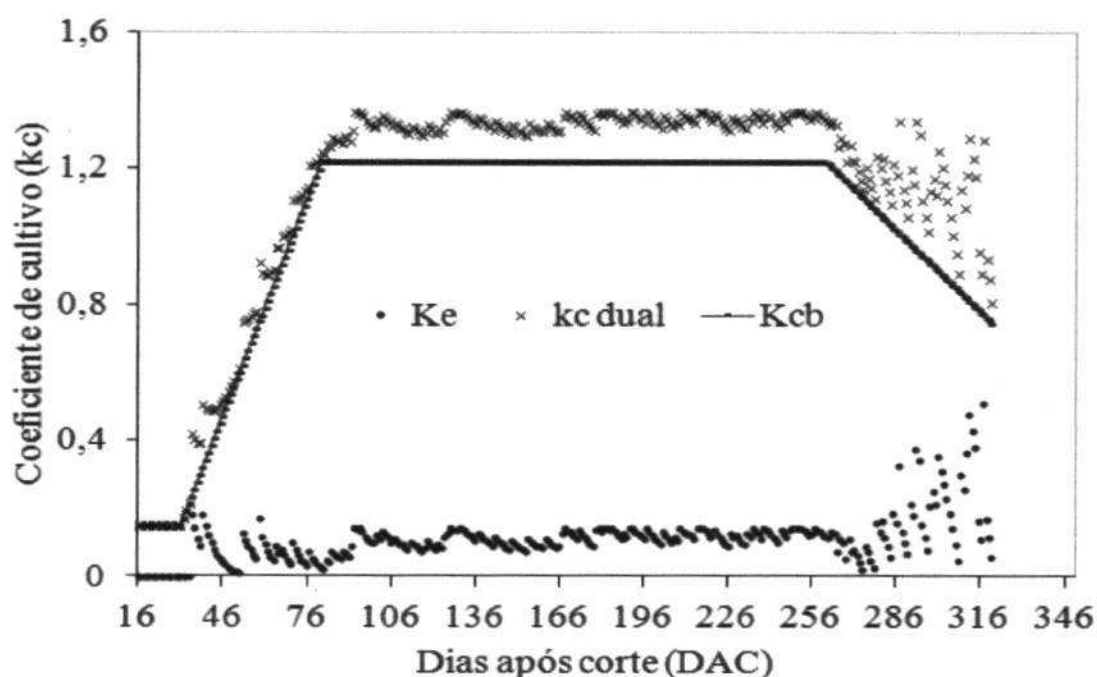


Figura 9. Variações temporais do coeficiente de evaporação de água do solo (K_e), coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) e do coeficiente de cultivo dual (K_c - dual) da cana-de-açúcar irrigada com 25% da E_{To} durante o segundo ciclo

O estágio de desenvolvimento apresentou evaporação média diária de 0,38 mm d⁻¹, enquanto no estágio final, apresentou o maior valor da evaporação em comparação com aos outros estádios (0,68 mm d⁻¹). Esses resultados indicam que a evaporação do solo e a transpiração da cultura da cana-de-açúcar representam, respectivamente 9,78 e 90,22% da evapotranspiração total obtida com base no Kc – dual.

Na Tabela 12 são apresentados os valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na metodologia do Kc-dual, bem como os valores médios e acumulados da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar irrigada com 25% da ETo durante o segundo ciclo. De acordo com essa metodologia, o coeficiente de cultivo e a evapotranspiração são maiores no estágio médio da cultura, enquanto nos estádios inicial e final esses parâmetros atingem valores mínimos. O consumo hídrico da cana-de-açúcar nesse tratamento de irrigação foi de 1207,5 mm, já evapotranspiração média durante todo o ciclo da cultura foi 3,1 mm. Por outro lado, o Kc da cana-de-açúcar variou de 0,15 (estádio inicial) a 0,95 (estádio médio); portanto, o estágio médio foi o de maior consumo hídrico, de 789,10 mm, essencialmente em face do seu tamanho.

Tabela 12. Valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na metodologia do Kc dual e valores médios diários (mm d⁻¹) e acumulados (mm) da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar irrigada com 25% da ETo durante o segundo ciclo

Estádios	Kc	ET- média	ET – total
Inicial	0,15	0,68	20,37
Desenvolvimento	0,73	3,69	184,35
Médio	0,95	4,38	789,10
Final	0,91	3,62	213,67
Total	-	-	1207,5
Média	0,68	3,1	-

O curso sazonal da precipitação + irrigação e da drenagem de água no solo durante o período experimental do segundo ciclo da cana-de-açúcar é exibido na Figura

10. O valor médio \pm desvio padrão da drenagem do solo foi de $1,0 \pm 1,26 \text{ mm d}^{-1}$. A drenagem apenas começou a ocorrer a partir do DAC 93 com o valor de 4,9 mm, atingindo o máximo de 43,6 mm, no estágio médio, que correspondeu ao DAC 252 após a precipitação de 45 mm.

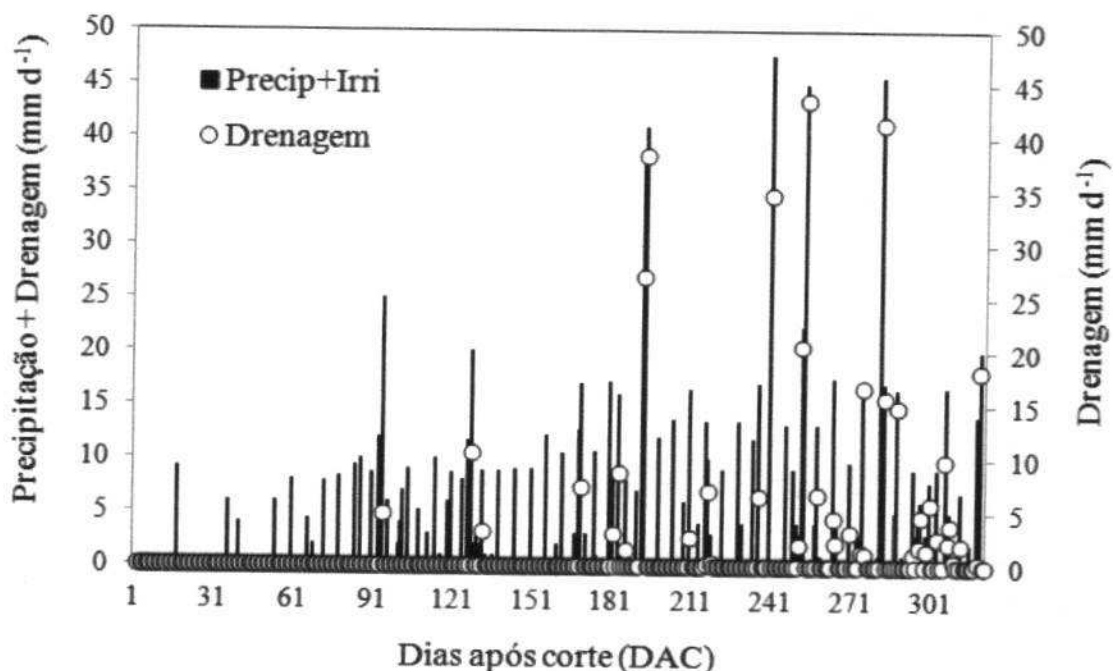


Figura 10. Curso sazonal da precipitação + irrigação e da drenagem de água no solo durante o período experimental do segundo ciclo da cana-de-açúcar irrigada com 25% da ETo

O maior valor encontrado para a entrada de água no sistema (precipitação + irrigação) foi de 47,6 mm, ocorrido no DAC 239, após precipitação de 36 mm e irrigação de 11,6 mm.

4.6.3. Tratamento de irrigação de 50% da ETo

A Figura 11 exibe a variação temporal dos coeficientes de evaporação, do coeficiente de cultivo basal, e do coeficiente de cultivo dual da cana-de-açúcar irrigada

com 50% da ETo durante o segundo ciclo. Os valores médios \pm desvio padrão do Ke, Kcb e do Kc-dual foram, respectivamente, $0,13 \pm 0,07$; $0,99 \pm 0,36$ e $1,12 \pm 0,37$, sendo o coeficiente de cultivo basal a maior contribuição para a determinação do Kc-dual. Os valores mínimos dos coeficientes Ke, Kcb e do Kc - dual foram, respectivamente, zero; 0,15 e 0,15. Por outro lado, os valores máximos do Ke, do Kcb e do Kc-dual foram, respectivamente, 0,53 (no estágio final); 1,4 (no estágio médio) e 1,2 (no estágio médio). Os valores dos componentes de transpiração (Kcb) e da evaporação de água no solo (Ke) representam, respectivamente, 88,39 e 11,61% do Kc - dual.

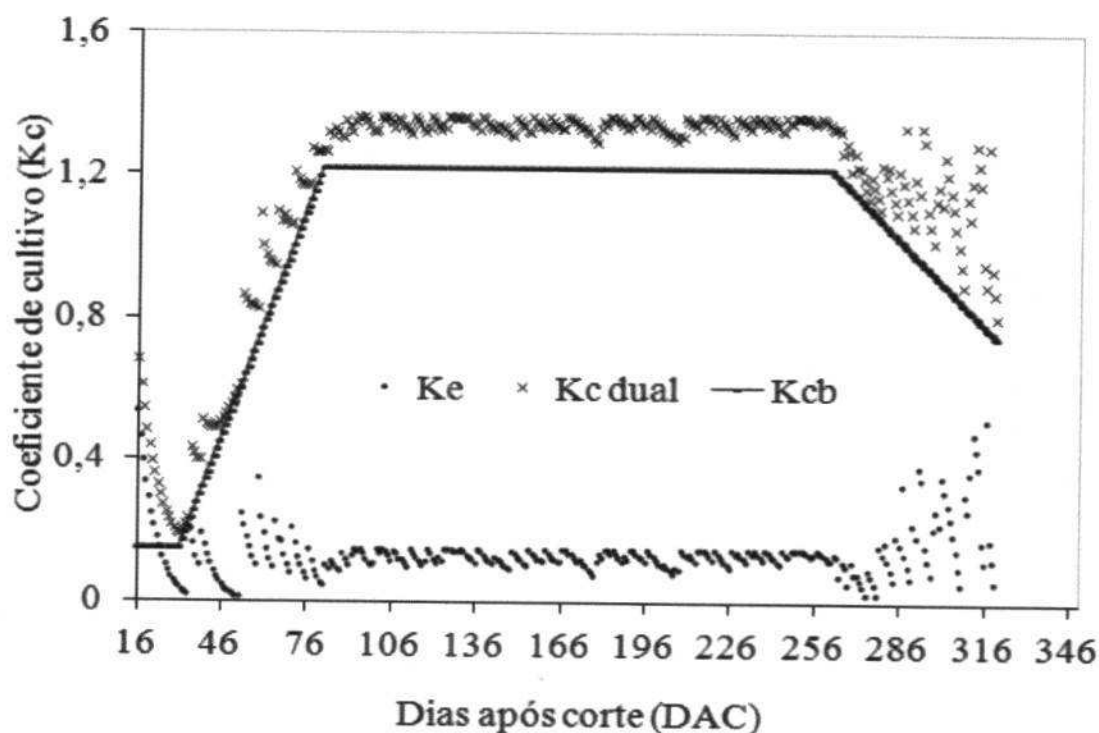


Figura 11. Variações temporais do coeficiente de evaporação de água do solo (Ke), coeficiente de cultivo basal (Kcb) e do coeficiente de cultivo dual (Kc - dual) da cana-de-açúcar irrigada com 50% da ETo durante o segundo ciclo

O valor acumulado da evaporação de água do solo com base no tratamento de 50% da ETo durante o segundo ciclo da cana-de-açúcar foi de 190,08 mm, sendo 15,08 mm no estágio inicial, 30,77 mm no desenvolvimento da cultura, 103,18 mm no estágio

médio e 40,82 mm no estágio final. O estágio médio da cultura, portanto, apresentou o maior valor acumulado da evaporação de água do solo visto que esse é o estágio mais longo do ciclo da cana-de-açúcar, com valor médio diário de 0,57 mm d⁻¹. O estágio inicial, apesar de ter apresentado um valor menor da evaporação acumulada (15,08 mm), em comparação ao estágio médio da cultura, apresentou um valor médio diário de 0,50 mm d⁻¹. O maior valor diário da evaporação de água no solo registrado se deu no estágio final, 0,68 mm d⁻¹, e no estágio de desenvolvimento da cultura, 0,62 mm d⁻¹. Neste caso, a evaporação do solo e a transpiração da cultura da cana-de-açúcar representaram, respectivamente, 11,65 e 88,35% da evapotranspiração total obtida com base no Kc-dual. Os valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na metodologia do Kc dual e os valores médios e acumulados da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar irrigada com 50% da ETo durante o segundo ciclo são exibidos na Tabela 13.

Tabela 13. Valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na metodologia do Kc dual e valores médios diários (mm d⁻¹) e acumulados (mm) da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar irrigada com 50% da ETo durante o segundo ciclo

Estádios	Kc	ET- média	ET - total
Inicial	0,24	1,11	33,36
Desenvolvimento	0,77	3,90	195,04
Médio	1,07	4,95	891,69
Final	1,06	4,58	270,50
Total	-	-	1390,6
Média	0,81	3,6	-

Tal como nos casos anteriores, o coeficiente de cultivo e a evapotranspiração são maiores no estágio médio da cultura, enquanto que no estágio inicial eles atingiram valores mínimos. O consumo hídrico da cana-de-açúcar nesse tratamento de irrigação

foi de 1390,6 mm; enquanto a evapotranspiração média diária foi de 3,6 mm. O Kc da cana-de-açúcar variou de 0,24 (estádio inicial) a 1,07 (estádio médio) que, inclusive, apresentou o maior consumo hídrico, de 891,69 mm.

A cana-de-açúcar no segundo ciclo tem o curso sazonal de entrada de água no sistema (precipitação + irrigação) e da drenagem de água no solo são apresentados na Figura 12. O valor médio \pm desvio padrão da drenagem do solo foi de $1,5 \pm 1,75 \text{ mm d}^{-1}$. Por outro lado, a drenagem apenas começou a ocorrer a partir do DAC 93, com o valor de 15,0 mm, sendo que o valor máximo de 51,1 mm ocorreu no estágio médio, no DAC 281, após precipitação de 36 mm e irrigação de 19,1 mm. O maior valor encontrado para a entrada de água foi de 59,2 mm e ocorreu no DAC 239, correspondente ao estágio médio da cultura.

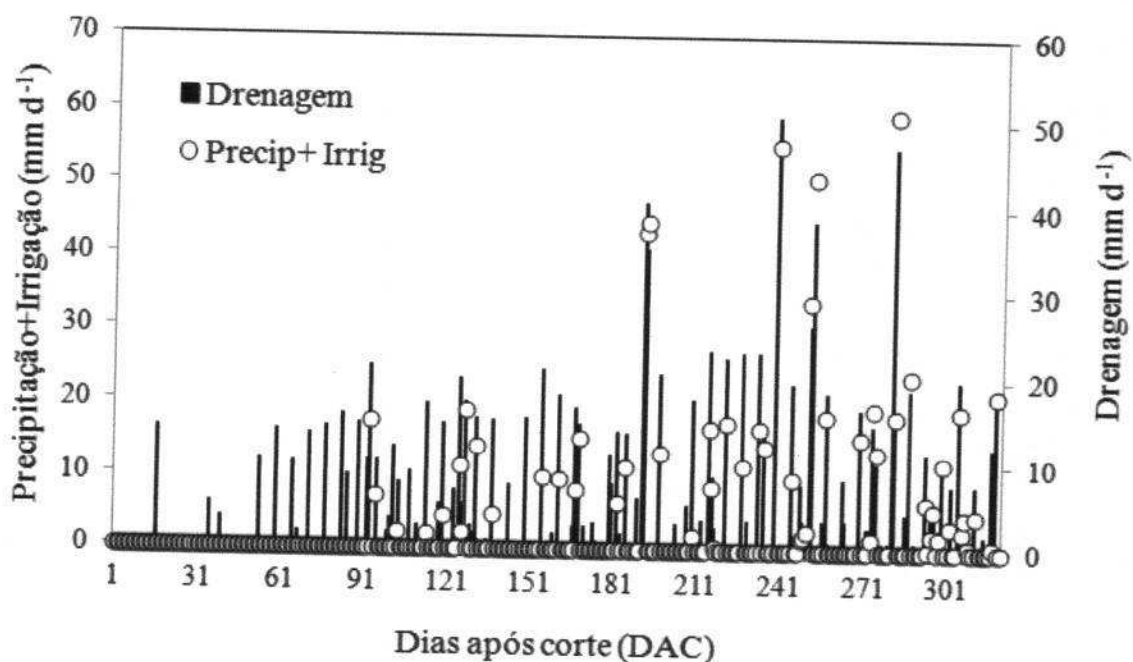


Figura 12. Curso sazonal da precipitação + irrigação e da drenagem de água no solo durante o período experimental do segundo ciclo da cana-de-açúcar irrigada com 50% da ETo

4.6.4. Tratamento de irrigação de 75% da ETo

A variação temporal dos componentes do coeficiente de cultivo dual da cana-de-açúcar submetida ao tratamento de irrigação de 75% da ETo durante a segundo ciclo é exibido na Figura 13. Os valores médios \pm desvio padrão do Ke, Kcb e do Kc-dual foram, respectivamente, $0,145 \pm 0,096$; $0,99 \pm 0,36$ e $1,14 \pm 0,36$. A menor contribuição na composição do Kc-dual foi com o coeficiente de evaporação Ke, representando 12,72% do Kc-dual. Os valores máximos para os coeficientes Ke, Kcb e do Kc - dual foram 0,76 (estádio inicial); 1,2 (estádio médio) e 1,36 (estádio médio).

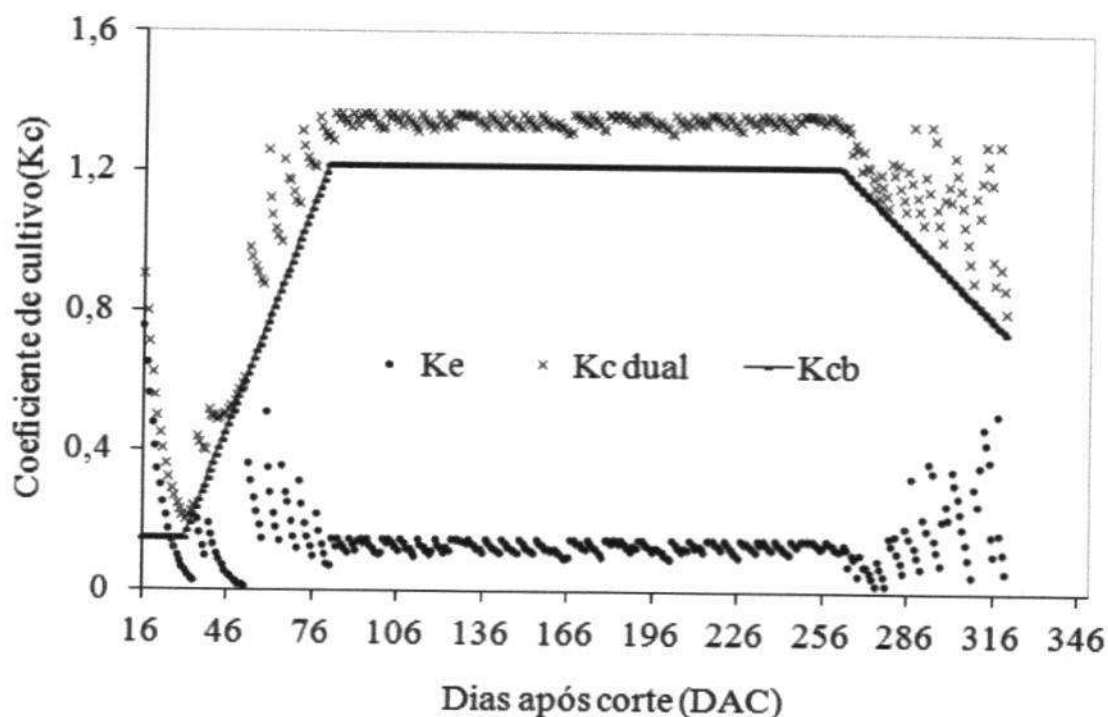


Figura 13. Variações temporais do coeficiente de evaporação de água do solo (Ke), coeficiente de cultivo basal (Kcb) e do coeficiente de cultivo dual (Kc-dual) da cana-de-açúcar irrigada com 75% da ETo durante o segundo ciclo

A evaporação de água do solo durante todo o segundo ciclo da cultura foi de 213,37 mm, sendo 21,45 mm no estágio inicial, 42,65 mm no estágio de

desenvolvimento da cultura, 108,12 mm no estágio médio e de 40,84 mm no estágio final. Muito embora o maior valor acumulado da evaporação tenha sido no estágio médio, a evaporação média diária nesse período foi a menor dentre todos os estágios, apenas 0,6 mm d⁻¹. O estágio inicial apresentou uma evaporação média diária de 0,71 mm d⁻¹ e o estágio de desenvolvimento de 0,85 mm d⁻¹, enquanto que o total acumulado no estágio final foi de 40,84 mm, com média diária de 0,70 mm d⁻¹. Sendo assim, a evaporação do solo e a transpiração da cultura da cana-de-açúcar representam, respectivamente, 12,77 e 87,23% da evapotranspiração total obtida com base no Kc dual. Os valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na metodologia do Kc dual e os valores médios e acumulados da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar irrigada com 75% da ETo durante o segundo ciclo são exibidos na Tabela 14.

Tabela 14. Valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na metodologia do Kc dual e valores médios diários (mm d⁻¹) e acumulados (mm) da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar irrigada com 75% da ETo durante o segundo ciclo

Estádios	Kc	ET- média	ET - total
Inicial	0,28	1,28	38,34
Desenvolvimento	0,82	4,41	210,73
Médio	1,32	6,12	1100,70
Final	1,15	4,59	270,89
Total	-	-	1620,70
Média	0,89	4,0	-

Os maiores valores do coeficiente de cultivo e da evapotranspiração da cultura também ocorreram no estágio médio da cultura, enquanto que nos estágios inicial e final eles foram mínimos. A evapotranspiração média durante o ciclo da cultura foi 4,00 mm; já o Kc da cana-de-açúcar variou de 0,28 (estágio inicial) a 1,32 (estágio médio). O maior consumo hídrico ocorreu no estágio médio, 1100,7 mm, não apenas em face da sua duração, mas também devido ao aumento da área foliar. O curso sazonal da precipitação + irrigação e da drenagem de água no solo da cultura da cana-de-açúcar

irrigada com 75% da ETo no segundo ciclo é exibido na Figura 14. O valor médio \pm desvio padrão da drenagem do solo foi $2,0 \pm 2,37 \text{ mm d}^{-1}$. No DAC 83 ocorreu a primeira drenagem, 2,1 mm, atingindo valor máximo no estágio médio, de 51,8 mm no DAC 251, após a irrigação de 39,3 mm. O maior valor encontrado para a entrada de água no sistema (precipitação + irrigação) foi de 57,1 mm, no DAC 191, correspondente ao estágio médio da cultura.

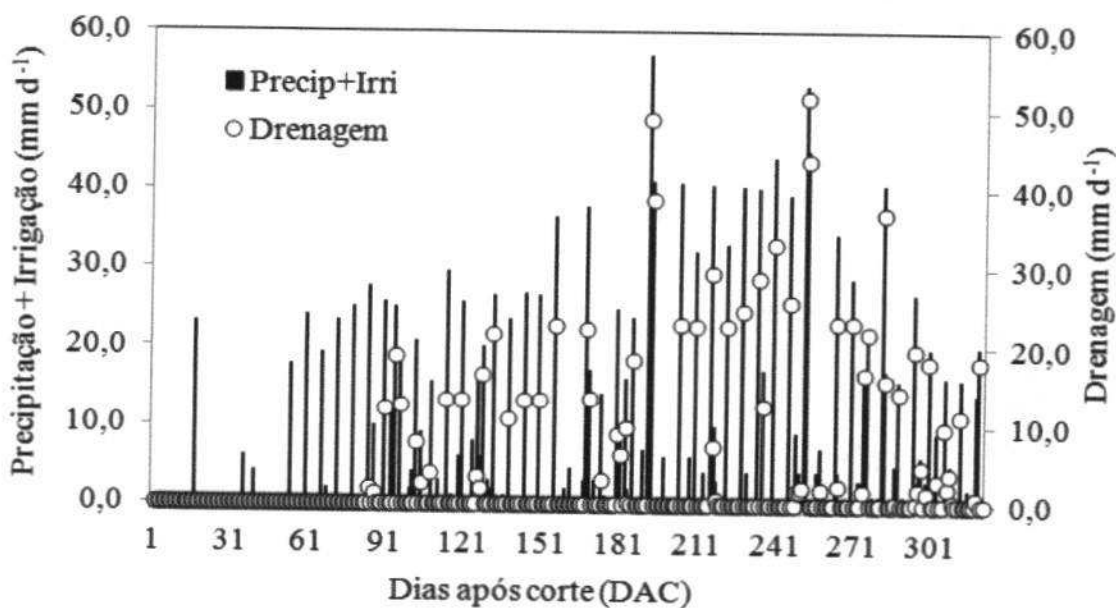


Figura 14. Curso sazonal da precipitação + irrigação e da drenagem de água no solo durante o período experimental do segundo ciclo da cana-de-açúcar irrigada com 75% da ETo

4.6.5. Tratamento de irrigação de 100% da ETo

Os cursos temporais dos componentes do coeficiente de cultivo dual da cana-de-açúcar submetido ao tratamento de irrigação de 100% da ETo durante o segundo e terceiro ciclos é exibido na Figura 15. Durante o segundo ciclo os valores médios \pm desvio padrão do Ke, Kcb e Kc-dual foram, respectivamente, $0,156 \pm 0,12$; $0,99 \pm 0,36$ e $1,15 \pm 0,36$, sendo o Kcb a maior contribuição para a determinação do Kc-dual,

representando 86,09 % do Kc-dual. Os valores máximos do Ke, Kcb e do Kc-dual foram 0,98 (estádio inicial); 1,22 (estádio médio) e 1,43 (estádio de desenvolvimento).

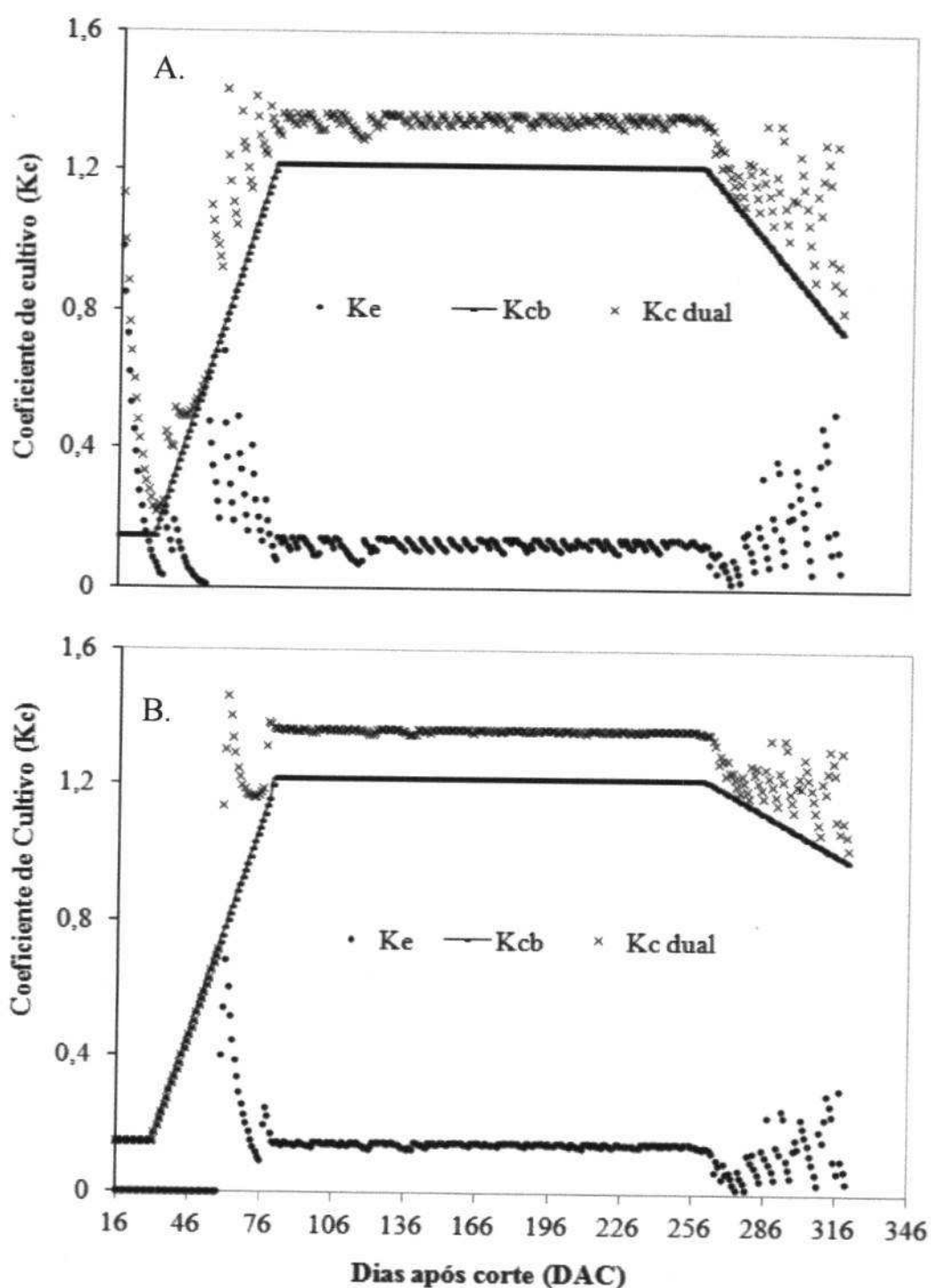


Figura 15. Variações temporais do coeficiente de evaporação de água do solo (Ke), coeficiente de cultivo basal (Kcb) e do coeficiente de cultivo dual (Kc – dual) da cana-de-açúcar irrigada com 100% da ETo durante o segundo (A) e terceiro (B) ciclos

Os valores médios \pm desvio padrão do K_e , K_{cb} e do K_c -dual no terceiro ciclo foram, respectivamente, $0,123 \pm 0,089$; $1,01 \pm 0,36$ e $1,13 \pm 0,41$, sendo, neste caso, a menor contribuição para a determinação do K_c -dual também o coeficiente de evaporação K_e , representando 9,46 % do K_c -dual. Os valores máximos para esses coeficientes foram 0,68 (estádio inicial); 1,22 (estádio médio) e 1,46 (estádio de desenvolvimento). Em relação ao segundo ciclo, os valores médios do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) representam 98,01 % daquele do terceiro ciclo.

Na lâmina de 100% aplicada à cana-de-açúcar durante o segundo ciclo, o valor acumulado da evaporação de água do solo foi de 230,63 mm, distribuído da seguinte maneira: 27,88 mm no estágio inicial, 53,61 mm no desenvolvimento da cultura, 107,87 mm no estágio médio e 40,86 mm no estágio final. O maior valor da evaporação ocorreu no estágio de desenvolvimento da cultura, $1,07 \text{ mm d}^{-1}$; enquanto o menor valor registrado foi no estágio final, $0,68 \text{ mm d}^{-1}$. O estágio médio da cultura, que tem a duração mais longa (180 dias), conseqüentemente, apresentou o valor acumulado maior para a evaporação de água do solo, com média diária de $0,60 \text{ mm d}^{-1}$. O estágio inicial, apesar de apresentar o menor valor da evaporação acumulada (27,87 mm), em comparação ao estágio médio da cultura, exibiu o valor médio diário de $0,93 \text{ mm d}^{-1}$. Assim, a evaporação do solo e a transpiração da cultura da cana-de-açúcar representaram, respectivamente, 13,60 e 86,40% da evapotranspiração total obtida com base no K_c -dual.

O valor acumulado da evaporação de água do solo durante o terceiro ciclo foi de 214,09 mm, dividido da seguinte maneira: 0,0 mm no estágio inicial, 37,54 mm no desenvolvimento da cultura, 144,01 mm no estágio médio e 32,54 mm no estágio final. O valor nulo no estágio inicial foi em virtude da escassez de chuvas no período de duração desse estágio. O estágio médio da cultura apresentou um valor acumulado

maior para a evaporação do solo, que teve média diária de $0,80 \text{ mm d}^{-1}$, enquanto nos estádios de desenvolvimento da cultura e final tiveram médias diárias de $0,75$ e $0,54 \text{ mm d}^{-1}$ respectivamente. Assim, a evaporação do solo e a transpiração da cultura da cana-de-açúcar representaram, respectivamente, $10,86$ e $89,14\%$ da evapotranspiração total obtida com base no Kc-dual. Flumignan et al. (2011), quando utilizaram a metodologia de coeficiente de cultura dual para determinar as componentes da evaporação e transpiração da cultura do café cultivada por aspersão no Estado do Paraná, Brasil, observaram que os valores da evaporação e da transpiração representaram, respectivamente, 35 e 65% da evapotranspiração da cultura.

Os valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na metodologia do Kc dual e os valores médios e acumulados da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar irrigada com de 100% da ETo durante o segundo e terceiro ciclos são exibidos na Tabela 15. Os maiores valores do coeficiente de cultivo e da evapotranspiração da cultura ocorreram no estágio médio da cultura. A evapotranspiração média durante o segundo ciclo da cultura foi $4,2 \text{ mm}$ e no terceiro ciclo foi de $4,16 \text{ mm}$. O Kc da cana-de-açúcar no segundo ciclo variou de $0,31$ (estádio inicial) a $1,35$ (estádio médio) e na terceira folha de $0,15$ (estádio inicial) a $0,96$ (no estágio médio). No segundo e terceiro ciclos da cana-de-açúcar o maior consumo hídrico ocorreu no estágio médio, $1130,2 \text{ mm}$ e de $1054,17$ respectivamente.

Os cursos sazonais da entrada de água no sistema (precipitação + irrigação) e da drenagem de água no solo durante o segundo e terceiro ciclos da cana-de-açúcar são exibidos na Figura 16. O valor médio \pm desvio padrão da drenagem do solo no segundo ciclo foi de $2,7 \pm 3,02 \text{ mm d}^{-1}$, enquanto no terceiro ciclo foi de $3,0 \pm 3,86 \text{ mm d}^{-1}$. No DAC 71 do segundo ciclo, ocorreu o primeiro valor da drenagem, $1,1 \text{ mm}$, atingindo valor máximo no estágio médio, de $57,6 \text{ mm}$ no DAC 191. No terceiro ciclo, a

drenagem apenas começou ocorrer a partir do DAC 61, apresentando um valor médio de 2,2 mm no estágio de desenvolvimento da cultura.

Tabela 15. Valores médios dos coeficientes de cultivo obtidos com base na metodologia do Kc dual e valores médios (mm d^{-1}) e acumulados (mm) da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar irrigada com 100% da ETo durante o segundo e terceiro ciclos

Estádios	Segundo ciclo		
	Kc	ET- média	ET - total
Inicial	0,31	1,43	42,8
Desenvolvimento	0,86	3,99	220,7
Médio	1,35	5,69	1130,2
Final	1,15	4,59	270,9
Total	-	-	1664,2
Média	0,92	4,2	-
Estádios	Terceiro ciclo		
	Kc	ET- média	ET - total
Inicial	0,15	1,00	30,22
Desenvolvimento	0,79	4,6	228,4
Médio	0,96	5,9	1054,17
Final	0,79	5,2	313,59
Total	-	-	1626,37
Média	0,67	4,16	-

No segundo ciclo, o maior valor encontrado para a entrada de água no sistema foi de 66,8 mm, no DAC 191, correspondente ao estágio médio da cultura, após irrigação de 38,8 mm e precipitação de 28 mm, já para o terceiro ciclo o valor máximo foi de 107,5 mm no DAC 253, após precipitação de 109 mm. Em relação ao segundo ciclo da cana-de-açúcar os valores máximos apresentados para a drenagem e para a entrada de água no sistema (precipitação + irrigação) representam, respectivamente, 53,58% e 61,28% daquele obtido para o terceiro ciclo. Infere-se com os resultados deste trabalho que a utilização do Kc calculado pela metodologia do Kc-dual para região pode reduzir o consumo de água utilizado na irrigação e, conseqüentemente, poderá

possibilitar a diminuição dos custos de produção com o aumento no uso eficiente da água.

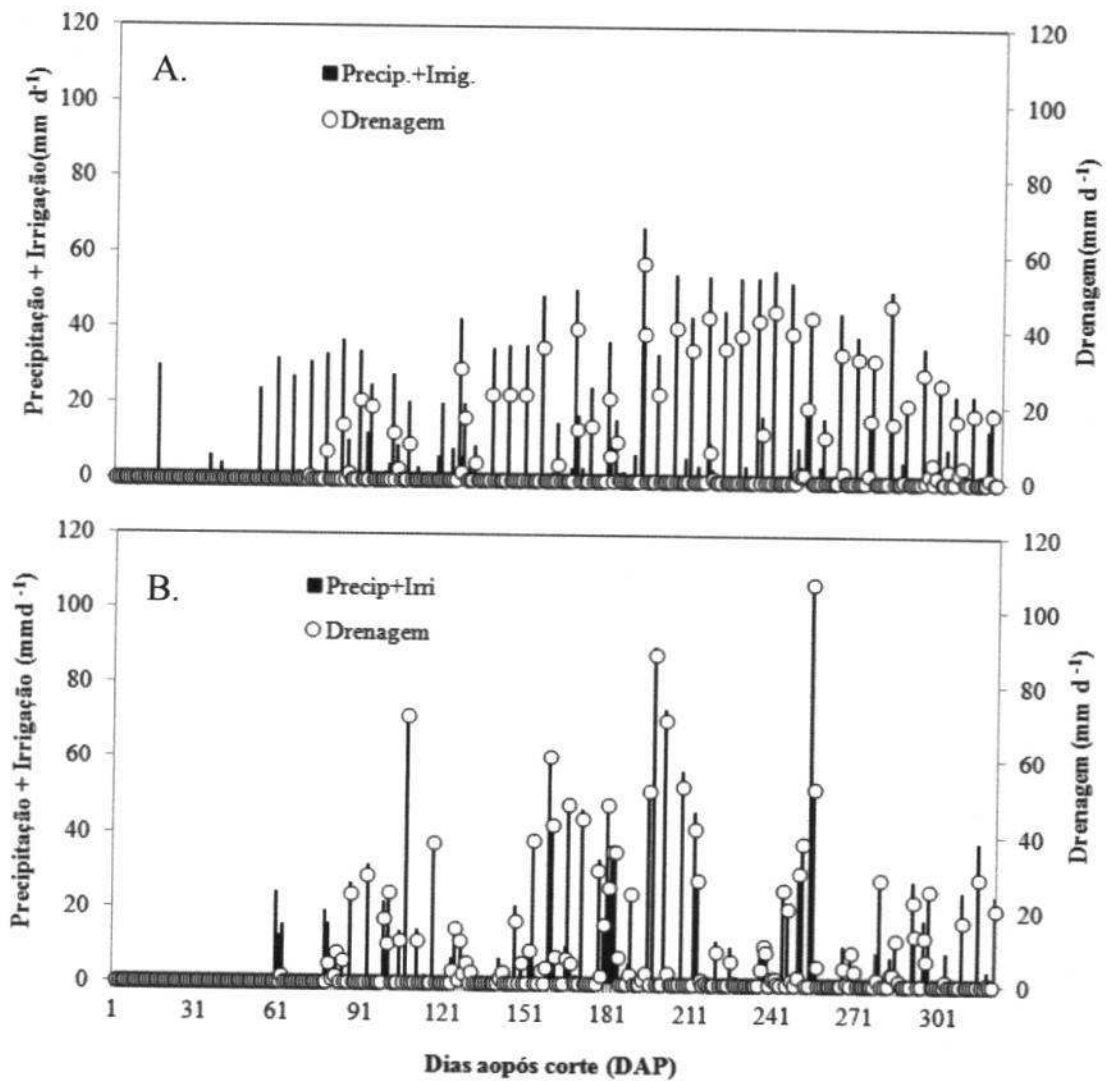


Figura 16. Cursos sazonais da precipitação e da drenagem de água no solo durante o período experimental do segundo (A) e terceiro (B) ciclos da cana-de-açúcar irrigada com 100% da ETo

5. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho para determinação do coeficiente de cultivo e consumo hídrico da cultura da cana-de-açúcar cultivada nos tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba permitem concluir o seguinte:

1. Os maiores valores da altura da cana-de-açúcar ocorrem quando a planta é submetida ao tratamento de irrigação de 100% da ETo, enquanto o diâmetro dos colmos foi maior no tratamento de 75% da ETo.
2. A umidade do solo exerce influência maior na altura dos colmos do que no diâmetro da planta da cana-de-açúcar.
3. A produtividade da cana-de-açúcar é significativamente afetada pelas condições de déficit hídrico, sendo de 62,20; 65,85; 100,61; 110,28 e 136,05 t ha⁻¹, respectivamente, nos tratamentos de sequeiro, 25, 50, 75 e 100 % da ETo.
4. A eficiência de uso de água diminui e a produtividade aumenta com o aumento na lâmina de água aplicada à cultura da cana-de-açúcar. A eficiência de uso de água nos tratamentos de 25, 50, 75 e 100% da ETo foram, respectivamente, 0,147; 0,139; 0,108 e 0,097 t ha⁻¹ mm⁻¹.
5. O menor consumo hídrico da cana-de-açúcar de 1066,3 mm ocorreu no seu segundo ciclo quando a cultura foi submetida ao regime de sequeiro, enquanto o maior consumo de 1626,37 mm ocorreu no tratamento de 100% da ETo no terceiro ciclo, influenciado pelo aumento da umidade do solo provocado pela precipitação.
6. Os valores da evapotranspiração média da cultura da cana-de-açúcar pelo método do Kc dual nos tratamentos sequeiro, 25, 50, 75 e 100% da ETo durante o segundo ciclo foram, respectivamente, 2,69; 2,92; 3,32; 3,87 e 3,92 mm d⁻¹;

enquanto no terceiro ciclo os valores da evapotranspiração média para o regime de sequeiro e lâmina plena foram de 3,28 e 4,16 mm d⁻¹, respectivamente.

7. Para região estudada, o maior valor encontrado para o Kc (calculado pela metodologia do Kc- dual) foi 1,35, quando a cana-de-açúcar foi submetida a lâmina plena de irrigação durante o segundo ciclo.
8. O Kc calculado pela metodologia do Kc-dual para região pode reduzir o consumo de água utilizado na irrigação e, conseqüentemente, possibilitará a diminuição dos custos de produção com o aumento no uso eficiente da água.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.G.; Smith, M.; Perrier, A. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, New Delhi, v.43, n.2, p.1-34, 1994.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO - Irrigation and drainage Paper, 56, p. 301, 1998.
- Allen, R. G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology*, v.229, n.1, p. 27-41, 2000.
- Allen, R. G.; Clemmens, A. J.; Burt, C. M.; Solomon, K.; O'Halloran, T. Prediction accuracy for project-wide evapo-transpiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, ASCE. 131: 24-36, 2005b, v.13, n.1, 2005.
- Azevedo, H. M. de. Resposta da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e de adubação de cobertura nos tabuleiros da Paraíba. Campina Grande: UFCG, 2002. 112p. Tese Doutorado.
- Azevedo, P. V.; Silva, B. B.; Silva, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in Northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.58, n.1, p.241-254, 2003.
- Azevedo, P. V.; Sousa, I. F.; Silva, B. B.; Silva, V. P. R. Water use efficiency of dwarf-green coconut (*cocos nucifera L.*) orchards in Northeast Brazil. *Agricultural Water anagement*, v.1, n.84, p.259-264, 2006.
- Azevedo, J. H. O. et al. Influência de lâminas de irrigação nos componentes de produção da bananeira. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E

- DRENAGEM, 27, 2007, Mossoró. Agricultura irrigada no semi-árido: anais. Mossoró: ABID: Governo do Estado do Rio Grande do Norte, 2007. 1 CD-ROM.
- Camargo, A.P.; Sentelhas, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- Camargo, A.P.; Camargo, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. Bragantia, Campinas, v.59, n.2, p.125-137, 2000.
- Castro, P. R. C. Maturadores químicos em cana-de-açúcar. In: semana da cana-de-açúcar de piracicaba, 4., 1999, Piracicaba. Anais... Piracicaba: SACCHARUM, 1999. v. 1, p. 12-16. CD Rom.
- Cardoso, M. G., et. al. Produção de Aguardente de Cana. Lavras. Ed. UFLA, 2006.
- Carvalho, C. M. de; Azevedo, H. M. de; Dantas neto, J. ; Melo, E. P. de; Silva, C. T. S. da; Gomes filho, R. R. Resposta dos parâmetros tecnológicos da terceira folha de cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. Revista Brasileira de Ciências Agrárias. Recife, v.3, n.4, p.337-342, 2008
- Cintra, F. L. D. ; Libardi, P. L.; Saad, A. M. Balanço hídrico no solo para porta enxerto de citros em ecossistema de Tabuleiro Costeiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 4, n. 1,p. 23-28, 2000.
- Coelho, M.B.; Barbosa, M. H. P.; Marciel, M. L. Manejo da irrigação na cana-soca no cerrado de Minas Gerais. In: Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 8, 2002, Recife. Anais... Recife: STAB, 2002.p.591-598.
- Coelho, E. F. et al. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. Bahia Agrícola, Salvador, v. 7, n. 1, p. 57-60, 2005.

- Dalri, A. B.; Cruz, R. L.; Garcia, C. J. B.; Duenhas, L. H.; Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. *Irriga, Botucatu*, v.13, n.1, p. 1-11, 2008.
- Dantas Neto, J.; Figueiredo, J. L. C.; Farias, C. H. A.; Azevedo, H. M.; Azevedo, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 10, n.2, p.283–288, 2006.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO, 1977. 144p. (FAO Irrigation and drainage paper, 24).
- Farias, C. H. A. Desenvolvimento morfofisiológico da cana-de-açúcar em regime irrigado e sequeiro na Zona da Mata Paraibana. Campina Grande: UFPB, 2001. 74p. Dissertação Mestrado.
- Farias, C. H. A. Otimização do uso da água e do zinco na cana-de-açúcar em tabuleiro costeiro paraibano. Campina Grande: UFCG, 2006. 142p. Tese Doutorado.
- Farias, C. H. A. et al. Eficiência no uso da água pela cana-de-açúcar no litoral paraibano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2007, Bonito, MS. Inovação tecnológica: reorganização e sustentabilidade dos espaços produtivos: anais. Bonito: SBEA, 2007. 3 p., 1 CD-ROM.
- Farias, C.H.A.; Fernandes, P.D.; Azevedo, H.M.; Dantas Neto, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.4, p.356–362, 2008.
- Flumignan, D. L.; Faria, R. T.; Prete, C. E. C. Evapotranspiration components and dual crop coefficients of coffee trees during crop production. *Agricultural Water Management*, 98, v.1, p.791-800, 2011.

- Hargreaves, G. H. Potential evapotranspiration and irrigation requirements for northeast Brazil. Logan: Utah State University, 1974. 55 p.
- Hurst, C. A.; Thorburn, P. J., Lockington, D.; Bristow, K. L. Sugarcane water use from shallow water tables: implications for improving irrigation water use efficiency. *Agric. Water Manage.* v.65, n.1, p. 1-19, 2004.
- Hussein, A.S.A. Grass ET estimates using Penman-type equations in Central Sudan. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.125, n.6. p.324-9, 1999.
- Inman-Bamber, N. G.; Smith, D. M. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. *Field Crops Research*, v. 89, p. 107-122, 2002.
- Inman-Bamber, N. G.; Smith, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*, v. 92, p. 185-202, 2005.
- Jensen, M.W.; Burman, R.D.; Allen, R.G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 329 p. (ASCE. Manual and Reports on Engineering Practices, 70).
- Junqueira Junior, J. A.; Gomes, N. M.; Mello, C. R.; Silva, A. M. Precipitação provável para a região de Madre de Deus, alto rio Grande: modelos de probabilidades e valores característicos. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 31, n. 3, p. 842-850, 2007.
- Keating, B. A.; Robertson, M. J.; Muchow, R. C.; Huth, N. I. Modelling sugarcane production systems I: development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Research*, v. 48, p. 27-36, 1999.
- Leite, G. H. P. Aplicações de reguladores vegetais em cana-de-açúcar, desenvolvimento e produtividade de colmos em meio de safra. In: *Simposio Brasileiro Sobre Eco Fisiologia, Maturação e Maturadores em Cana-de-Açúcar*, 2008, Botucatu, SP. Anais. Botucatu, 2008, p.6-10. CD Rom.

- Lima, J. M. S. Balanço hídrico e de energia em solo cultivado e sem vegetação, para as condições do brejo paraibano. Recife: UFPE, 2004. 166 p. Tese Doutorado.
- Lima, C. J. G. S. et al. Eficiência do uso da água pelo meloeiro Gália fertirrigado. In: Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação, 1.; Conferência sobre recursos hídricos do semi-árido brasileiro, 1., 2007, Sobral-CE. Anais... Sobral: Inovagri, 2007. 1 CD-ROM.
- Liu, Y.; Luo, Y. L. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, v.97, n.1, p. 31-40, 2010.
- López-Urrea, R.; Olalla, F. M. S.; López-Fuster, A. M. Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, v.96, p.1031–1036, 2009.
- Maggiotto, S.R. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo uso da termometria ao infravermelho. São Paulo: ESALQ, 1996. 71 p. Dissertação Mestrado.
- Maximiliano, S. S. Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) através de parâmetros climáticos. São Paulo: ESALQ, 2002. 79 p. Dissertação Mestrado.
- Miranda, F.R.; Gondim, R.S.; Costa, C.A.G. Evapotranspiration and crop coefficients for tabasco pepper (*Capsicum frutescens* L.). *Agricultural Water Management*, vol. 82, p. 237-246, 2006.
- Oliveira, R. A.; Rocha, I de B.; SediyaMA, G. C.; Puiatti, M.; Cecon, P. R.; Silveira, S. de F. R. Coeficientes de cultura da cenoura nas condições edafoclimáticas do Alto Paranaíba, no Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.2, p.280-284, 2003.

- Oliveira, E. P. de, Sobrinho, J. B. S., Negreiros, J. C. de, Amazonas, L., Almeida, M. B. A. de, Silveira, P. S.; Andrade, R. A. de; Piffer, T. R. de O. , Teixeira, W. S. Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar safra 2007/2008, segundo levantamento, agosto/2007 - Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: Conab, 2007. 12p.
- Olmo, O. A. Viability and economic alternative. Bohemia Magazine 23, <http://www.cubaminrex.cu/mirarcuba/Economia/viabilidadyalternativaeconomica.htm>; 2002.
- Payero, J. O. ; Tarkalson, D. D. ; Irmak, S. ; Davison, D.; Petersen, J. L. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, v.95, p.895–908, 2008.
- Pereira, A. R., Angelocci, R. C., Sentelhas, P. C. *Agrometeorologia, fundamentos e aplicação prática*. Guaíba. Agropecuária, 2002, 478 p.
- Ramos, F. A. P. Comportamento de cana-de-açúcar, cultivar SP79-1011, submetida a diferentes épocas de plantio em duas condições edafoclimáticas. Paraíba: UFPB, 2006. 51 p. Dissertação Mestrado.
- Rocha, F.C.S. Avaliação da eficiência técnica e análise financeira de um plantio comercial de cana-de-açúcar, *Saccharum officinarum* L., microirrigado por gotejamento subsuperficial. Fortaleza: UFC, 2001. Dissertação de Mestrado.
- Sanchs, R. C. C; Martins, V. A. *Informações Econômicas*, SP, v.37, n.9, set. 2007.
- Sedyama, G. C. *Evapotranspiração: necessidade de água para os cultivos*. Brasília: ABEAS, 1996.167p. (ABEAS. Curso de Engenharia de Irrigação. Módulo 2).

- Segato, S. V., Pinto. A. de S., Jendiroba, E. , Nóbrega, J. C. M. Atualização da produção de Cana- de - Açúcar, Piracicaba: CP2: 2006, 15p.
- Sentelhas, P.C. Class A pan coefficients (Kp) to climate daily reference evapotranspiration (ETo). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.1, p.111-115, 2003.
- Silva, F. A. S. The ASSISTAT Software: statistical assistance. International Conference on Computers in Agriculture. Trans. ASAE, 1, 298-298, 1996.
- Silva, V.P. R., Azevedo, P. V.; Silva, B. B.; Bassoi, L. H.; Teixeira, A. H.C.; Soares, J. M. e Silva, J. A. M., Estimativa da Evapotranspiração da mangueira com base no balanço hídrico do solo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.3, p.456-462, 2001.
- Silva Júnior, L.D. Estágio de desenvolvimento e exigências da cultura da cana-de-açúcar. UNIVAG, Centro Universitário. <http://www.univag.com.br/artigo007.htm>. (30 nov.2001).
- Silva, A. B. da. Resposta da cana-de-açúcar irrigada sob diferentes níveis de adubação. Campina Grande: UFCG, 2002. 61p. Dissertação Mestrado.
- Silva, V. P. R.; Guedes, M. J. F.; Lima, W. F. A. e Campos, J. H. B. C. Modelo de previsão de rendimento de culturas de sequeiro, no semi-árido do Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.1, pp. 83-87, 2002.
- Silva, V. P. R.; Azevedo, P. V.; Silva, B. B. Surface Energy Fluxes and Evapotranspiration of a Mango Orchard Grown in a Semiarid Environment. Agronomy Journal, v. 99, p. 1391-1396, 2007.
- Silva, M. M. Balanço de água no solo com milho sob sistema plantio direto e diferentes doses de nitrogênio. Piracicaba: ESALQ, 2007. 86 p.: Tese Doutorado.

- Silva, V. P. R.; Campos, J. H. B. C.; Azevedo, P. V. Water-use efficiency and Evapotranspiration of mango orchard grown in northeastern region of Brazil. *Scientia Horticulturae*, v. 102, p. 467-472, 2009.
- Silva, C. T.; Azevedo, H. M.; Azevedo, C. A. V.; Dantas Neto, J. ; Carvalho, C. M.; Gomes Filho, R. Crescimento da cana-de-açúcar com e sem irrigação complementar sob diferentes níveis de adubação de cobertura nitrogenada e potássica. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v.3, n.1, p.3-12, 2009.
- Soares, W. R.; SediyaMA, G. C.; Ribeiro, A.; Costa, J. M. N. Dependência do coeficiente de cultura no estágio inicial de desenvolvimento (Kcini) à lâmina de irrigação e textura do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, n.1, p.23-27, 2001.
- Souza, F. de. ; Yoder, R. ET . Estimation in the Northeast of Brazil: Hargreaves or Penman-Monteith equation. St. Joseph: ASAE, 1994. 6 p. (ASAE Paper, 942545).
- Souza, C. B.; Silva, B. B.; Azevedo, P. V.; Silva, V. P. R. Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, p. 400-407, 2008.
- Suarez R, Morin, R. Sugar cane and sustainability: approaches and Cuban experiences, <http://www.laneta.apc.org/desal/spip/article.php>; 2005.
- Teramoto, E. R. Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) baseados em parâmetros do solo e clima. Piracicaba: ESALQ, 2003, 86 p. Tese de doutorado.
- Thiago, L. R. L. S.; Vieira, J. M. Cana-de-açúcar: uma alternativa de alimento para a seca. EMBRAPA Gado de Corte - Comunicado Técnico nº 73, 2002. Disponível em: <http://www.cnpqc.embrapa.br/publicacoes/cot/COT73.html>. Acesso em março/2011.

- Tormena, C. A.; Silva, A. P.; Gonçalves, A. C. A.; Folegatti, M. V. Intervalo ótimo de Potencial da água no solo: Um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na Agricultura Irrigada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, n.3, p.286-292, 1999.
- União dos Produtores de Bioenergia – UDOP. Safra (06/07). Disponível em: http://www.udop.com.br/download/estatistica/ranking_producao_brasil.pdf. 21 de Set. 2009.
- Unica, UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR. Disponível em: <http://www.unica.com.br/FAQ/> Data de acesso: 24/06/2011.
- Valnir Júnior, M. Análise de componentes do balanço hídrico em culturas do feijão de corda (*Vigna Ungüiculata* (L) Walp.), sob condições de recarga natural. Fortaleza: UFC, 2000. Dissertação Mestrado.
- Varela, A. C. G. Análise do comportamento morfofisiológico da cana-de-açúcar irrigada (variedades SP 791011 e SP 716949), nos Tabuleiros Costeiros Paraibanos. Campina Grande: UFCG, 2002. 89 p. Dissertação Mestrado.
- White, I.; Melville, M. D.; Wilson, B. Understanding acid sulfate soils in canelands. In: *Proceedings of National Conference on Acid Sulfate Soils*, Coolangatta, NSW, June 24–25. CSIRO, NSW Agriculture, Tweed Shire Council, pp. 130–148, 1993.
- Wilson, B. P., White, I., Melville, M. D. Floodplain hydrology, acid discharge and change in water quality associated with a drained acid sulfate soil. *Mar. Freshw. Res.* 50, 149–157, 1999.