

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

FABRÍCIO MOTA GONÇALVES

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVO DA CANA-DE-
AÇÚCAR IRRIGADA POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL**

FORTALEZA

2010

FABRÍCIO MOTA GONÇALVES

EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR
IRRIGADA POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Orientador: Prof. Dr. Fábio Rodrigues de Miranda

FORTALEZA

2010

FABRÍCIO MOTA GONÇALVES

EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR
IRRIGADA POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Aprovada em: 22 de Fevereiro de 2010.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fábio Rodrigues de Miranda (Orientador)

Universidade Federal do Ceará - UFC

Dra. Albanise Barbosa Marinho (Conselheira)

Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Thales Vinícius de Araújo Viana (Conselheiro)

Universidade Federal do Ceará – UFC

A minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela sua infinita misericórdia e amor, por nos dar força e coragem para vencermos todos os obstáculos por mais difíceis que nos pareçam.

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará-UFC e ao orientador Prof. Dr. Fábio Rodrigues de Miranda, que contribuíram de forma direta e indireta com o aprendizado e confecção do trabalho final para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Aos colegas de turma de mestrado que no decorrer do curso tornaram-se verdadeiros amigos.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro com a manutenção a bolsa de auxílio.

“As grandes idéias surgem da observação dos pequenos detalhes.”

(Augusto Cury)

RESUMO

GONÇALVES, Fabrício Mota, Universidade Federal do Ceará. Fevereiro de 2010. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial. Orientador: Fábio Rodrigues de Miranda. Conselheiros: Albanise Barbosa Marinho, Thales Vinícius de Araújo Viana.

A cana-de-açúcar é uma das culturas com maior consumo de água, apresentando uma alta demanda evapotranspirativa ao longo da maior parte do seu ciclo. O conhecimento das necessidades hídricas da cana-de-açúcar, do momento de aplicação da água requerida pela mesma e a forma de aplicação torna-se cada vez mais importante para o desenvolvimento sustentável da sua produção irrigada, principalmente em regiões de pouca disponibilidade hídrica, como é o caso da região Nordeste do Brasil. O experimento foi conduzido no Campo Experimental do Curu, pertencente à Embrapa Agroindústria Tropical localizado no Perímetro Irrigado Curu-Paraipaba, município de Paraipaba-CE (3° 29' 20'' S, 39° 9' 45'' W e altitude de 30 m), com o objetivo de determinar a evapotranspiração e os coeficientes de cultivo (Kc) da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), irrigada por gotejamento subsuperficial. Utilizou-se a variedade de cana SP 6949, plantada no espaçamento de 1,8 m entre fileiras duplas e 0,4 m entre linhas dentro da fileira dupla. Na irrigação utilizou-se uma linha lateral para cada fileira dupla, enterrada na profundidade de 0,15 m, com gotejadores autocompensantes, com vazão de 1 L h⁻¹, espaçados de 0,5 m na linha. A cultura foi irrigada com frequência diária e foram realizadas três fertirrigações por semana. A lâmina de irrigação foi ajustada periodicamente, mantendo-se o potencial de água no solo entre -8 kPa e -20 kPa. A evapotranspiração da cultura (ETc) foi determinada utilizando-se um lisímetro de pesagem com área superficial de 2,25 m². A evapotranspiração de referência (ETo) foi estimada pelo método FAO Penman-Monteith. As durações das fases fenológicas da cana-de-açúcar foram estimadas por meio da análise da cobertura do solo pela cultura, determinada com o uso de imagens digitais. Foram observadas durações de 31, 49, 237 e 118 dias, para as fases inicial, de desenvolvimento, intermediária e final, respectivamente. A produtividade alcançada dentro e fora do lisímetro foi de 144,4 e 108,8 t ha⁻¹, respectivamente. A ETc total observada durante o ciclo da cana-de-açúcar foi de 1.074,1 mm, com valores máximos da ordem de 6,6 mm d⁻¹ durante a fase intermediária. Foram observados valores de Kc iguais a 0,23, 1,03 e 0,50, para as fases inicial, intermediária e final, respectivamente. Na fase de desenvolvimento vegetativo a relação entre o Kc e a cobertura do solo pela cultura foi representada com bastante exatidão por um modelo quadrático negativo.

Palavras-chave: Irrigação localizada. Manejo da irrigação. Lisímetro.

ABSTRACT

GONÇALVES, Fabrício Mota, Universidade Federal do Ceará. (2010). Evapotranspiration and crop coefficients of subsurface drip irrigated sugar cane. Adviser: Fábio Rodrigues de Miranda. Council members: Albanise Barbosa Marinho, Thales Vinícius de Araújo Viana.

Sugar cane is one of the crops with the highest level of water consumption, with a high evapotranspiration demand throughout most of its cycle. Knowledge of the sugar cane water demand, the time that irrigation should be applied, and how to irrigate the crop are becoming increasingly important for the sustainable development of irrigated sugar cane cultivation, especially in areas of low water availability, as it is the case in northeastern Brazil. The experiment was carried out at the Curu Experimental Field (property of the Embrapa Tropical Agroindustry), located in the Curu-Paraipaba Irrigation Project, city of Paraipaba-CE (3 ° 29 '20"S, 39 ° 9' 45"W and elevation 30m), in order to determine the evapotranspiration and crop coefficients (Kc) of sugarcane (*Saccharum L. officinarum*), subsurface drip-irrigated. It was used the SP 6949 sugar cane variety, planted in a spacing of 1.8 m between double rows and 0.4 m between rows within the double row. As to the irrigation, we used one lateral water line for each double row, buried at a depth of 0.15 m, with self-compensating drip emitters, with a flow rate of 1 L h⁻¹, spaced 0.5 m on the water line. The crop was irrigated daily and there were three fertigations per week. The irrigation depth was periodically adjusted, keeping the soil water potential between -8 kPa to -20 kPa. The crop evapotranspiration (ETc) was determined using a weighing lysimeter with a surface area of 2.25 m². The reference evapotranspiration (ETo) was estimated by the FAO Penman-Monteith method. The durations of the phenological stages of cane sugar were estimated through analysis of soil cover, with the use of digital images. Durations of 31, 49, 237 and 118 days were observed, respectively for initial, crop development, mid-season and late season stages. The yields achieved within and outside the lysimeter were respectively 144.4 and 108.8 t ha⁻¹. The total ETc observed during the cycle of the sugar cane was 1074.1 mm, with maximum values of 6.6 mm d⁻¹ during the mid-season stage. Observed Kc values for initial, mid-season and late season stages were respectively 0.23, 1.03 and 0.50. In the crop development stage, the relationship between Kc and the (crop) soil cover was represented with good accuracy by a negative quadratic model.

Keywords: localized irrigation, irrigation management, lysimeter

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|--|----|
| TABELA 1 | Valores de Kc para cana-planta | 26 |
| TABELA 2 | Análise química do solo da área experimental, realizada em abril de 2008. Paraipaba-CE..... | 31 |
| TABELA 3 | Doses de nutrientes aplicados via fertirrigação na cana-de-açúcar..... | 35 |
| TABELA 4 | Análise foliar da cana-de-açúcar realizada em novembro de 2008 | 35 |
| TABELA 5 | Médias meteorológicas mensais observadas durante a realização do experimento, Paraipaba-CE, 2008-2009..... | 43 |
| TABELA 6 | Durações das fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar e coeficientes de cobertura do solo (Cs) observados | 49 |
| TABELA 7 | Durações das fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar em função da cobertura do solo, segundo a metodologia proposta por Allen <i>et al.</i> (1998) | 49 |
| TABELA 8 | Valores de evapotranspiração da cultura (ETc), evapotranspiração de referência estimada pelo método FAO Penman-Monteith e lâminas de irrigação aplicadas (LI) durante as fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar..... | 52 |
| TABELA 9 | Coefficientes de cultivo (Kc) da cana-de-açúcar observados em Paraipaba-CE e recomendados por Allen <i>et al.</i> (1998)..... | 53 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| FIGURA 1 | Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. (DOORENBOS; KASSAM, 1994)..... | 15 |
| FIGURA 2 | Curva do coeficiente da cultura generalizada para aproximação do coeficiente de cultura único. (ALLEN <i>et al.</i> ,1998)..... | 27 |
| FIGURA 3 | Sulcador utilizado nas operações de sulcamento, adubação de plantio e instalação das linhas gotejadoras | 32 |
| FIGURA 4 | Ilustração do espaçamento entre as fileiras duplas e as laterais do sistema de irrigação | 32 |
| FIGURA 5 | Disposição do sistema de irrigação no campo | 33 |
| FIGURA 6 | Vista da superfície do solo e dos bulbos molhados formados pelos gotejadores ao longo da lateral | 34 |
| FIGURA 7 | Estação utilizada no monitoramento do potencial da água do solo | 37 |
| FIGURA 8 | Sensores watermark [®] utilizados no monitoramento do potencial da água do solo | 37 |
| FIGURA 9 | Lisímetro de pesagem utilizado para medir a ETc da cana-de-açúcar | 38 |
| FIGURA 10 | Estação climatológica automática utilizada para a medição e armazenamento de dados meteorológicos | 39 |
| FIGURA 11 | Imagem da cobertura vegetal da cultura da cana-de-açúcar no lisímetro de pesagem..... | 41 |
| FIGURA 12 | Variação do potencial da água no solo (kPa) nas profundidades 0,20 e 0,50 m no período de 12 de agosto de 2008 a 31 de dezembro de 2008..... | 44 |
| FIGURA 13 | Variação do potencial da água do solo nas profundidades 0,20 e 0,50 m no período de 1 de janeiro de 2009 a 16 de agosto de 2009..... | 44 |
| FIGURA 14 | Leituras do lisímetro de pesagem no carregamento durante a calibração | 46 |
| FIGURA 15 | Determinação da sensibilidade de pesagem do lisímetro utilizando massa padrão de 200 g..... | 46 |
| FIGURA 16 | Variação da massa do lisímetro ao longo de um dia com irrigação..... | 47 |
| FIGURA 17 | Valores da cobertura do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar | 48 |

| | | |
|-----------|--|----|
| FIGURA 18 | Evapotranspiração da cultura (ET_c) e evapotranspiração de referência estimada pelo método FAO Penman-Monteith (ET_o -PM) observada durante o ciclo da cana-de-açúcar | 51 |
| FIGURA 19 | Coefficientes de cultivo da cana-de-açúcar determinados para valores de ET_o estimados pelo método FAO Penman-Monteith..... | 53 |
| FIGURA 20 | Relação entre o coeficiente de cultivo (K_c) e a cobertura do solo (C_s) na fase de desenvolvimento vegetativo | 55 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 15 |
| 2.1 | A cultura da cana-de-açúcar | 15 |
| 2.2 | Necessidades hídricas da cana-de-açúcar | 17 |
| 2.3 | Evapotranspiração | 19 |
| 2.4 | Determinação da evapotranspiração da cultura (ETc) | 21 |
| 2.5 | Coeficiente de cultivo (Kc)..... | 24 |
| 2.6 | Irrigação localizada subsuperficial e a eficiência de uso da água..... | 28 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 30 |
| 3.1 | Descrição da área experimental | 30 |
| 3.2 | Plantio e instalação da cultura..... | 30 |
| 3.3 | Tratos culturais e condução da cultura | 34 |
| 3.4 | Manejo da irrigação..... | 36 |
| 3.5 | Determinação da evapotranspiração da cultura (ETc) | 37 |
| 3.6 | Determinação da evapotranspiração de referência (ETo)..... | 39 |
| 3.7 | Determinação do coeficiente de cultivo (Kc) da cana-de-açúcar | 40 |
| 3.8 | Colheita..... | 41 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 43 |
| 4.1 | Características climáticas do local e potencias de água no solo | 43 |
| 4.2 | Calibração do lisímetro..... | 45 |
| 4.3 | Coeficiente de cobertura do solo (Cs) | 47 |
| 4.4 | Evapotranspiração da cultura (ETc)..... | 50 |
| 4.5 | Determinação do coeficiente de cultivo (Kc) da cana-de-açúcar | 52 |
| 4.6 | Produtividade | 55 |
| 5 | CONCLUSÕES | 57 |
| 6 | REFERÊNCIAS | 58 |

1 INTRODUÇÃO

Historicamente a cana de açúcar é um dos principais produtos agrícolas do Brasil, sendo cultivada desde a época da colonização. Do seu processo de industrialização obtêm-se como produtos o açúcar nas suas mais variadas formas e tipos, o álcool (anidro e hidratado), o vinhoto e o bagaço.

Segundo dados do IBGE, a cana-de-açúcar apresentou uma produtividade de 648.973.981 toneladas com uma área colhida de 8.141.228 ha no ano de 2008. Já para o ano de 2009 a produção estimada foi de 687.076.726 toneladas para uma área colhida de 8.621.805 ha, apresentando uma variação em produtividade e em área de 5,9 %.

A cana-de-açúcar é uma das culturas com maior consumo de água, apresentando uma alta demanda evapotranspirativa ao longo da maior parte do seu ciclo. O conhecimento das necessidades hídricas da cana-de-açúcar, do momento de aplicação da água requerida pela mesma e a forma de aplicação se torna cada vez mais importante para o desenvolvimento sustentável da sua produção irrigada, principalmente em regiões de pouca disponibilidade hídrica, como é o caso da região Nordeste do Brasil.

A determinação do coeficiente de cultivo (K_c), proporciona um melhor ajuste na determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c) para um dado local e permite aplicar água à cultura de forma mais precisa. Esse coeficiente representa uma integração dos efeitos da altura da cultura, do albedo, da resistência do dossel e evaporação do solo, que distinguem a cultura de uma cultura referência. A cultura da cana-de-açúcar, como outras, apresenta uma variação considerável da taxa de evapotranspiração durante todo seu ciclo de desenvolvimento em virtude da variação da área foliar e das fases fenológicas, apresentando valores de K_c diferentes para cada uma.

Os métodos de irrigação tradicionalmente utilizados na cana-de-açúcar, como a irrigação por superfície (sulcos e inundação) e a aspersão (canhão e pivô central), apresentam perdas significativas de água, seja por percolação abaixo da zona radicular ou por deriva pelo vento. Esses fatores contribuem de forma significativa para o esgotamento dos recursos hídricos nas regiões onde há maior concentração de plantios irrigados de cana, como é o caso do Vale do Curu-CE, onde existem atualmente mais de 2.000 ha irrigados de cana-de-açúcar.

Diante da expressiva importância da cana-de-açúcar no cenário econômico brasileiro e de seu elevado consumo de água, torna-se necessário um estudo mais aprofundado das necessidades hídricas da cana-de-açúcar em suas diferentes fases de desenvolvimento.

Sendo assim, é conveniente estabelecer práticas de manejo capazes de aumentar o rendimento e a qualidade da cultura, com maior economia de água, utilizando sistemas de irrigação mais eficientes e coeficientes técnicos adequados.

O presente trabalho tem como objetivo determinar a evapotranspiração e os coeficientes de cultivo (K_c) da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial na região de Paraipaba-CE.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea pertencente ao gênero *Saccharum Officinarum* L., da classe das Monocotiledôneas, família Gramineae; própria de climas quentes tropicais e subtropicais. Desenvolve-se formando touceira e é constituída por uma parte aérea e outra subterrânea formada por raízes e rizomas. Suas flores são pequenas, praticamente destituídas de perianto e protegidas por brácteas e bracteólas secas, reunidas em típicas inflorescências. O fruto é seco do tipo cariopse e com semente de endosperma abundante. (ARANHA; YAHN, 1987).

Originária do sudeste da Ásia, provavelmente de Nova Guiné, onde é cultivada desde épocas remotas, a exploração canavieira assentou-se, no início, sobre a espécie *Saccharum officinarum*. O surgimento de várias doenças e de uma tecnologia mais avançada exigiram a criação de novas variedades, as quais foram obtidas pelo cruzamento da *S. officinarum* com as outras quatro espécies do gênero *Saccharum* e, posteriormente, através de recruzamentos com as ascendentes. (AGROBYTE, 2008). Os trabalhos de melhoramento persistem até os dias atuais e conferem a todas as variedades em cultivo uma mistura das cinco espécies originais e a existência de cultivares ou variedades híbridas.

A cana-de-açúcar é uma das culturas de maior importância socioeconômica no Brasil; seus principais derivados são o açúcar (alimento) e o álcool (hidratado e anidro), imprescindíveis ao mercado mundial. Outros produtos, também originados dessa cultura e que devem ser salientados, são a aguardente, o bagaço, que é utilizado principalmente como fonte de energia, a vinhaça, que serve de fertilizante, o plástico e o papel. (SOUZA *et al.*, 1999).

Segundo Doorenbos e Kassam (1994), a cultura não necessita de um solo especial. Os melhores são aqueles com mais de 1 m de profundidade, embora seja possível ocorrer um enraizamento profundo de até 5 m. O solo deve estar preferencialmente bem arejado e possuir uma quantidade total de água disponível de 15 % ou mais. O pH ótimo do solo deve estar em torno de 6,5, porém a cultura pode se desenvolver em solos com pH em torno de 5,0 a 8,5. Conforme os mesmos autores, a planta é muito exigente em nitrogênio e potássio e apresenta relativamente baixa necessidade de fósforo. Altas doses de nitrogênio e elevadas populações são técnicas muito utilizadas em diversas culturas visando à obtenção de altas produtividades.

Entretanto, estes fatores podem promover o acamamento das plantas, especialmente para as cultivares de porte médio ou alto.

O espaçamento entre fileiras varia normalmente entre 1,1 e 1,4 m. A cana perfilha de maneira abundante, na fase inicial do desenvolvimento. Quando se estabelece como cultura, o auto-sombreamento induz inibição do perfilhamento e aceleração do colmo principal. O crescimento em altura continua até a ocorrência de alguma limitação no suprimento de água, ocorrência de baixas temperaturas ou ainda devido ao florescimento, sendo este processo indesejável em culturas comerciais. (RODRIGUES, 1995).

A cana-de-açúcar apresenta quatro períodos de crescimento (Figura 1), definidas como: estabelecimento (10 a 30 dias), perfilhamento (150 e 350 dias), crescimento dos colmos (70 a 200 dias) e a maturação (50 a 70 dias). (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

Ao longo do ciclo vegetativo, a cana-de-açúcar apresenta dois períodos bem distintos em relação ao teor de sacarose: o primeiro ciclo é marcado por intenso crescimento vegetativo, e pequeno acúmulo gradual de sacarose; no segundo ciclo, ocorre o acúmulo de sacarose, devido principalmente à queda de temperatura e a disponibilidade de água no solo (MAGALHÃES, 1987), ou seja, o teor de sacarose nos colmos aumenta no momento em que a cana-de-açúcar cessa seu crescimento vegetativo. (LUCCHESI, 1995).

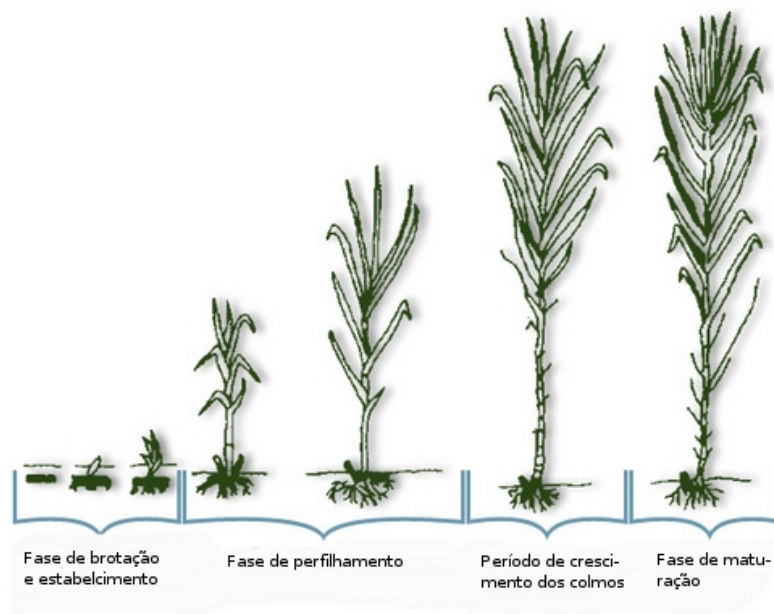


Figura 1 - Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

A cana é uma das culturas que possuem muitas qualidades tecnológicas no que se refere a utilização pela indústria. Por sua eficiência de assimilação de fotossíntese e capacidade de produzir massa verde composta por açúcares, amidos, proteína e compostos lignocelulósicos, todos eles matérias-primas para um amplo campo de produção de importância econômica. (TAUPIER; RODRIGUEZ, 1999).

Segundo Rodrigues (1995), a cana-de-açúcar é uma planta de metabolismo fotossintético C₄, é considerada altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em até 100 mg de CO₂ fixado por dm² de área foliar por hora. Entretanto, esta alta atividade fotossintética, não se correlaciona diretamente com a elevada produtividade de biomassa.

A grande capacidade da cana-de-açúcar, para a produção de matéria orgânica, reside na alta taxa de fotossíntese por unidade de superfície de terreno, que é influenciado pelo Índice de Área Foliar (IAF). Além disso, o longo ciclo de crescimento da planta resulta em elevadas produções de matéria seca.

De acordo com Vieira (1986), as gramíneas normalmente respondem muito bem à irrigação, pois com umidade suficiente no solo, calor e luminosidade, apresentam elevado desenvolvimento. A frequência e a lâmina de irrigação devem variar com os períodos de crescimento da cana-de-açúcar.

2.2 Necessidades hídricas da cana-de-açúcar

A água é um importante elemento da natureza, responsável por vários processos fisiológicos indispensáveis para o bom funcionamento do vegetal, além disso, em meio aquoso ocorre à difusão de minerais, solutos celulares e gases, tanto na célula quanto entre órgãos. A relativa alta permeabilidade da maioria das paredes e membranas celulares resulta numa fase contínua para a difusão e a translocação de solutos na planta. A água é também um importante reagente ou substrato para reações celulares imprescindíveis para todo tipo de vida conhecida, como, por exemplo, a fotólise da água, que é o processo inicial da fotossíntese. (PIMENTEL, 2004).

O crescimento do vegetal depende da divisão e da diferenciação celular, sendo esses dois processos afetados pelo estresse hídrico, apesar dessa influência nem sempre se dar na mesma proporção (BARLOW *et al.*, 1980). Segundo Kramer (1983), o déficit hídrico

provoca alterações no desenvolvimento da planta, como a redução do tamanho, da área foliar e da produtividade da cana-de-açúcar.

Por causa das variações locais de clima e de variedades, é difícil estabelecer uma relação entre produção e consumo de água para a cana-de-açúcar. De acordo com Scardua e Rosenfeld (1987), o consumo hídrico pela cana-de-açúcar também varia em função do estágio de desenvolvimento fenológico, do ciclo da cultura, das condições climáticas e da água disponível no solo, entre outros fatores. O consumo anual de água pela cultura varia entre 1.500 e 2.500 mm, de acordo com Doorenbos e Kassam (1994).

De acordo com Scardua e Rosenfeld (1987), o consumo máximo de água da cana-de-açúcar nas diversas regiões do mundo varia de 2,8 a 8,6 mm dia⁻¹ e o consumo médio de 2,5 a 5,8 mm dia⁻¹.

Blackburn e Glasziou (1984), estudando o crescimento e o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, concluíram que o suprimento de água adequado situa-se em torno de 1.200 mm.

O consumo diário de água da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do Brasil, dependendo da variedade, do estágio de desenvolvimento da cultura, da demanda evapotranspirométrica em função do mês e da região (variação temporal e espacial), varia de 2,0 a 6,0 mm dia⁻¹. (BERNARDO, 2008). Em condições de campo, a cana planta consome um máximo de 4,5 mm dia⁻¹ de água, um mínimo de 2,3 mm dia⁻¹ e um consumo médio de 3,3 mm dia⁻¹, ao passo que a soca 4,4; 2,2 e 3,2 mm dia⁻¹, respectivamente. (SCARDUA, 1979).

O período crítico da cana-de-açúcar quanto ao déficit hídrico, ou seja, aquele em que há maior exigência da água por parte da planta, corresponde ao período máximo de crescimento vegetativo, que ocorre nos primeiros oito meses de vida. (VARELA, 2002).

De acordo com Scardua e Rosenfeld (1987) a manutenção de potenciais de água do solo entre -10 e -25 kPa proporcionam produções economicamente mais viáveis da cana-de-açúcar, ainda que a partir de -50 kPa já ocorram reduções na produtividade da cultura. Na irrigação suplementar com turnos de irrigação curtos, pode-se adotar como critério para o início das irrigações um fator de depleção de 50% de água disponível em solos argilosos, e 75% em solos arenosos. Para valores de evapotranspiração de 3,5 mm dia⁻¹ os turnos de irrigação variam de 7 a 10 dias para solos arenosos e de 12 a 20 dias para solos argilosos.

2.3 Evapotranspiração

Evapotranspiração é definida como a perda conjunta de água no solo, pela evaporação, e na planta, através da transpiração. (VIANA; AZEVEDO, 2008). O termo evapotranspiração foi descrito por Jensen *et al.* (1990) como um processo combinado, devido a água ser transferida da superfície terrestre para atmosfera sob a forma de vapor, bem como da água interceptada pelas superfícies vegetais, somada à água transpirada pelas plantas.

Segundo Thornthwaite e Hare (1965), a evapotranspiração compreende as fases de movimento da água no perfil do solo em direção à sua superfície e a zona da absorção radicular; movimento da água no sistema radicular para a superfície das folhas; evaporação da água através da superfície do solo e dos estômatos; evaporação da água de chuva interceptada pelas folhas e remoção do vapor de água por fluxos turbulentos.

São muitos fatores que apresentam relações diretas com a evapotranspiração, entre os quais podemos citar os meteorológicos, da planta e do manejo do solo. Isto diferencia a evapotranspiração da evaporação, pois o fenômeno depende da planta e do solo, e não somente das condições meteorológicas. Do ponto de vista meteorológico podemos citar os principais fatores que influenciam a evapotranspiração: saldo de radiação, efeito advectivo, umidade relativa do ar e temperatura do ar. De acordo com Viana e Azevedo (2008), as contribuições relativas dos fatores meteorológicos para com a evapotranspiração são em média de 80 % para o saldo de radiação; 14 % para a advecção; 6 % para a umidade relativa e a temperatura do ar.

Os fatores ambientais influenciam a transpiração na medida em que alteram o gradiente de vapor d'água entre a superfície da folha e o ar que a envolve. Os principais fatores que afetam a transpiração são o balanço de energia entre o sol e a folha, a umidade e temperatura do ar, o vento e a disponibilidade hídrica do solo. (ANGELOCCI, 2002). Portanto, a transpiração intensifica-se com a diminuição da umidade relativa do ar e com o aumento da temperatura do ar.

Segundo Viana e Azevedo (2008), o poder refletor, o estágio de desenvolvimento, a profundidade do sistema radicular e a altura são fatores que interferem na evapotranspiração. Com relação ao poder refletor (albedo) quanto mais escura for a vegetação maior tende a ser a energia disponível para a evapotranspiração. Esta utilização de água do solo pela planta será também maior, quanto maior for a sua área foliar, a sua altura e o seu sistema radicular.

Segundo Nobel (1999), uma superfície úmida exposta ao ar perde tanto mais água, na forma de vapor por unidade de área e de tempo, quanto maior for o gradiente de pressão de vapor entre essa superfície e o ar, que, por sua vez, depende da temperatura ambiente. Isto é, quando a concentração de vapor d'água logo acima da superfície úmida (na camada-limite à folha, por exemplo) é maior que a do ar mais distante desta superfície. Dependendo das características físicas do solo, o mesmo pode armazenar mais ou menos água. Solos que apresentam maior quantidade de microporos possibilitam a manutenção da evapotranspiração por períodos mais longos do que os possibilitados pelos solos arenosos. É necessário ressaltar que qualquer prejuízo ocasionado às raízes por algum problema relacionado ao solo, também se torna fator limitante à evapotranspiração.

Fisiologicamente podemos classificar as plantas em determinados grupos, de acordo com a sua eficiência em fixar CO_2 e conseqüentemente controlar a entrada e a saída de gases nas mesmas por meio do mecanismo estomático. Segundo Dietrich (2001), enquanto as C_3 perdem em torno de 600 moléculas de H_2O por molécula de CO_2 fixada, as C_4 e CAM de 10 a 100 moléculas de H_2O por molécula de CO_2 fixada. Tal fato mostra que a cultura da cana-de-açúcar é bastante eficiente em termos de utilização da água.

As plantas apresentam mecanismos reguladores para controlar a perda de água e a entrada de CO_2 . Os estômatos tendem a permanecer abertos até um certo limite de água no solo. À medida que há restrição de água os estômatos vão diminuindo a sua abertura, podendo se fechar completamente. Entretanto, as espécies vegetais diferem quanto ao momento de fechamento dos estômatos, bem como em relação ao número, tamanho, espessura e geometria dos mesmos. (PIMENTEL, 2004).

Segundo Viana (2000) na fase de pós-plantio, quando a área foliar e conseqüentemente, a superfície vegetada ainda é muito pequena, a evaporação é a componente mais importante da evapotranspiração. Com o aumento da cobertura do solo pela cultura, a transpiração torna-se a componente principal, podendo ser responsável por até 90% das perdas de água por evapotranspiração.

Reichardt (1985) afirma que, qualquer cultura durante seu ciclo de desenvolvimento, consome um enorme volume de água, sendo que cerca de 98% deste volume apenas passa pela planta, perdendo-se posteriormente na atmosfera pelo processo de transpiração. Este fluxo de água é, porém, necessário para o desenvolvimento vegetal e por este motivo sua taxa deve ser mantida dentro de limites ótimos para cada cultura. A cana-de-açúcar requer uma umidade adequada durante todo o período vegetativo para obter

rendimentos máximos, porque o crescimento vegetativo da cana é diretamente proporcional a água transpirada.

Segundo Pereira *et al.* (2002), além da transpiração, deve-se avaliar a evaporação da água diretamente do solo, sendo o fenômeno regido por leis puramente físicas, no processo simultâneo chamado de evapotranspiração, que pode ser calculada ou medida. A partir de medições da evapotranspiração de referência pode-se calcular a evapotranspiração da cultura e a necessidade de irrigação para uma cultura, multiplicando o valor da evapotranspiração de referência por um coeficiente de cultivo (K_c). Os cálculos de evapotranspiração são bastante úteis para a recomendação da necessidade de irrigação e um manejo adequado. (POLJAKOFF-MAYBER; LERNER, 1994).

A evapotranspiração pode ser expressa como calor latente transferido para o ar atmosférico por unidade de área ($W\ m^{-2}$) ou a quantidade equivalente de água evapotranspirada por unidade de tempo, geralmente expressa como lâmina por unidade de tempo ($mm\ dia^{-1}$). (SAAD; SCALOPPI, 1988).

Segundo Doorenbos e Pruitt (1977), a E_{To} representa a evapotranspiração de uma cultura hipotética, crescendo ativamente, sem limitação de água e expressa o poder evaporante da atmosfera em um local e tempo específicos, não considerando as características do solo e da cultura.

Allen *et al.* (1998) recomendaram o uso da equação de Penman-Monteith com algumas simplificações, também conhecido como o método FAO Penman-Monteith, como o método padrão para estimar a E_{To} a partir de dados climáticos.

A evapotranspiração da cultura (E_{Tc}), é a evapotranspiração de uma determinada cultura livre de doenças, bem-fertilizada, plantada em extensas áreas, sob condições de umidade do solo ótimas, e alcançando produção máxima sob determinadas condições climáticas. Devido às condições de manejo da cultura aquém da ótima e as restrições ambientais que afetam o crescimento da cultura e limita a evapotranspiração, a E_{Tc} sob condições não padrão geralmente requer uma correção. (ALLEN *et al.*, 1998).

2.4 Determinação da evapotranspiração da cultura (E_{Tc})

Segundo Allen *et al.* (1998), não é fácil realizar as medidas de evapotranspiração. Existem vários métodos para se quantificar a evapotranspiração. Os métodos são de alto custo

econômico e exigentes em termos de precisão de medida e somente podem ser explorados completamente com profissionais treinados.

A evapotranspiração da cultura (ET_c) pode ser determinada por métodos diretos e indiretos, sendo os métodos diretos os que utilizam lisímetros, parcelas experimentais no campo, controle de umidade do solo e método de entrada e saída de água em grandes áreas. Dos métodos diretos, o procedimento mais preciso para determinar a ET_c é a utilização de lisímetros. Segundo Aboukhaled *et al.* (1982), por apresentar custos elevados, o uso de lisímetros tem ficado restrito à instituições de pesquisas, sendo sua utilização justificada pela possibilidade da obtenção de medidas precisas e exatas que sirvam de referência na calibração dos métodos de estimativa da ET utilizados pelos irrigantes, tais como as equações empíricas e o método do tanque classe “A”, quando instalado e operado com os devidos cuidados. (PEREIRA, 2004).

Os lisímetros têm sido utilizados por mais de três séculos para estudos das relações entre água, solo e plantas. Segundo Kirkham *et al.* (1984), os lisímetros são estruturas destinadas a medir, de maneira precisa, eventos de precipitação, evaporação e drenagem. Campeche (2002) comenta que, inicialmente, os lisímetros foram desenvolvidos para quantificação e qualificação da água do solo percolada em estudos hidrológicos.

Existem vários tipos de lisímetros (de pesagem, de drenagem, de lençol freático de nível constante e de flutuação) e sua complexidade irá variar de acordo com o seu grau de evolução tecnológica e sua precisão quanto às suas medidas. Schneider *et al.* (1998) afirmaram que os custos envolvidos para a construção desses equipamentos são determinados pelo seu tamanho, disponibilidade de material e pessoal qualificado para a montagem.

Os lisímetros equipados com mecanismos de pesagem por células de carga são os mais modernos (SILVA *et al.*, 1999) e permitem a realização de medidas automatizadas com células de carga instaladas sob a caixa impermeável. Essas células são geralmente acopladas a um sistema de aquisição de dados, fornecendo resultados mais confiáveis, e possibilitam a obtenção de medidas em escala horária, representando grande vantagem em relação aos demais tipos de lisímetros. (ALLEN *et al.*, 1991).

A medição da variação de peso em um lisímetro de pesagem é considerada uma das maneiras mais fáceis e próximas da realidade para se determinar diretamente a evapotranspiração das culturas, podendo ser utilizada para períodos de tempo menores que um dia. (HOWELL *et al.*, 1985). São vários os autores, entre eles Aboukhaled *et al.* (1982) e Howell *et al.* (1985) que afirmam que o lisímetro de pesagem é o melhor equipamento

disponível para medir com acurácia a evapotranspiração de referência e de culturas, como também para a calibração de modelos.

Os lisímetros, quando bem instalados, possibilitam medidas precisas da evapotranspiração (ET), principalmente quando os mesmos são preenchidos corretamente, pois, dessa forma, as camadas de solo no seu interior assemelham-se ao máximo possível às camadas de solo da área externa. (SILVA, 2003). No entanto, Pereira *et al.* (2002) comentam que tais estruturas se justificam apenas em condições experimentais com observações rigorosas das condições de contorno que visam a minimizar os efeitos advectivos principalmente em épocas de deficiência hídrica. Nesse sentido, os lisímetros devem ser locados de tal forma que obstáculos não alterem a radiação incidente e/ou o padrão do vento.

Dentre os principais fatores ambientais e de projeto que podem afetar as medições de evapotranspiração nos lisímetros, citam-se: os efeitos da advecção, as dimensões do lisímetro, o regime de umidade do solo no seu interior, a espessura das paredes do lisímetro e a distância entre elas, a altura de suas bordas e diferenças de densidade entre a vegetação dentro e fora do lisímetro. (ABOUKHALED *et al.*, 1982). Para reduzir os efeitos dos componentes físicos do aparelho (paredes do lisímetro) sobre a evapotranspiração medida deve-se construí-las com a menor espessura possível e reduzir ao máximo a abertura existente entre as paredes interna e externa. (HOWELL *et al.*, 1985).

Sedyama (1996) já alertava das dificuldades em se manter as condições internas e externas dos lisímetros com as mesmas características, pois, normalmente, as plantas tendem a crescer mais no interior do mesmo (efeito buquê) ou além dos limites de sua borda. Assim, visualmente, a presença do lisímetro deve ser pouco perceptível, constatando que tais efeitos se minimizem. Segundo o autor, as diferenças no crescimento das culturas no interior dos lisímetros em relação à área externa, especialmente quando as plantas crescem mais no interior, provocam perturbação maior no movimento horizontal do ar e aumentam o grau de turbulência do calor sensível do ar sobre a cultura, provocando aumento da transpiração do vegetal e maior interceptação da radiação solar incidente.

A calibração do lisímetro é uma das etapas mais importantes durante a implantação do equipamento. Calibrações mal realizadas podem provocar problemas de interpretação das leituras da evapotranspiração de referência ou da cultura, principalmente em intervalos menores de leituras. Campeche (2002) considera a calibração um dos passos mais importantes antes do funcionamento de lisímetros de pesagem em campo, que tem por finalidade estabelecer uma relação entre o sinal de saída da célula de carga (geralmente

expresso em mV) e a massa do sistema. Outra finalidade da calibração é a verificação da linearidade e histerese da célula de carga.

Campeche (2002) afirma que a calibração de dados em lisímetros de pesagem envolve erros de medidas, que são usados para qualificar os dados analisados. O mesmo autor menciona quatro tipos de erros apresentados na literatura (exatidão, precisão, sensibilidade e resolução). Segundo Bloon (1992), acurácia ou exatidão é a quantidade que a medida difere a partir de um valor verdadeiro, estatisticamente pode-se dizer que é a dispersão dos valores medidos em torno da reta 1:1, que representa os valores reais. A precisão é a repetibilidade da medida, ou seja, o grau de variabilidade de sucessivas medidas de um valor constante, pode-se dizer também que é a dispersão dos pontos em torno da média dos valores medidos. A sensibilidade é a menor variação de uma grandeza (massa, sinal elétrico, etc.) detectada que provoca uma mudança de leitura do sistema, e a resolução é a menor escala da divisão ou último dígito que pode ser lido.

O processo de calibração dos lisímetros de pesagem geralmente é feito no próprio local, após sua instalação, cobrindo-se o solo para minimizar a evapotranspiração e colocando-se quantidades conhecidas de massa sobre a superfície, enquanto são tomadas leituras da balança. (HOWELL *et al.* 1995). Em seguida, deve-se estimar o seu coeficiente de calibração através da regressão originária das variações do peso real e do peso registrado no lisímetro.

2.5 Coeficiente de cultivo (Kc)

Segundo Allen *et al.* (1998), o coeficiente da cultura K_c , é basicamente a relação entre a evapotranspiração da cultura E_{Tc} e a referência E_{To} , e representa uma integração dos efeitos de quatro características principais (altura da cultura, albedo, resistência do dossel e evaporação do solo) que distinguem a cultura da cultura de referência (grama). O K_c depende de fatores tais como as condições climáticas, tipo de cultivo, duração do ciclo, em especial da duração da fase de desenvolvimento da cultura e da frequência de irrigação.

O coeficiente de cultivo (K_c) é fundamental para o manejo adequado da irrigação ligado a uma determinada cultura. São vários os estudos relacionados à determinação deste coeficiente. A obtenção desta variável não é algo fácil de ser conseguido, pois dependerá do tempo de desenvolvimento da cultura diante dos seus vários estádios de desenvolvimento e de

equipamentos e cálculos matemáticos sofisticados que dependem de muitas variáveis meteorológicas de difícil acesso a maioria dos pesquisadores.

Durante o ciclo vegetativo da cultura, o valor do coeficiente de cultura (K_c) varia à medida que a planta cresce e se desenvolve, do mesmo modo que a fração de cobertura da superfície do solo pela vegetação varia à medida que as plantas crescem e atingem a maturação. (SILVA; AMARAL, 2008).

Segundo Leal e Sedyama (2004), a E_{To} deveria caracterizar a demanda evaporativa determinada pela condição meteorológica, enquanto o K_c seria a medida da restrição imposta pelo sistema solo-planta para atender tal demanda hídrica. Entretanto, algumas pesquisas têm demonstrado que a evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) não pode ser, simplesmente, estabelecida para todas as situações climáticas com um simples valor de K_c . Os coeficientes de culturas devem ser, portanto, determinados para cada estágio de desenvolvimento da cultura e em diferentes condições climáticas.

Uma vez que a evapotranspiração de referência (E_{To}) representa um índice climático da demanda evaporativa, o K_c varia, essencialmente, de acordo com as características da cultura, traduzindo, em menor escala, a variação dos elementos climáticos (FREVERT *et al.*, 1983). Esse fato possibilita a transferência de valores de K_c de um local para outro e de um clima para outro. O coeficiente de cultura pode variar de acordo com a textura e o teor de umidade do solo, com a profundidade e densidade radicular e com as características fenológicas da planta.

Allen *et al.* (1998) apresentaram valores de K_c para diferentes culturas. Esses valores foram baseados em pesquisas desenvolvidas em diferentes regiões do mundo, porém, sabe-se que os valores de K_c variam de acordo com as condições edafoclimáticas, assim como com a cultivar ou com a variedade empregada. Doorembos e Pruitt (1977) enfatizam que há necessidade de calibração do K_c para as condições locais.

Muitas vezes, é desejável se ter meios para relacionar o K_c mais diretamente ao estágio de desenvolvimento da cultura, em lugar do tempo percentual, ou tempo decorrido, para normalizar o K_c . Alguns parâmetros relacionados ao clima, como graus-dia para o crescimento, unidade solar termal e E_{To} acumulada podem, também, ser utilizados em lugar do tempo decorrido, o qual é, normalmente utilizado para estimar a duração dos estágios fenológicos associados aos coeficientes de culturas. Os critérios mais recomendados são: a) graus dias acumulados (GDA), em que não são consideradas as variações no crescimento e no desenvolvimento da planta, que ocorrem em função de diferenças na temperatura, da estação de crescimento, duração da maturação e datas de plantio; b) estágio de crescimento observado

(EC), que possibilita ajustar o K_c para condições anormais, ocorridas durante a fase de crescimento; e c) tempo transcorrido depois do plantio, ou emergência das plantas, ou dias depois do plantio (DDP). (LEAL; SEDIYAMA, 2004).

Doorenbos e Kassam (1994) apresentaram valores de K_c para o ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar de acordo com a cobertura do solo pela cultura (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores de K_c para cana- planta

| Período de desenvolvimento | Dias do ciclo | Coefficiente de cultura (K_c) |
|-----------------------------------|----------------------|---|
| Do plantio até 25% de cobertura | 30 a 60 dias | 0,40 a 0,60 |
| De 25 a 50% de cobertura | 30 a 40 dias | 0,75 a 0,85 |
| De 50 a 75% de cobertura | 15 a 25 dias | 0,90 a 1,00 |
| De 75 a cobertura completa | 45 a 55 dias | 1,00 a 1,20 |
| Utilização máxima | 180 a 330 dias | 1,05 a 1,30 |
| Início de senescência | 30 a 150 dias | 0,80 a 1,05 |
| Maturação | 30 a 60 dias | 0,60 a 0,75 |

Fonte: Doorenbos e Kassam (1994).

Segundo Allen *et al.* (1998), as variações do K_c durante o período de crescimento da cana-de-açúcar podem ser representadas na curva do coeficiente da cultura. Os mesmos autores afirmam que são necessários somente três valores de K_c para descrever e construir a curva do coeficiente de cultura: estágio inicial ($K_{c_{ini}}$), estágio de intermediário ($K_{c_{med}}$) e estágio final ($K_{c_{fim}}$).

Allen *et al.* (1998) apresentam um procedimento para obtenção do K_c para cada estágio de desenvolvimento da cultura, onde os dados de K_c são obtidos por meio de uma curva suavizada, denominada curva de K_c da cultura (Figura 2). Segundo os mesmos autores as fases podem ser divididas em estágio inicial, de desenvolvimento vegetativo, intermediário e final. O primeiro estágio começa no plantio até aproximadamente 10% da cobertura vegetal. O segundo estágio compreende uma cobertura do solo de 10% a cobertura completa, podendo considerar uma cobertura completa a partir de 70% de cobertura do solo pelas folhas da cultura (altura maior que 0,5 m). O terceiro estágio ocorre da cobertura completa efetiva ao começo da maturação que é indicado freqüentemente pelo começo do envelhecimento, amarelecimento ou senescência das folhas, queda da folha, ou o douramento da fruta de acordo com o grau que a evapotranspiração da cultura é reduzida em relação à E_{To} . O quarto estágio ocorre desde o começo da maturação até a colheita ou senescência completa.

Logo após a brotação, o valor do K_c é pequeno, freqüentemente menor que 0,4. O K_c começa a aumentar do valor do K_c inicial no começo do crescimento da planta. O K_c cresce rapidamente e alcança um valor máximo, K_c médio, no tempo máximo ou próximo do crescimento da planta máximo. Durante o estágio final, quando as folhas começam a envelhecer e senescer devido a práticas culturais ou naturalmente, o K_c começa a diminuir até que alcança o mais baixo valor ao término do período final de crescimento (K_c final). (ALLEN *et al.*, 1998).

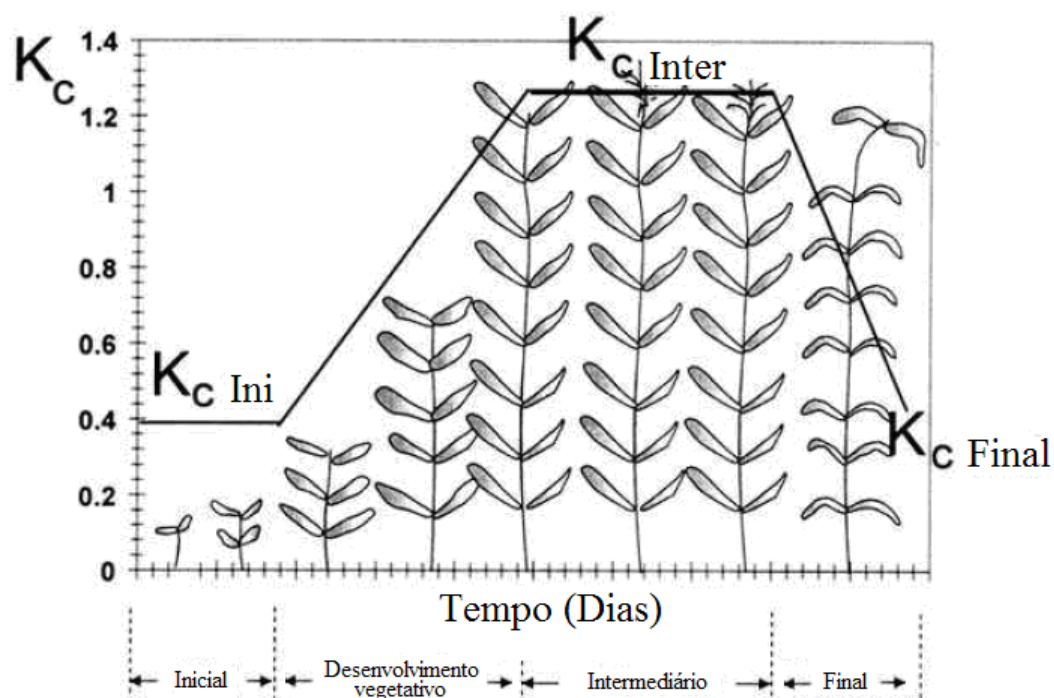


Figura 2 – Curva do coeficiente da cultura generalizada para aproximação do coeficiente de cultura único. (ALLEN *et al.*, 1998).

Souza *et al.* (1999) determinaram a evapotranspiração da cultura (ET_c) da cana-de-açúcar (cana planta) irrigada por sistema de irrigação tipo canhão (*point source*) na região Norte do Rio de Janeiro, dividindo-se o ciclo da cultura de doze meses em quatro estádios de desenvolvimento. Os estádios, com os respectivos valores de K_c , foram divididos da seguinte forma: germinação e emergência ($K_c=0,60$), perfilhamento e estabelecimento da cultura ($K_c=0,99$), desenvolvimento da cultura ($K_c= 1,10$) e maturação ($K_c=0,62$).

Segundo Pereira *et al.* (2008), de maneira geral, os trabalhos relacionados a determinação de coeficientes de cultivo desenvolvidos em condições brasileiras são realizados

de maneira criteriosa, porém, alguns procedimentos de pesquisa e de apresentação dos resultados dificultam a formação de uma base de dados de Kc com critérios abrangentes, que sigam uma mesma metodologia.

Segundo os mesmos autores, são encontrados na literatura grande número de trabalhos sobre coeficientes de cultivo referentes a uma mesma cultura, entretanto, observa-se que a maioria dos trabalhos envolvem culturas de ciclo curto, como feijão (25,8% do total) e milho (12,9% do total), indicando a necessidade de pesquisas envolvendo um maior número de culturas em condições brasileiras.

2.6 Irrigação localizada subsuperficial e a eficiência de uso da água

A técnica de irrigação por gotejamento surgiu em Israel, principalmente devido à escassez de recursos hídricos. (MANFRINATO, 1985). A irrigação por gotejamento tem se desenvolvido rapidamente desde os anos 60 com o advento das modernas indústrias de plástico.

A dificuldade relacionada à aquisição de água de boa qualidade e a indisponibilidade de recursos hídricos em grande quantidade torna imprescindível o uso da água de forma mais eficiente na irrigação de cultivos. Como consequência tem-se desenvolvido novos sistemas de gotejamento para adaptar-se a estas novas situações (JUAN, 2000). O sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial é definido por Azevedo (1986) e Keller e Bliesner (1990) como um sistema de irrigação que tem o solo como meio de propagação da água, no qual os emissores ficam sob a superfície do solo próximo ao sistema radicular.

Vários autores relatam as grandes vantagens do sistema de irrigação subsuperficial, Dasberg e Bresler (1985); Keller e Bliesner (1990); Tallens (1994); Ayars *et al.* (1999) e Juan (2000). De acordo com esses autores o sistema de irrigação apresenta a possibilidade do uso do mesmo sistema para diferentes culturas; redução do total de água requerida; melhor aproveitamento de água e nutrientes devido à aplicação diretamente na zona de maior massa radicular das plantas; redução da evaporação de água, da população de plantas daninhas e do acúmulo de sais na superfície devido à manutenção de 15-20 cm de solo seco na superfície; menor interferência em tratos culturais (capinas, pulverizações etc.) e na colheita das culturas; redução de danos mecânicos ao sistema de irrigação; percolações

desprezíveis de água e sais solúveis abaixo da zona radicular; sistema radicular mais profundo e menores perdas de nitrato abaixo da zona radicular; eliminação do problema de crostas superficiais impermeabilizantes do terreno, e de escoamento superficial, com aumento da uniformidade de infiltração; menor incidência de doenças por evitar o contato da água com as folhas.

O sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial também apresenta alguns problemas. A principal limitação desse sistema geralmente é relacionada ao estabelecimento inicial da cultura. Por não umedecer a superfície do solo, o sistema não proporciona condições satisfatórias de umidade para a germinação de sementes ou pegamento de mudas. Portanto, é necessário o uso de um segundo sistema de irrigação na fase inicial, freqüentemente por aspersão, o que aumenta os custos e reduz o retorno econômico. (CAMP, 1998; PAVERO, 2002; GUSHIKEN, 1995).

Vários autores relatam a eficiência do uso da água utilizando irrigação subsuperficial. Segundo Phene *et al.* (1992), a evaporação do solo, a percolação e o escoamento superficial são minimizados com a utilização desse sistema, maximizando o uso eficiente da água. Estudos mostram que para uma mesma quantidade de água aplicada, um sistema de irrigação subsuperficial apresenta uma área de interface de umedecimento maior, em relação à utilização de um sistema de irrigação por gotejamento superficial. (PHENE *et al.*, 1990).

A irrigação por gotejamento subsuperficial é utilizada em diversas culturas, tais como cana-de-açúcar, algodão, melão, batata e numerosas hortaliças, comprovando-se que aumenta a produção e a qualidade, diminui os custos de produção e se adapta bem a uma ampla variedade de climas e solos. (BUCKS *et al.*, 1981; DASBERG; BRESLER, 1985; JUAN, 2000).

De acordo com Gornat e Nogueira (2003), o interesse por esse sistema cresce devido ao aumento de produção, da eficiência do uso da água e dos nutrientes. Entretanto, ainda não foi pesquisado de forma abrangente e detalhada, apesar de já haver milhares de hectares irrigados com esse tipo de sistema.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área experimental

O experimento foi conduzido no Campo Experimental do Curu, pertencente à Embrapa Agroindústria Tropical, localizado no Perímetro Irrigado Curu-Paraipaba, município de Paraipaba-CE. O local tem como coordenadas geográficas: 03° 29' 20'' latitude Sul, 39° 09' 45'' Oeste e altitude de 30 m.

O local apresenta relevo plano, com solo de textura arenosa (89% de areia, 3% de silte e 8% de argila, na profundidade de 0 a 0,6 m), profundo, bem drenado, sendo classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos como Neossolo Quartzarênico. (EMBRAPA, 1999).

O clima é classificado de acordo com Koopen como Aw', tropical chuvoso, com médias anuais de precipitação de 998 mm, período chuvoso de janeiro a junho, ocorrendo máxima precipitação de janeiro a maio, período seco de julho a dezembro, e com médias anuais de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento de 26,7 °C, 71 % e 2,9 m s⁻¹, respectivamente.

3.2 Plantio e instalação da cultura

O experimento foi realizado em uma área de 0,738 ha (102,6 m x 72 m). Antes da instalação da cultura foi realizada uma análise de solo, cujos resultados são apresentados na Tabela 2. Cerca de cinco meses antes do plantio foi realizada a aplicação de 1,0 t ha⁻¹ de calcário, seguida de uma aração profunda e de uma gradagem. No plantio, realizou-se outra gradagem, visando à eliminação de plantas daninhas.

Após a gradagem fez-se o sulcamento, utilizando-se um sulcador com capacidade para realizar simultaneamente quatro operações: sulcamento, adubação, instalação da linha gotejadora e fechamento dos sulcos (Figura 3). Os sulcos de plantio foram abertos no espaçamento de 1,8 m entre fileiras duplas e 0,4 m entre linhas dentro da fileira dupla (Figura

4). Na adubação de fundação foram aplicados 1.200 kg ha⁻¹ de superfosfato simples (20% P₂O₅), ou seja, 240 kg ha⁻¹ de fósforo.

Tabela 2 - Análise química do solo da área experimental, realizada em abril de 2008. Paraipaba-CE

| Parâmetros | Valor | Unidades |
|-------------------|--------------|------------------------|
| H + Al | 15,6 | mmolc dm ⁻³ |
| pH | 5,4 | |
| K | 1,63 | mmolc dm ⁻³ |
| Ca | 29 | mmolc dm ⁻³ |
| Mg | 8 | mmolc dm ⁻³ |
| Al | <1 | mmolc dm ⁻³ |
| S.B. | 46,7 | mmolc dm ⁻³ |
| CTC | 62,3 | mmolc dm ⁻³ |
| V% | 75 | % |
| Cu | <0,1 | mg dm ⁻³ |
| Fe | 19 | mg dm ⁻³ |
| Mn | 8,1 | mg dm ⁻³ |
| Zn | 1,4 | mg dm ⁻³ |
| M.O. | 16,2 | g dm ⁻³ |
| Na | 7,9 | mmolc dm ⁻³ |



Figura 3 – Sulcador utilizado nas operações de sulcamento, adubação de plantio e instalação das linhas gotejadoras.

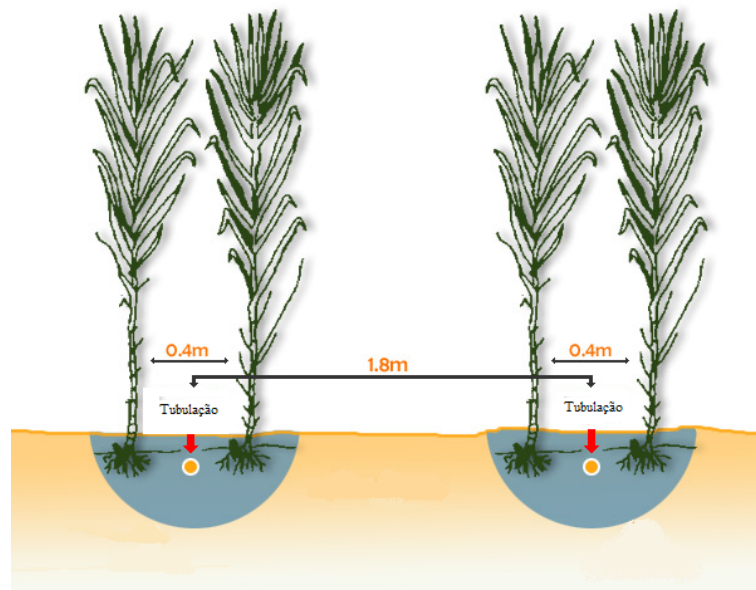


Figura 4 – Ilustração do espaçamento entre as fileiras duplas e as laterais do sistema de irrigação.

O plantio da cana foi realizado no período de 11 a 15 de julho de 2008. Foi utilizada a variedade de cana-de-açúcar SP6949, com densidade de plantio de 12 gemas por metro linear de sulco e profundidade de plantio de 0,20 m. Foram utilizados colmos com 10 a

12 meses de idade, que foram colocados no fundo do sulco, sempre cruzando o final do colmo anterior com a extremidade inferior do seguinte e picados, deixando-se aproximadamente três gemas por colmo. Em seguida, os colmos foram cobertos com uma camada de terra de 0,07 m.

Nos primeiros 18 dias após o plantio (DAP) a cultura foi irrigada por aspersão, visando garantir uma germinação uniforme. A partir daí a cultura foi irrigada por gotejamento subsuperficial.

Na Figura 5 é apresentado o croqui da área experimental. O sistema de irrigação foi constituído de mangueiras gotejadoras da modelo Netafim DripNet PC™ AS, com uma linha lateral para cada fileira dupla, enterrada na profundidade de 0,15 m e emissores autocompensantes espaçados de 0,5 m na linha (Figura 6). Cada emissor apresentava uma vazão média de 1 L h^{-1} .

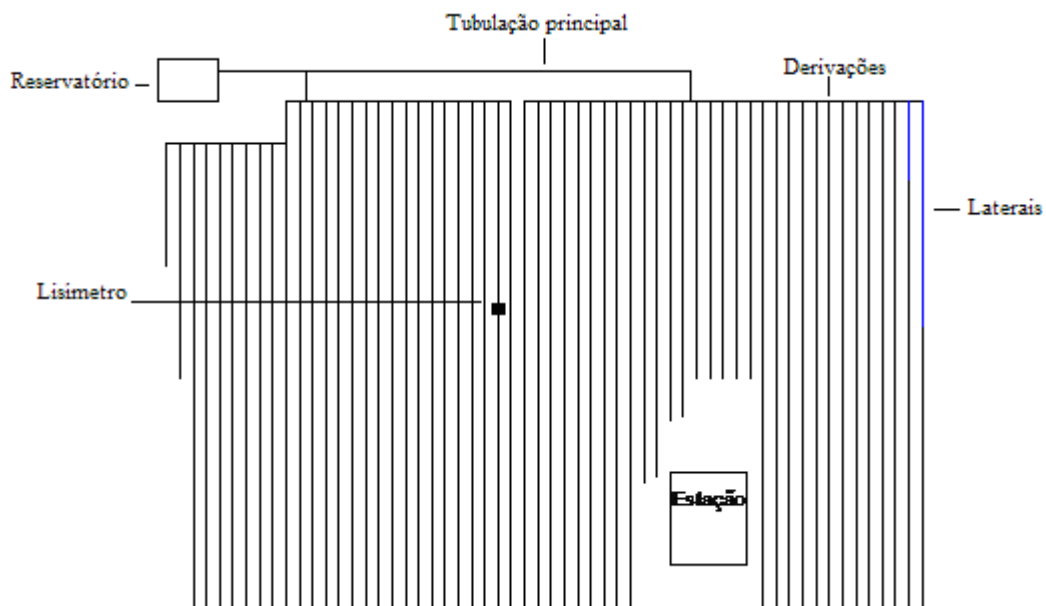


Figura 5 - Disposição do sistema de irrigação no campo.



Figura 6 – Vista da superfície do solo e dos bulbos molhados formados pelos gotejadores ao longo da lateral.

Foram realizadas limpezas no sistema de irrigação a cada dois meses, para evitar problemas de entupimento. A lavagem da tubulação era feita durante o dia para que se pudesse verificar a integridade do sistema e consertar eventuais cortes no mesmo.

3.3 Tratos culturais e condução da cultura

Ao longo do desenvolvimento da cultura, foram realizados: controle de ervas daninhas, fertirrigação e vigilância fitossanitária. No controle das ervas daninhas foram realizadas a aplicação dos herbicidas Gesapax ($4,0 \text{ L ha}^{-1}$) e 2,4-D ($2,0 \text{ L ha}^{-1}$) em pós-emergência (20 DAP) e duas capinas manuais, uma aos 51 DAP e outra aos 111 DAP dias após o plantio. Após a primeira capina foi realizada uma aplicação do inseticida Lanate[®] (Inseticida Carbamato), com composição S-metil-N (Metilcarbomoil) e Tioacetimidato (Methomyl), para o controle da broca da cana, *Diatraea saccharalis*.

A partir dos 18 DAP foram realizadas fertirrigações com frequência de três vezes por semana, segundo as quantidades apresentadas na Tabela 3. Para aplicação dos fertilizantes utilizou-se uma bomba dosadora proporcional, marca Tefen, modelo MixRite® 12504.

Tabela 3 - Doses de nutrientes aplicados via fertirrigação na cana-de-açúcar

| Mês | N | K | Zn | S | B | Cu |
|---------------------|--------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|
| kg ha ⁻¹ | | | | | | |
| Agosto/2008 | 9,9 | 6,0 | 1,0 | 0,8 | 0,0 | 0,65 |
| Setembro/2008 | 9,9 | 6,0 | 1,0 | 0,8 | 0,0 | 0,65 |
| Outubro/2008 | 11,7 | 7,2 | 1,0 | 0,8 | 0,0 | 0,65 |
| Novembro/2008 | 11,7 | 7,2 | 1,0 | 0,8 | 0,0 | 0,65 |
| Dezembro/2008 | 14,4 | 9,0 | 1,0 | 0,8 | 0,0 | 0,65 |
| Janeiro/2009 | 32,4 | 9,0 | 1,0 | 0,8 | 0,17 | 0,65 |
| Fevereiro/2009 | 32,4 | 12,0 | 1,0 | 0,8 | 0,17 | 0,65 |
| TOTAL | 122,4 | 56,4 | 7,0 | 5,6 | 0,34 | 4,55 |

Como fontes de nutrientes, foram utilizados os seguintes fertilizantes: uréia (45% N), KCl (60 % K₂O), ZnSO₄ (20 % Zn, 16 % S) , H₃BO₃ (17 % B) e CuSO₄ (13 % Cu, 16 % S).

Aos 120 DAP realizou-se uma análise foliar para ajuste no programa de fertirrigação, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise foliar da cana-de-açúcar realizada em novembro de 2008

| Nutriente | Unid | Valor observado | Nível crítico |
|-----------|---------------------|-----------------|---------------|
| N | g kg ⁻¹ | 16,2 | 18-25 |
| P | g kg ⁻¹ | 1,5 | 1,5-3 |
| K | g kg ⁻¹ | 12,5 | 10-16 |
| Ca | g kg ⁻¹ | 2,7 | 2-8 |
| MG | g kg ⁻¹ | 9,9 | 1-3 |
| Na | g kg ⁻¹ | 0,8 | |
| S | g kg ⁻¹ | 2,1 | 1,5-3 |
| Cu | mg kg ⁻¹ | 54,7 | 6-15 |
| Fé | mg kg ⁻¹ | 26,5 | 40-250 |
| Zn | mg kg ⁻¹ | 14,2 | 10-50 |
| Mn | mg kg ⁻¹ | 119,7 | 25-250 |

3.4 Manejo da irrigação

As irrigações foram realizadas diariamente de acordo com a evapotranspiração da cultura (ET_c) e o potencial de água no solo. A ET_c foi quantificada a partir do lisímetro de pesagem. O tempo de irrigação a ser aplicado foi calculado de acordo com a Equação 1. Na lateral que passava sobre o lisímetro foi instalado um hidrômetro para medir o volume e consequentemente, a lâmina de água aplicada.

$$T_{Irrigação} = \frac{ET_c \times A}{Q} \quad (1)$$

Em que, T é o tempo de irrigação, em horas, ET_c é a evapotranspiração da cultura, em mm , A é a área irrigada por gotejador (1,8 m x 0,5 m), em m^2 e Q é a vazão do gotejador, em $L h^{-1}$.

No manejo da irrigação procurou-se manter o potencial da água do solo na zona radicular entre o potencial na capacidade de campo (-8 kPa) e um potencial mínimo de -20 kPa. Para o monitoramento do potencial da água no solo foram instaladas em dois pontos representativos da área duas estações Watermark Monitor[®] (Figura 7). Cada estação possuía seis sensores de potencial da água no solo de matriz granular modelo Watermark[®] 200SS (Figura 8) e um sensor de temperatura para a correção das leituras de resistência elétrica. Em cada local foram instalados três sensores de potencial na profundidade de 0,20 m e três sensores na profundidade de 0,5 m a uma distância lateral de 0,25 m dos gotejadores. Os sensores de temperatura foram instalados na profundidade de 0,20 m. Antes da instalação, para acelerar o tempo de resposta dos sensores, os mesmos foram saturados em água por trinta minutos e postos para secar durante aproximadamente oito horas.



Figura 7 – Estação utilizada no monitoramento do potencial da água do solo.



Figura 8 - Sensores watermark[®] utilizados no monitoramento do potencial da água do solo.

3.5 Determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c)

Na determinação da ET_c utilizou-se um lisímetro de pesagem, descrito por Miranda *et al.* (1999), constituído por duas caixas metálicas, sendo a caixa interna apoiada sobre uma balança eletrônica (Figura 9). As dimensões da caixa interna do lisímetro foram de 1,50 m por 1,50 m de largura e 1,00 m de profundidade.

Para minimizar os efeitos das paredes do lisímetro na evapotranspiração as caixas foram construídas com chapa de aço de 1/4" (0,006 m) de espessura, contando com barras de reforço soldadas interna e externamente. A caixa externa é dividida em duas partes, sendo que

na parte de baixo a distância entre suas paredes e as da caixa interna é de 0,075 m e na parte do topo esta distância é reduzida para apenas 0,025 m, enquanto o topo de ambas as caixas está situado cerca de 5 cm acima da superfície do solo circundante. (MIRANDA *et al.*, 1999).

A balança utilizada é eletrônica, tipo plataforma (modelo DS6060-10, Weigh-Tronix, Inc., Fairmont, EUA) e possui capacidade de pesagem de 4,54 Mg. O sinal de excitação da balança e as medições da resposta são realizados por um microprocessador eletrônico tipo datalogger, modelo 21X (Campbell Scientific, Inc., Logan, EUA).

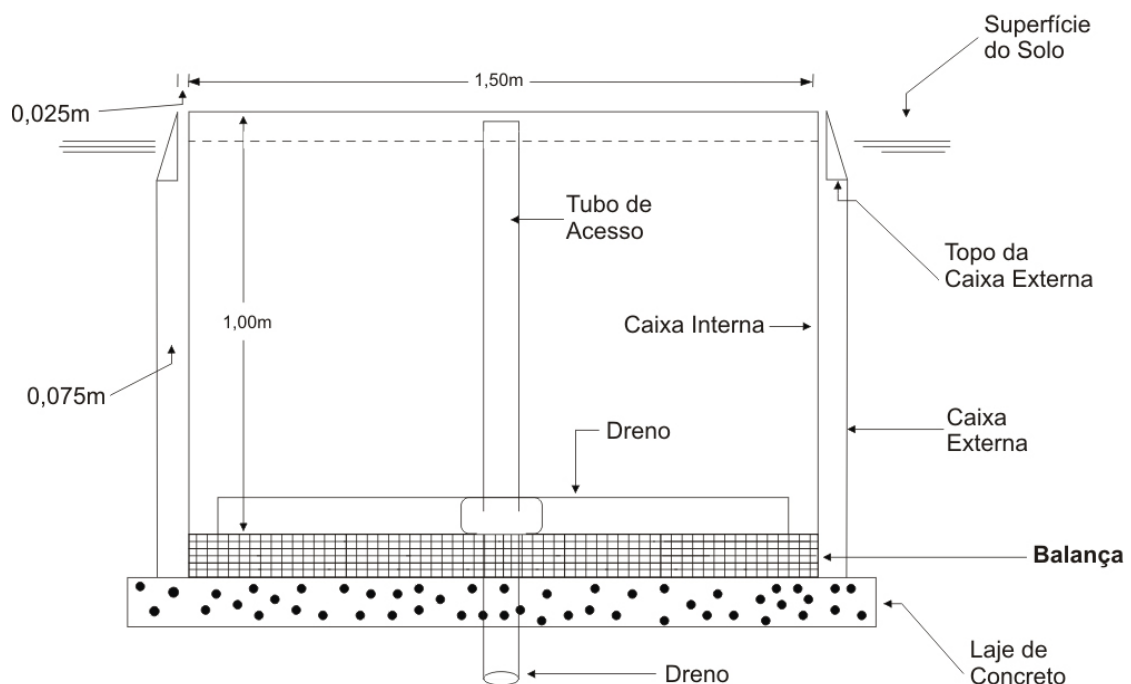


Figura 9 - Lisímetro de pesagem utilizado para medir a ETC da cana-de-açúcar.

Antes do plantio o lisímetro de pesagem foi calibrado conforme a metodologia utilizada por Miranda *et al.* (1999). Na calibração foram utilizadas como massas-padrão, 160 sacos plásticos contendo, cada um, 1000 g de areia, os quais foram pesados em uma balança eletrônica de precisão e vedados. Sendo as dimensões internas do lisímetro 1,485 m por 1,485 m (área interna de 2,205 m²), cada 1000 g colocados sobre sua superfície correspondiam a uma lâmina de 0,453 mm de água, enquanto os 160 kg correspondiam a uma lâmina d'água aproximada de 72,54 mm.

Durante a calibração ajustou-se o datalogger para a realização das leituras a cada 15 segundos. Para evitar a evaporação, a superfície do lisímetro foi coberta com duas lonas de

polietileno sobrepostas. As massas-padrão foram colocadas e retiradas do lisímetro em séries de 4 kg. Para cada série foram realizadas cinco leituras da balança através do datalogger, em mV; em seguida, para testar a sensibilidade do lisímetro, o procedimento foi repetido utilizando-se massas-padrão de 200 g (equivalente a uma lâmina de 0,09 mm).

A exatidão do equipamento foi determinada por meio do erro padrão, que foi a dispersão dos valores de massa mensurados pelo lisímetro em relação aos valores das massas-padrão (sacos de areia). A precisão foi determinada por meio do coeficiente de determinação (r^2) obtido pela regressão linear proveniente das leituras do equipamento. A sensibilidade foi determinada a partir da menor variação de massa ou sinal elétrico detectada pelo lisímetro.

A evapotranspiração diária da cultura (ETc) foi calculada pela diferença das leituras do lisímetro entre as 4h e as 23h de cada dia, fora do horário previsto para as irrigações, sendo resultado dividido pela área do lisímetro. Foram descartados os dias que ocorreram precipitações no local do experimento.

3.6 Determinação da evapotranspiração de referência (ETo)

Os dados necessários para a estimativa da ETo foram obtidos em uma estação meteorológica automática constituída de um datalogger modelo 21X (Campbell Scientific, Inc., Logan, EUA) e sensores de temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento a 2 m de altura e precipitação (Figura 10).

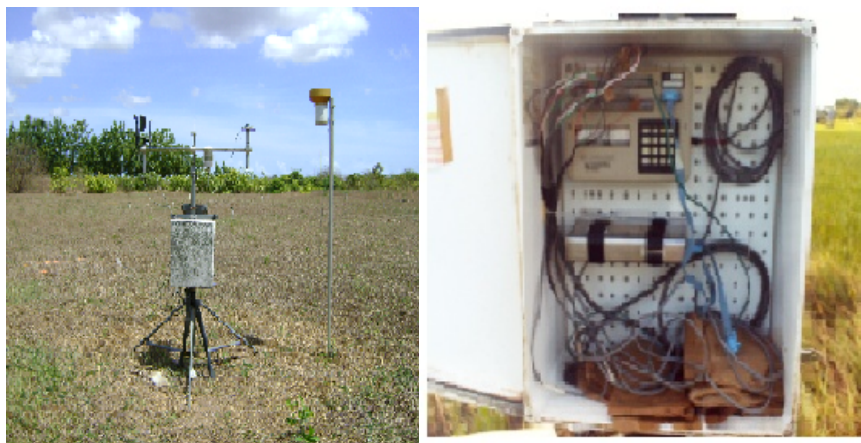


Figura 10 - Estação climatológica automática utilizada para a medição e armazenamento de dados meteorológicos.

O sistema de aquisição de dados foi programado para realizar as leituras do lisímetro de pesagem e dos sensores meteorológicos a cada 60 segundos e para armazenar as médias ou totais a cada 60 minutos em um módulo de armazenamento de dados. Os dados armazenados no datalogger foram baixados para um computador portátil a cada sete dias.

A evapotranspiração de referência (ET_o) diária foi estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO (ET_oPM), de acordo com:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (2)$$

em que: Rn e G têm as mesmas unidades ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T é a temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$); U_2 é a velocidade média do vento medida a 2 m (m s^{-1}); 0,408 corresponde a $1/\lambda$ sendo λ o calor latente de evaporação da água igual a $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ a 20°C ; 900 é um coeficiente gerado para a condição de uma cultura de referência ($\text{kJ}^{-1} \text{ kg K d}^{-1}$), que envolve os valores constantes da equação.

3.7 Determinação do coeficiente de cultivo (K_c) da cana-de-açúcar

O Coeficiente de cultivo (K_c) da cana foi obtido por meio do quociente entre a evapotranspiração da cultura (ET_c), em mm dia^{-1} e a evapotranspiração de referência (ET_o), mm dia^{-1} . O mesmo foi calculado para cada dia do ciclo da cultura através da Equação 3:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o}$$

Para efeito do cálculo dos coeficientes de cultivo médios, o ciclo da cultura foi dividido em quatro fases fenológicas, definidas de acordo com Allen *et al.* (1998): I) fase inicial; II) fase de crescimento vegetativo; III) fase intermediária; IV) fase final.

Para a determinação das fases de acordo com a metodologia apresentada por Allen *et al.* (1998), a porcentagem de cobertura vegetal da cana no lisímetro de pesagem foi determinada semanalmente, utilizando imagens digitais (Figura 11), tomadas de uma torre de 3 m de altura, instalada acima do lisímetro. A determinação da área de cobertura vegetal foi realizada utilizando o programa SIARCS[®] – Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo.



Figura 11 - Imagem da cobertura vegetal da cultura da cana-de-açúcar no lisímetro de pesagem.

3.8 Colheita

Para determinar o ponto de maturação da cana-de-açúcar, utilizou-se um refratômetro de campo, aparelho que fornece a porcentagem de sólidos solúveis do caldo (brix), que está ligado ao teor de sacarose da cana-de-açúcar. A determinação da maturação da cana-de-açúcar se deu coletando amostras da base do colmo ao seu ápice. A planta imatura apresenta uma grande diferença nos teores de sacarose entre os extremos de seus colmos. Portanto, o critério utilizado para estimar a maturação pelo refratômetro de campo foi o índice de maturação (IM), que fornece a relação entre os dois teores, conforme a Equação 4.

$$I.M = \frac{\text{BRIX_DO_EXTREMO_SUPERIOR_DO_COLMO}}{\text{BRIX_DO_EXTREMO_INFERIOR_DO_COLMO}}$$

Para a cana-de-açúcar os valores admitidos são:

- Menor que 0,60 para cana verde;
- Entre 0,60 e 0,85 para cana em processo de maturação;
- Entre 0,85 e 1,0 para cana madura; e
- Maior que 1,0 para cana em processo de declínio de sacarose.

A colheita da cana foi realizada de forma manual, sem queima em 22 de setembro de 2009 (435 DAP). Para determinação da produtividade da cana, foram colhidos e pesados separadamente os colmos produzidos na superfície do lisímetro e de cinco áreas amostrais de 18 m² (10 m x 1,8 m), escolhidas de forma aleatória.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características climáticas do local e potencial de água no solo

Na Tabela 5 são mostradas as médias meteorológicas mensais observadas durante a realização do experimento. No período de 15 meses, a precipitação total foi de 2.110,3 mm, com valores maiores no primeiro semestre de 2009 (2.092 mm). Esse excesso de chuvas provocou uma redução da irrigação no período de janeiro a setembro de 2009.

Tabela 5 - Médias meteorológicas mensais observadas durante a realização do experimento, Paraipaba-CE, 2008-2009

| Mês/Ano | Temperatura Máxima (°C) | Temperatura Mínima (°C) | Umidade Relativa do Ar (%) | Radiação Solar incidente (MJ m ⁻² d ⁻¹) | Velocidade do Vento (Km d ⁻¹) | Precipitação (mm) | ET _o (mm d ⁻¹) |
|----------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|--|---|-------------------|---------------------------------------|
| Julho/2008 | 31,2 | 21,8 | 68,3 | 17,6 | 173,6 | 0,0 | 4,1 |
| Agosto/2008 | 31,2 | 21,7 | 67,8 | 21,7 | 169,1 | 16,0 | 4,9 |
| Setembro/2008 | 32,4 | 22,6 | 65,5 | 23,3 | 188,9 | 0,0 | 5,5 |
| Outubro/2008 | 32,7 | 23,6 | 64,0 | 24,3 | 210,3 | 2,1 | 6,0 |
| Novembro/2008 | 32,2 | 23,1 | 67,1 | 23,3 | 152,3 | 0,0 | 5,3 |
| Dezembro/2008 | 32,2 | 23,3 | 61,3 | 20,9 | 146,3 | 0,0 | 5,1 |
| Janeiro/2009 | 32,0 | 23,7 | 67,1 | 19,4 | 137,6 | 246,2 | 5,2 |
| Fevereiro/2009 | 30,3 | 23,2 | 74,2 | 15,1 | 116,4 | 241,4 | 3,4 |
| Março/2009 | 29,3 | 23,1 | 82,4 | 12,8 | 68,1 | 570,2 | 2,9 |
| Abril/2009 | 29,8 | 23,1 | 82,5 | 13,0 | 61,4 | 438,5 | 2,9 |
| Mai/2009 | 29,5 | 23,2 | 81,2 | 11,1 | 54,9 | 297,9 | 2,5 |
| Junho/2009 | 30,2 | 22,5 | 80,5 | 14,3 | 95,1 | 189,6 | 3,1 |
| Julho/2009 | 29,9 | 21,8 | 78,5 | 15,2 | 106,4 | 108,4 | 3,3 |
| Agosto/2009 | 30,8 | 21,6 | 72,1 | 18,8 | 147,5 | 0,0 | 4,2 |
| Setembro/2009 | 31,8 | 22,6 | 64,9 | 21,7 | 195,6 | 0,0 | 5,2 |

Nas Figuras 12 e 13 observaram-se as variações do potencial da água do solo durante o experimento. Nota-se que durante a fase de desenvolvimento da cana-de-açúcar (até janeiro/2009) o potencial da água no solo variou entre 0 e -20 kPa, ou seja, a cultura não foi submetida a estresse hídrico. Scardua e Rosenfeld (1987) observaram que potenciais de água no solo menos negativos que -50 kPa, durante a fase de desenvolvimento, não ocasionam reduções na produtividade da cultura da cana-de-açúcar.

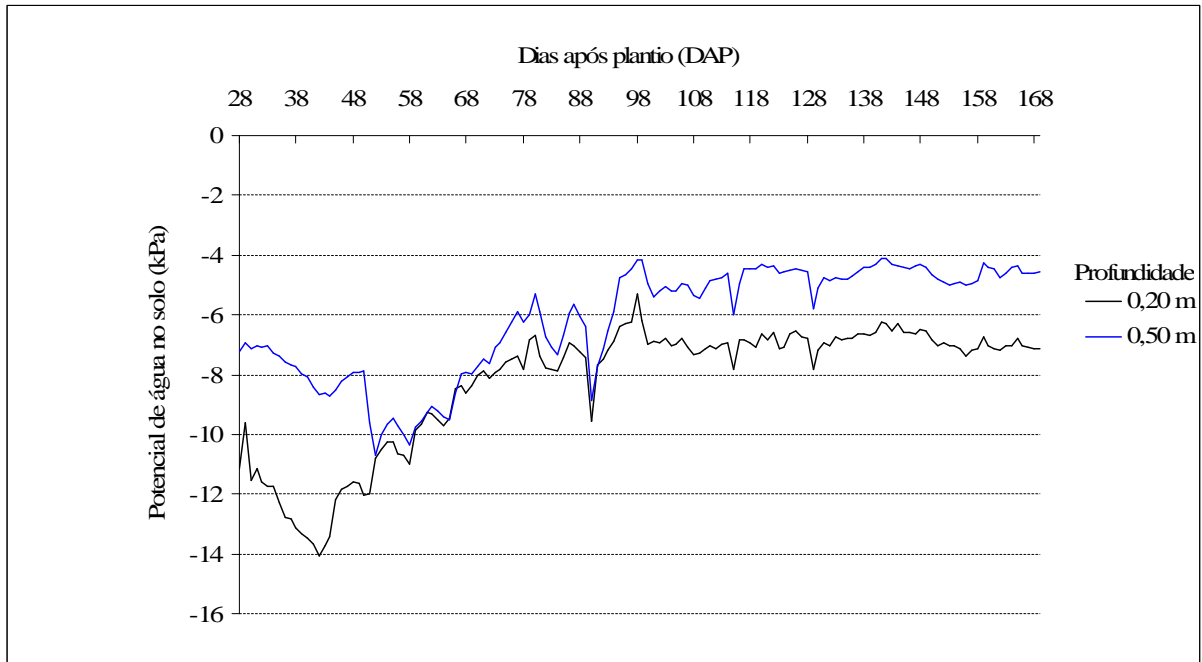


Figura 12 - Variação do potencial da água no solo (kPa) nas profundidades 0,20 e 0,50 m no período de 12 de agosto de 2008 a 31 de dezembro de 2008.

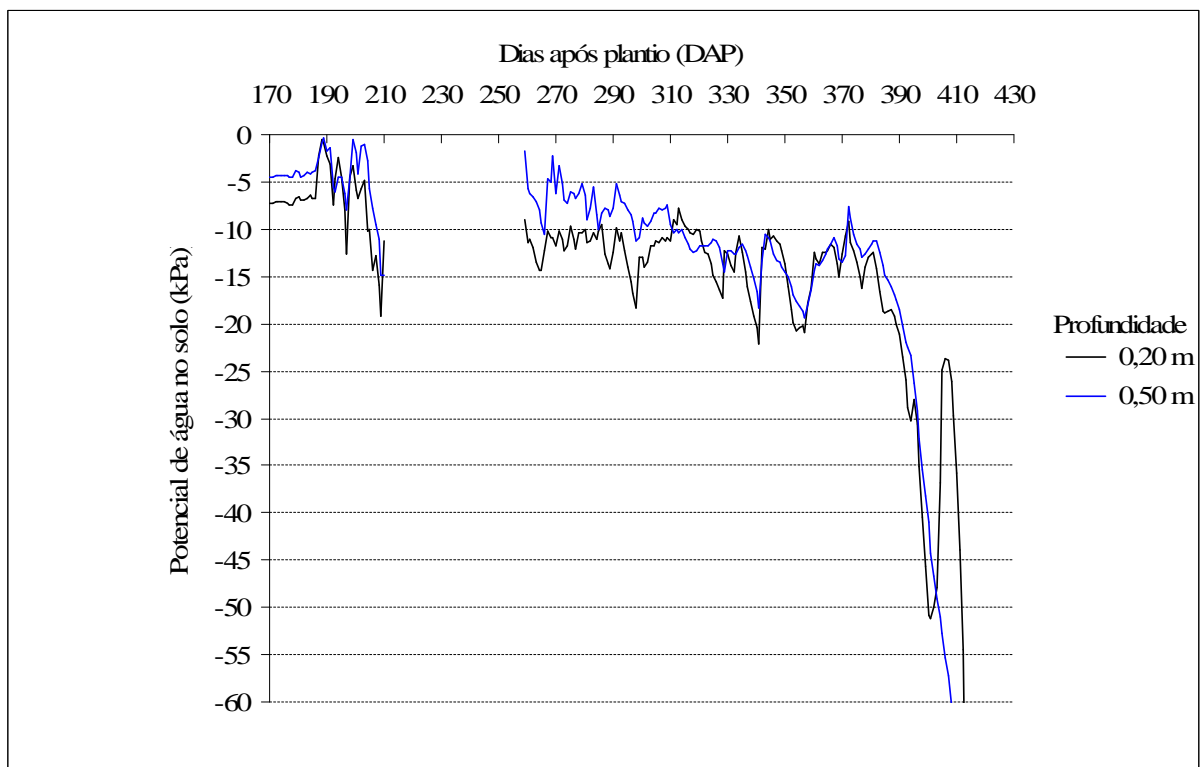


Figura 13 - Variação do potencial da água no solo nas profundidades 0,20 e 0,50 m no período de 1 de janeiro de 2009 a 16 de agosto de 2009.

No período de 210 a 259 DAP não foi possível coletar os dados de potencial de água no solo, pois as estações de monitoramento apresentaram problemas. Os valores do potencial de água no solo alcançaram valores menores que -20 kPa somente no período entre 340 DAP e 427 DAP, período de maturação da cultura, em que as irrigações foram suspensas e as precipitações já mostravam-se menos intensas (final da estação chuvosa).

Segundo Doorenbos e Kassam (1994), o estresse hídrico causado a cana-de-açúcar na sua fase final é benéfico, pois proporciona a maturação da mesma e provoca outros benefícios tecnológicos do ponto de vista do consumo da cana. Os mesmos autores mencionam ainda que durante o período de maturação, os intervalos de irrigação são ampliados ou a irrigação é suspensa para que a cultura atinja a maturação, reduzindo a taxa de desenvolvimento vegetativo, desidratando a cana e forçando a transformação de todos os açúcares em sacarose recuperável. Com a paralisação do desenvolvimento vegetativo, há um aumento entre a matéria seca armazenada como sacarose e a utilizada para novo desenvolvimento.

4.2 Calibração do lisímetro

Na Figura 14 são apresentadas as leituras do lisímetro durante a calibração com massas de 4.000 g e na Figura 15 são apresentadas as leituras do lisímetro quando carregado com massas de 200g.

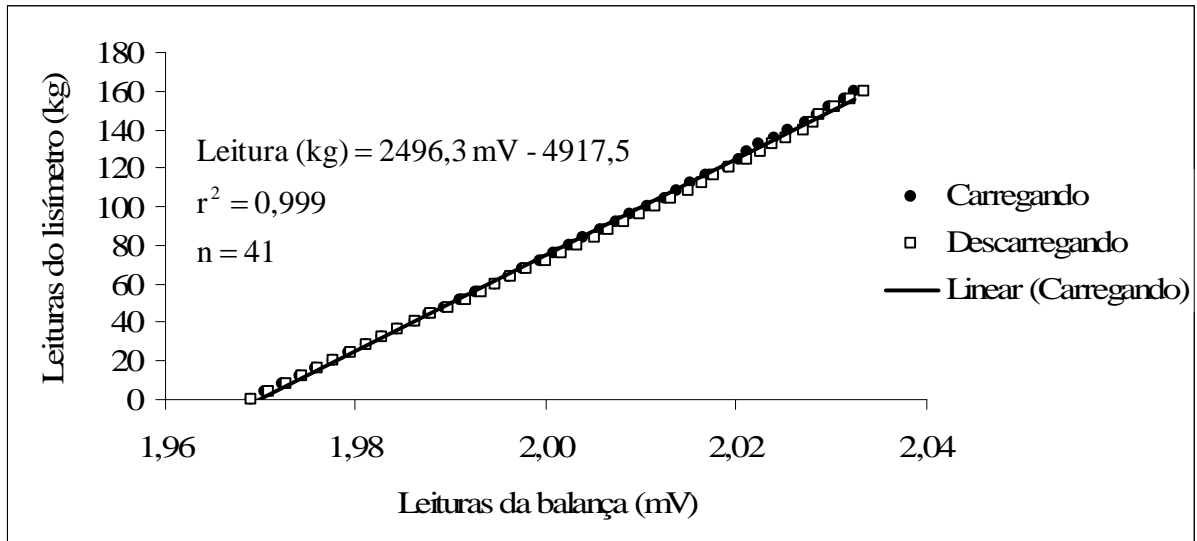


Figura 14 - Leituras do lisímetro de pesagem no carregamento durante a calibração.

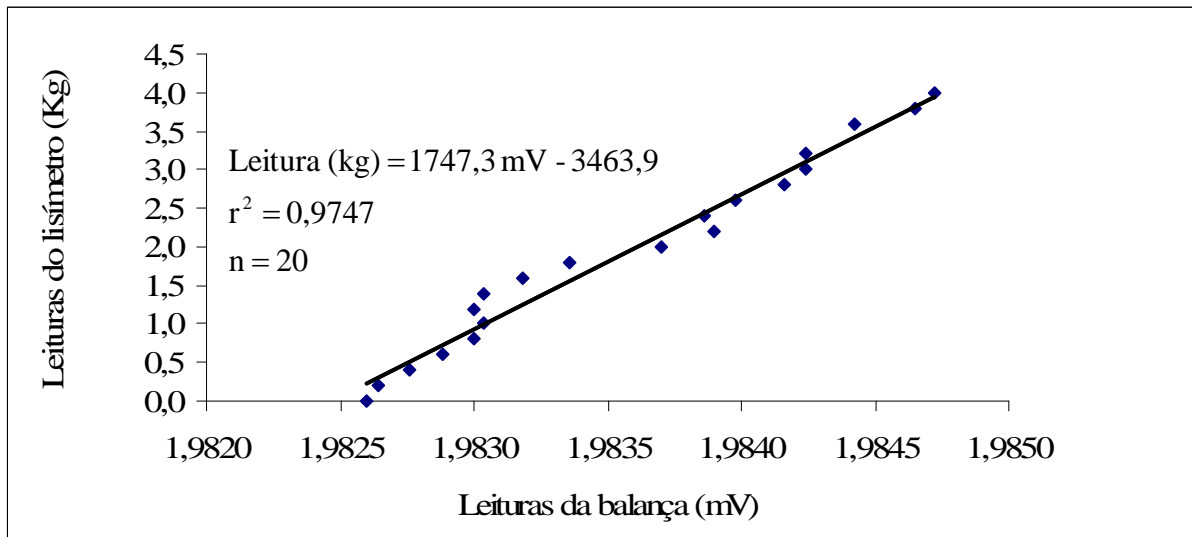


Figura 15 - Determinação da sensibilidade de pesagem do lisímetro utilizando massa padrão de 200 g.

Quanto à sensibilidade, a análise dos dados obtidos pelo carregamento do lisímetro mostrou-se sensível às variações de massa a partir de 200 g, o que é equivalente a uma lâmina d'água de 0,09 mm. Os resultados relacionados à exatidão (erro padrão) e a sensibilidade do lisímetro demonstraram que a sensibilidade é maior que a exatidão. Segundo Bloom (1992), um sistema com alta sensibilidade não se traduz necessariamente em alta exatidão.

O comportamento linear na calibração foi excelente, fato também observado por Schneider *et al.* (1998), Howell *et al.* (1995) e Allen e Fischer (1991) utilizando equipamentos semelhantes.

Na Figura 16 é mostrada variação das leituras do lisímetro no decorrer de um dia com irrigação, sem precipitações (Dia Juliano 233). Nota-se que o equipamento responde de forma rápida ao acréscimo de massa no sistema (lisímetro) devido a irrigação, que foi realizada entre as 0:00 h e 3:00 h. Após o término da irrigação o sistema mostrou certa perda de massa, entre 3:00 h e 4:00 h, apresentando uma leve estabilização entre 4:00 h e 6:00 h até o surgimento dos primeiros raios solares. Entre 6:00 e 16:00 horas houve uma queda significativa de massa no lisímetro em decorrência da evapotranspiração, até atingir uma certa estabilização. Durante o dia o aumento do saldo de radiação líquida (R_n) é a principal variável meteorológica envolvida no processo evaporativo. Segundo Campeche (2002), durante a noite podem ser verificadas perdas de água para a atmosfera ocasionadas por outros dois fatores, como condições aerodinâmicas do ar e da energia acumulada pelo sistema.

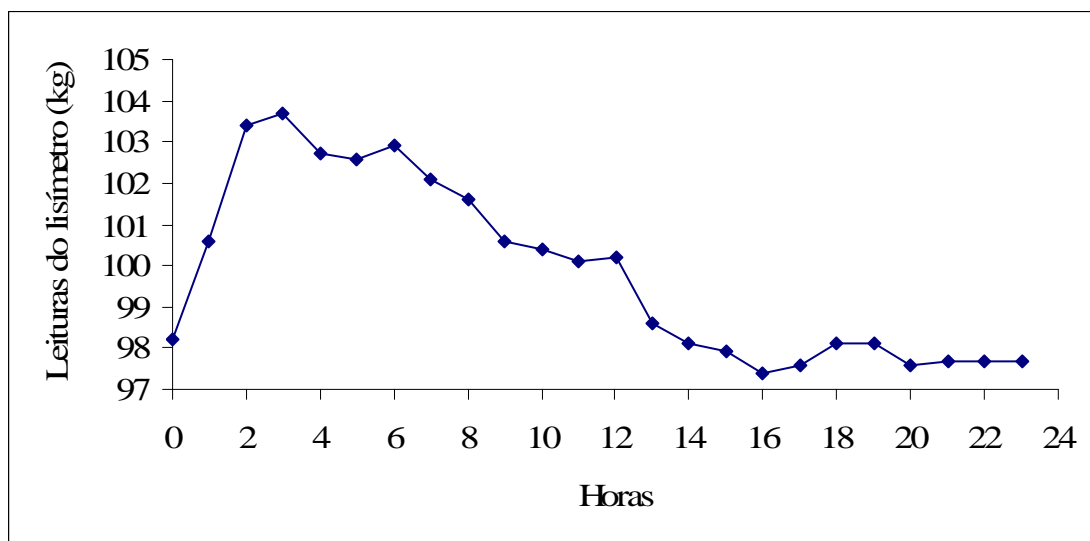


Figura 16 – Variação da massa do lisímetro ao longo de um dia com irrigação.

4.3 Coeficiente de cobertura do solo (C_s)

Na Figura 17 é mostrada a evolução da cobertura do solo pela cultura até os 108 DAP. Nota-se que na fase de perfilhamento da cana, que coincide com a fase de

desenvolvimento vegetativo (31 a 80 DAP) o incremento diário da cobertura do solo (1,23 % d⁻¹) foi muito superior ao observado na fase inicial (0,53 % d⁻¹). De acordo com Bezerra *et al.* (2004), um desenvolvimento mais acelerado em uma determinada fase de desenvolvimento de uma cultura, mostra uma maior importância do manejo da água para irrigação devido a necessidade de uma lâmina adequada para cada fase.

Segundo Doorenbos e Kassam (1994), a frequência de irrigação deve variar com os períodos de desenvolvimento da cana. Durante o período de estabelecimento, incluindo a emergência e o estabelecimento das plântulas, é preferível efetuar aplicações de água leves e frequentes. Durante o período vegetativo inicial, o perfilhamento é diretamente proporcional à frequência de irrigação. Os mesmos autores comentam que um perfilhamento vigoroso no início é ideal porque proporciona o surgimento de brotos aproximadamente da mesma idade.

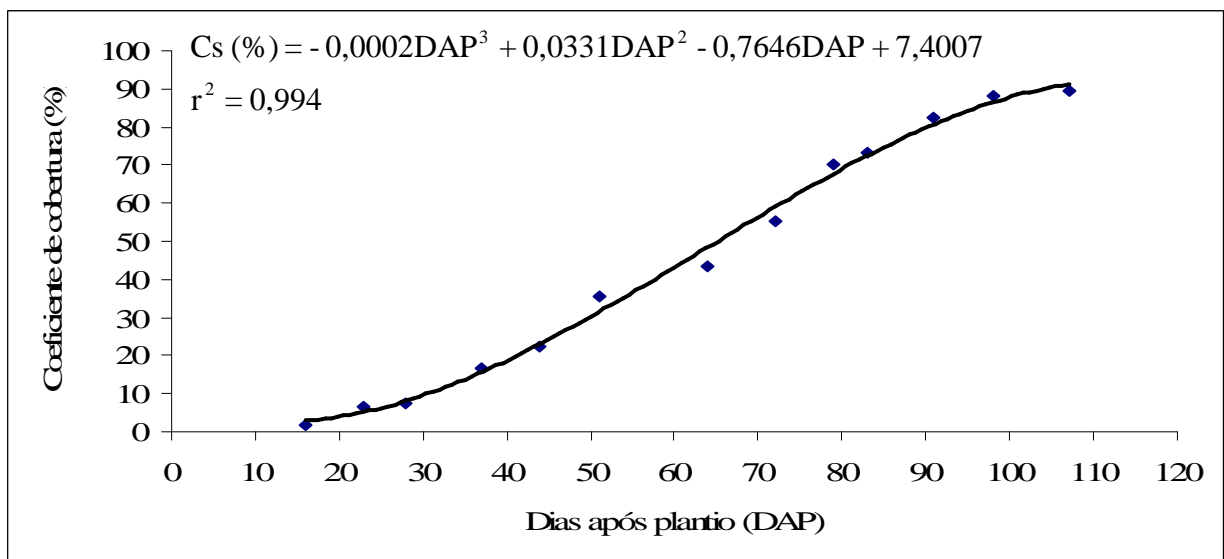


Figura 17 - Valores da cobertura do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar.

De acordo com Allen *et al.* (1998), para algumas culturas, principalmente aquelas que tem mais de 0,50 m de altura, considera-se que a cobertura completa do solo se dá quando o Cs atinge de 70 a 80%. No caso do experimento, a cobertura de 70% da superfície do solo pela cana-de-açúcar ocorreu aos 80 DAP.

Na Tabela 6 são apresentadas as datas em que ocorreram as mudanças de fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar, suas respectivas durações e coeficientes de cobertura do solo (Cs), de acordo com a metodologia descrita por Doorenbos e Kassam (1994). Para os mesmos autores, a fase de estabelecimento dura de 10 a 30 dias, a de desenvolvimento

vegetativo (produção de rebrotos e alongamento do talo) de 150 a 350 dias, a formação da colheita de 70 a 200 dias e a maturação de 50 a 70 dias.

A diferença de duração das fases com relação ao que foi observado pode ser explicada por interferências do clima, latitude, altitude, variedade e outros. (ALLEN *et al.*, 1998).

Tabela 6 - Durações das fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar e coeficientes de cobertura do solo (Cs) observados

| Fases | Data | | Cs (%) | Duração das Fases (dias) |
|------------------------------------|------------|------------|------------|-----------------------------|
| | Início | Fim | | |
| Brotação e fase de estabelecimento | 15/07/2008 | 27/08/2008 | 1,7 - 16,6 | 44 |
| Perfilhamento | 28/08/2008 | 29/10/2008 | 22,4 - 88 | 63 |
| Desenvolvimento dos colmos | 30/10/2008 | 27/05/2009 | 89,3 | 210 |
| Maturação | 28/05/2009 | 22/09/2009 | >89,3 | 118 |

Na Tabela 7 são apresentadas as durações das fases de desenvolvimento cultura da cana-de-açúcar de acordo com a metodologia apresentada por Allen *et al.* (1998). Os valores de duração das fases observados no presente estudo foram semelhantes aos valores médios mencionados por Allen *et al.* (1998) para baixas latitudes, de 35, 60, 190 e 120 dias, para as fases inicial, desenvolvimento vegetativo, intermediária e final, respectivamente.

Tabela 7 – Durações das fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar em função da cobertura do solo, segundo a metodologia proposta por Allen *et al.* (1998)

| Fases | Data | | Cs (%) | Duração das Fases (dias) |
|----------------------------|------------|------------|-----------|-----------------------------|
| | Início | Fim | | |
| Inicial | 15/07/2008 | 14/08/2008 | 1,7 - 10 | 31 |
| Desenvolvimento vegetativo | 15/08/2008 | 02/10/2008 | 11 - 70 | 49 |
| Intermediária | 03/10/2008 | 27/05/2009 | >70 | 237 |
| Final | 28/05/2009 | 22/09/2009 | >70 | 118 |

4.4 Evapotranspiração da cultura (ET_c)

Os valores diários da evapotranspiração da cana-de-açúcar (ET_c), medida no lisímetro de pesagem, e da evapotranspiração de referência, estimada pelo método FAO Penman-Monteith, são mostrados na Figura 18.

A ET_c média durante a fase inicial foi muito baixa (1,1 mm dia⁻¹). Como nesse período a área foliar da cultura era pequena (C_s<10%), era esperado que as perdas de água ocorressem principalmente devido à evaporação da água na superfície do solo e fossem limitadas à fração do solo umedecida pelos gotejadores (fw=0,24).

Dos 31 aos 99 DAP (fase de desenvolvimento vegetativo e parte da fase intermediária) a ET_c apresentou um significativo aumento diário, em virtude do desenvolvimento da área foliar. Durante a fase intermediária (no período 99 e 210 DAP) a ET_c manteve-se parcialmente estável com uma variação de 3,6 a 6,6 mm dia⁻¹. Já a partir dos 210 DAP a ET_c apresentou uma tendência de queda, da mesma forma que a ET_o, sendo que a ET_o retomou o seu desenvolvimento a partir dos 285 DAP devido as condições meteorológicas do local. A queda da ET_c deve-se à cultura estar iniciando a fase de maturação (final).

Por causa das fortes precipitações ocorridas durante a estação chuvosa do ano de 2009, não foi possível a quantificação dos dados de ET_c de alguns dias neste período, devido a problemas no lisímetro. Para os dias em que não houve a possibilidade de quantificar a ET_c, a mesma foi estimada segundo metodologia proposta por Allen *et al.* (1998). Entretanto observou-se uma tendência de queda dos valores de ET_c na fase de maturação da cultura em relação a ET_o. Segundo Allen *et al.* (1998), o começo da maturação é indicado freqüentemente pelo começo do envelhecimento, amarelecimento ou senescência das folhas, queda da folha, ou o amadurecimento, a medida que a evapotranspiração da cultura é reduzida em relação à ET_o.

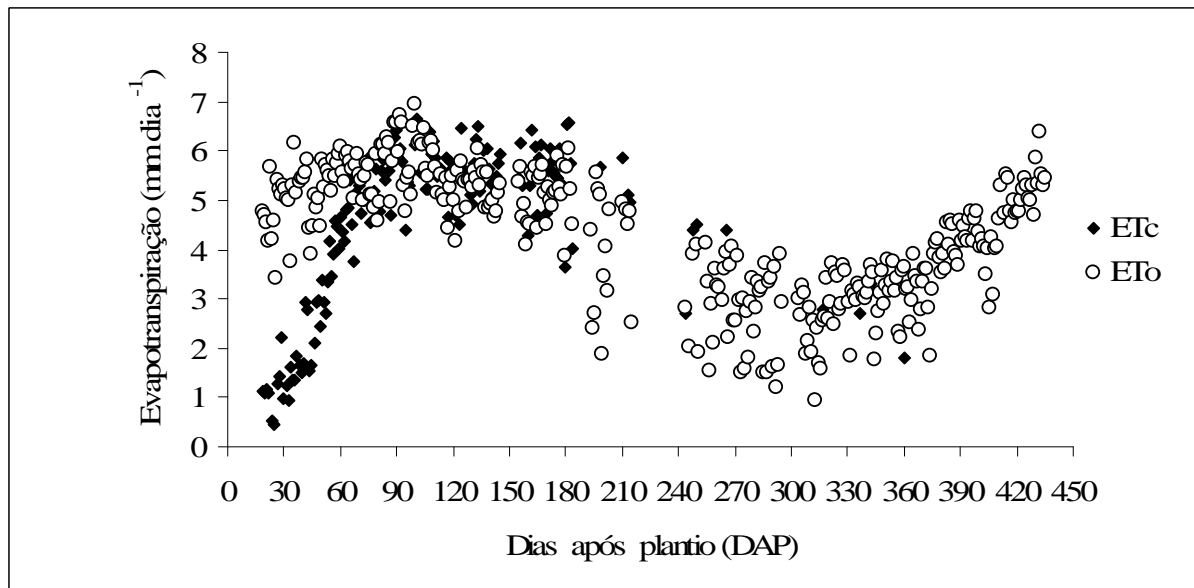


Figura 18 - Evapotranspiração da cultura (ETc) e evapotranspiração de referência estimada pelo método FAO Penman-Monteith (ETo-PM) observada durante o ciclo da cana-de-açúcar.

Na Tabela 8 são mostrados os valores totais da lâmina de irrigação aplicada, a evapotranspiração da cana-de-açúcar (ETc) e de referência (ETo) em cada fase de desenvolvimento da cultura

Do total evapotranspirado durante todo o desenvolvimento da cultura, 1,05 % foi consumido na fase inicial, 15,63 % durante a fase de desenvolvimento vegetativo, a maior quantidade de água foi consumida durante a fase intermediária (51,90 %) e durante a fase final foi consumido 31,41 %.

Segundo Varela (2002), o período crítico da cana-de-açúcar, ou seja, aquele em que há maior exigência da água por parte da planta, corresponde ao período máximo de desenvolvimento vegetativo, que ocorre nos primeiros oito meses de vida. Doorenbos e Kassan (1994), afirmam que durante o alongamento do caule e início da formação da colheita (fase intermediária) a lâmina de água deve ser aumentada. Existe relação estreita entre o alongamento da cana durante esse período e a utilização de água, sendo importante o suprimento adequado durante essa fase de desenvolvimento vigoroso, em que forma-se os entrenós mais longos.

Tabela 8 – Valores de evapotranspiração da cultura (ETc), evapotranspiração de referência estimada pelo método FAO Penman-Monteith e lâminas de irrigação aplicadas (LI) durante as fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar

| Fases da cultura | Duração (dias) | LI (mm) | ETc (mm) | ETo (mm) |
|----------------------------|-----------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Inicial | 31 | 24,1 | 11,3 | 47,9 |
| Desenvolvimento vegetativo | 49 | 154,6 | 167,9 | 252,5 |
| Intermediária | 237 | 731,0 | 557,5 | 540,4 |
| Final | 118 | 34,6 | 337,42* | 448,38 |
| Total | 435 | 944,3 | 1.074,12 | 1.284,18 |

*Valor estimado segundo metodologia proposta por Allen *et al.* (1998).

4.5 Determinação do coeficiente de cultivo (Kc) da cana-de-açúcar

Na Figura 19 é apresentada a curva do Kc determinada neste estudo para valores de ETo estimados pelo método FAO Penman-Monteith, de acordo com a metodologia descrita por Allen *et al.* (1998). Na Tabela 9 são apresentados os coeficientes de cultivo médios para as fases fenológicas da cana-de-açúcar medidos em Paraipaba-CE, os valores tabelados citados por Allen *et al.* (1998) e os ajustados para as condições climáticas da região, segundo a metodologia proposta por Allen *et al.* (1998). Os valores de Kc recomendados por Allen *et al.* (1998) assumem condições climáticas padrão, definidas como clima sub-úmido, com umidade relativa do ar média de 45% durante o dia e velocidade do vento média de 2 m s⁻¹. Para condições climáticas, de fração do solo umedecido e de frequência de irrigação diferentes do padrão, os autores recomendam ajustes nos valores tabelados de Kc.

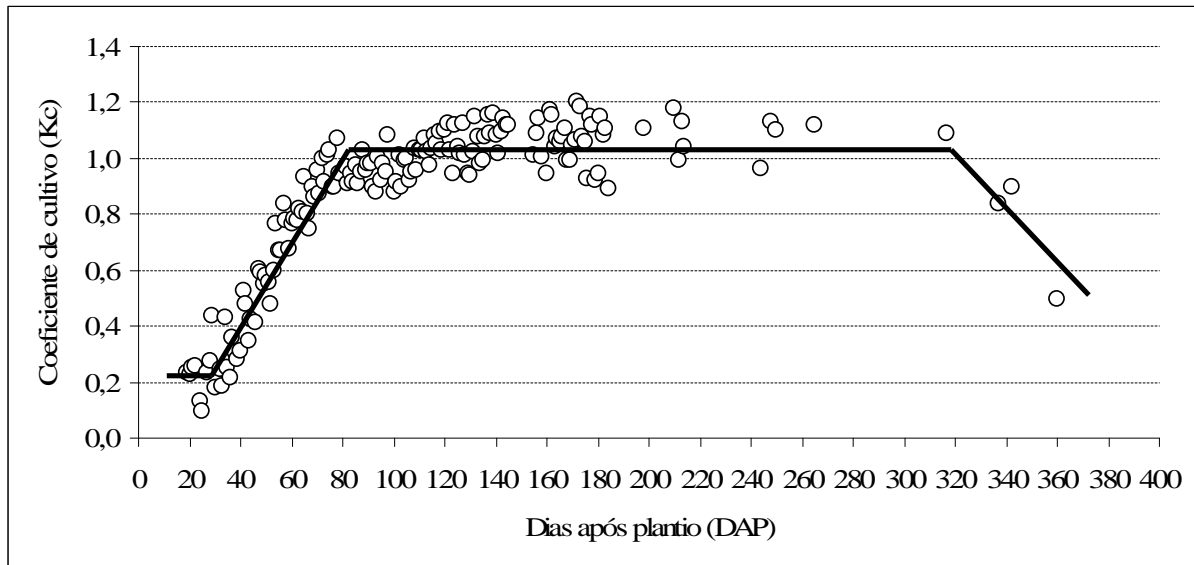


Figura 19 - Coeficientes de cultivo da cana-de-açúcar determinados para valores de ETo estimados pelo método FAO Penman-Monteith.

Tabela 9 - Coeficientes de cultivo (Kc) da cana-de-açúcar observados em Paraipaba-CE e recomendados por Allen *et al.* (1998)

| Fases de desenvolvimento da cultura | Coeficiente de cultivo (Kc) medido | Coeficiente de cultivo (Kc) FAO | Coeficiente de cultivo (Kc) FAO ajustado |
|-------------------------------------|--|-------------------------------------|--|
| Inicial | 0,23 | 0,40 | 0,24 |
| Intermediária | 1,03 | 1,25 | 1,17 |
| Final | 0,50 | 0,75 | 0,67 |

Os valores de Kc inicial, intermediário e final medidos neste estudo foram mais baixos que os valores tabelados e ajustados segundo a metodologia proposta por Allen *et al.* (1998) em todas as fases. Este fato pode estar relacionado às condições meteorológicas do local e à utilização do sistema de irrigação localizada subsuperficial. A irrigação subsuperficial apresenta uma menor área molhada quando comparada com outros sistemas, influenciando diretamente nas perdas por evaporação, principalmente nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura. Na fase inicial o Kc observado foi bem próximo do Kc ajustado. A aproximação dos valores de Kc inicial calculado e ajustado pode ser explicada pela utilização da fração molhada pelo emissor no cálculo de ajuste do Kc inicial para as condições de Paraipaba-CE.

Souza *et al.* (1999), em trabalho conduzido na região Norte Fluminense-RJ, utilizando um sistema de irrigação por aspersão do tipo canhão, encontraram valores de Kc de

0,60; 1,10 e 0,62 para as fases inicial, intermediária e final, respectivamente. Os valores de K_c para a fase intermediária encontrados pelos autores foram maiores aos encontrados neste trabalho, pois nesta fase o processo de transpiração é mais intenso e depende mais da planta. Já na fase inicial, a diferença entre os valores encontrados pode ser explicada pela utilização de sistemas de irrigação diferentes. A utilização do sistema por aspersão provoca uma maior área molhada em relação ao sistema localizado, o que influencia diretamente no aumento da evaporação, principal contribuinte no processo de evapotranspiração na fase inicial da cultura.

Inman-Bamber e McGlinchey (2003), estudando a evapotranspiração da cana-de-açúcar irrigada por sulcos (Austrália) e localizada (Suazilândia), utilizando o método razão de Bowen (medições do balanço energético), encontraram valores de K_c inicial, intermediário e final iguais a 0,4; 1,24 e 0,7, valores esses muito próximos dos citados por Allen *et al.* (1998). Os mesmos autores utilizaram uma média ponderada entre os resultados nos dois países para determinar o K_c da cana-de-açúcar nas suas diferentes fases.

Allen *et al.* (1998) comentam que com o desenvolvimento da cultura e o aumento da cobertura do solo pela mesma, o fator de maior contribuição para a perda de água para o meio é a transpiração. Os mesmos autores comentam ainda que durante o estágio de desenvolvimento das culturas, o valor de K_c irá corresponder com a quantidade de cobertura do solo e desenvolvimento das plantas. Em geral, se a superfície do solo está seca, um valor de K_c igual a 0,5 irá corresponder a uma cobertura de 25 a 40% de cobertura do solo, devido ao sombreamento e o transporte de calor sensível do solo para a vegetação. Um valor de K_c igual a 0,7 geralmente corresponde a uma cobertura de solo em torno de 40 a 60%. Estes valores variam dependendo da cultura, frequência de umedecimento e se a cultura usa mais água do que a cultura de referência.

Na Figura 20 é mostrada a relação observada no presente estudo entre o coeficiente de cobertura do solo da cultura (em %) e o coeficiente de cultivo (K_c) na fase de desenvolvimento vegetativo. A variação do K_c em relação ao C_s nessa fase pode ser representada com bastante exatidão ($r^2 = 0,992$) por um modelo quadrático negativo. Nota-se que para valores de C_s próximos de 70 % o K_c quase não varia, mostrando que esse valor de C_s pode ser utilizado como indicativo do término da fase de desenvolvimento vegetativo e início da fase intermediária. O bom ajuste do modelo obtido permite uma aproximação mais precisa do K_c na fase de desenvolvimento, em relação à simples interpolação entre os valores de K_c inicial e intermediário.

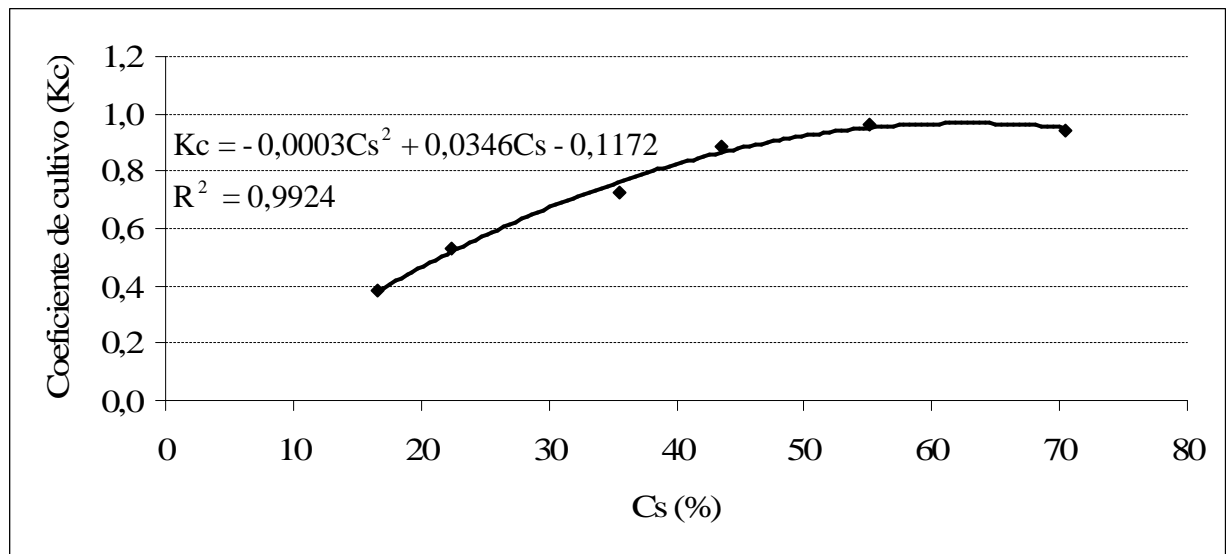


Figura 20 - Relação entre o coeficiente de cultivo (Kc) e a cobertura do solo (Cs) na fase de desenvolvimento vegetativo.

4.6 Produtividade

As produtividades medidas de cana-de-açúcar, variedade SP 6949, dentro e fora do lisímetro foram de 144,4 t ha⁻¹ e 108,8 t ha⁻¹, respectivamente. Normalmente, as plantas tendem a crescer mais no interior do lisímetro (efeito buquê) do que fora. (SEDIYAMA,1996).

Souza *et al.* (1999), utilizando sistema de irrigação por aspersão tipo canhão, encontraram para as variedades RB72-454, RB76-418 e SP70-1011 produtividades máximas de 155,8, 126,9 e 141,9 t ha⁻¹, com lâminas totais de água de 1.568, 1.424 e 1.589 mm, respectivamente, em 13 meses de cultivo. Gomes (1999) obteve, com cana-planta, variedade RB72-454, e uma lâmina média de 1.195 mm, uma produtividade média de colmos de 130 t ha⁻¹. Maule *et al.* (2001) encontraram no Estado de São Paulo, para a variedade SP79 - 1011, produtividades médias de 149, 154 e 170 t ha⁻¹, respectivamente, para precipitações totais de 1.478 mm com 14 meses de cultivo, de 1.695 mm com 17 meses de cultivo e de 1.829 mm com 19 meses de cultivo; já Azevedo (2002) encontrou para a mesma variedade nos tabuleiros costeiros da Paraíba, produtividades de 52, 79, 93 e 92 t ha⁻¹ para precipitação efetiva mais irrigação de 609, 761, 905 e 1043 mm, respectivamente, com doze meses de cultivo.

Doorenbos e Kassam (1994), afirmam que a produtividade da cana-de-açúcar pode variar entre 50 e 150 t ha⁻¹, ou mais, dependendo especialmente da duração do período vegetativo total e do tipo de cultivo (principal ou soca). Os mesmos autores mencionam que os rendimentos podem ser considerados bons nos trópicos e nos subtropicos secos, com irrigação, dentro de uma faixa de 100 a 150 t ha⁻¹.

As diferenças entre a produtividade obtida no presente estudo e os mencionados na literatura podem estar relacionadas à variedade utilizada, à duração do ciclo da cana-de-açúcar no local estudado, ao método e manejo da irrigação e à utilização da fertirrigação, uma vez que a cultura foi beneficiada por uma forma mais eficiente de aplicação de água e fertilizantes. Carrijo *et al.* (2004), citam que, para os nutrientes com forte interação com a matriz do solo e que, predominantemente, se movimentam por difusão, o aumento da umidade do solo, com a utilização de tecnologia de irrigação por gotejamento, melhora a eficiência da adubação, especialmente em solos arenosos.

5 CONCLUSÕES

Nas condições em que foi realizado o estudo, pode-se concluir que:

1. A evapotranspiração total durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial na região de Paraipaba-CE foi de 1.074,12 mm, com valores máximos da ordem de 6,6 mm d⁻¹ durante a fase intermediária.
2. As durações das fases fenológicas da cultura da cana-de-açúcar foram de 31, 49, 237 e 118 dias para as fases inicial, de desenvolvimento, intermediária e final, respectivamente.
3. A partir de valores de ETo determinados pelo método de Penman-Monteith FAO e de ETc pelo lisímetro, foram obtidos valores de Kc de 0,23, 1,03 e 0,50, para as fases inicial, intermediária e final, respectivamente. Para a fase de desenvolvimento vegetativo obteve-se um modelo polinomial quadrático, representando a relação entre o Kc e a cobertura do solo, o qual, apresentou bom coeficiente de ajuste.

6 REFERÊNCIAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO, 1982. 68p. (FAO Irrigation and Drainage Paper N° 39)

ALLEN, R. G.; FISHER, D. K. Direct Load cell-based weighing lysimeter system. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 114 – 124.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**. Rome: FAO, 1998. 299p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56)

ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O.; JENSEN, M.E. Environment requirements of lysimeters. In: ALLEN, R.G.; HOWELL, T.A.; PRUITT, W.O.; WALTER, I.A.; JENSEN, M.E. (Eds.) **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LYSIMETRY, 1991, New York. Proceedings... New York: ASCE, 1991. p.170-81.

ANGELOCCI, L. R. 2002. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera**. Introdução ao tratamento biofísico. Editado pelo autor, Piracicaba.

ARANHA, C.; YAHN, C. A. **Botânica da cana-de-açúcar**. In: Paranhos, S. B. (Coord.) **Cana-de-açúcar: Cultivo e Utilização**. Campinas, Fundação Cargill, 1987, 431p. cap. 1, 1-18p.

AYARS, J.E.; et al. Subsurface drip irrigation of rows crops: a review of 15 years of research at the water management research laboratory. **Agricultural Water Management**, n.42, p. 1-27, 1999.

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, H.M. Irrigação localizada. **Informe Agropecuário**, v.12, n.139, p.40-53, julho 1986.

BARLOW, E. W. R.; MUNNS, R. E.; BRANDY, L. J. Drought responses of apical meristems. In: TURNER, N. C.; KRAMER, P. J. (EDS). **Adaptation of plants to water and high temperature stress**. New York, Wiley, 1980, p. 191-205.

BERNARDO, S. **Manejo da irrigação na cana-de-açúcar**. Disponível em: < http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Cana_irrigada_producao_000fizvd3t102wyiv802hvm3jlwle6b8.pdf >. Acesso em 23 dez. 2008.

BEZERRA, J. W. T. *et al.* **Estimativa do coeficiente de cobertura em uma cultura de melão**. Irriga, Botucatu, v. 9, n. 1, p. 89-93, janeiro-abril, 2004 (Artigo Técnico).

BLACKBURN, T. A.; GLASZIOU, K. T. **Sugarcane**. Longman, New York. 1984, p. 414.

BLOON, A. J. Principles of instrumentation for physiological ecology. In: PEARCY, R. W.; EHLERINGER, J. R.; MOONEY, H. A. *et al.* (Ed) **Plant physiological ecology: field methods and instrumentation**. London: Chapman and Hall, 1992. p. 1-13.

BUCKS, D.A. *et al.* **Subsurface trickle irrigation management with multiple cropping**. **Trasactions of ASAE**, v.24, n.6, p.1482-1489, 1981.

CAMP, C.R. Subsurface drip irrigation:a review. **Trasactions of ASAE**, v.41, n.5, p.1353-1376, 1998.

CAMPECHE, L. F. de S. M. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida ‘Tahiti’ (*Citrus latifolia* Tan.)**. Piracicaba, SP, 2002. 79p. Tese (Doutorado) - Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

CARRIJO, O.A.; SOUSA, R.B. de; MAROUELLI, W.A.; ANDRADE R.J. de. **Fertirrigação de hortaliças**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2004.13 p. (Circular Técnica, 32)

DASBERG, S.; BRESLER, E. **Drip irrigation manual**. Israel: International Irrigation Information Center (IIIC), 1985. 95p. (IIIC Publication n 9)

DIETRICH, P.; SANDERS, D. & HEDRICH, R. 2001. **The role of ion channels in light-dependent stomatal opening**. *J. Exp. Bot.*, 52: 1959- 1967.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.M. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: FAO, 1994 (Estudos FAO, Irrigação e Drenagem 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. 2 ed. Rome: FAO, 1977 (FAO Irrigation and Drainage Paper 24).

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de**

Classificação do Solo. Brasília: EMBRAPA-CNPS, 1999. 412p.

FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; DANTAS NETO, J. GHEYI, H. R. **Eficiência no uso da água na cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de zinco no litoral paraibano.** Eng. Agríc. [online]. 2008, vol.28, n.3, pp. 494-506. ISSN 0100-6916. doi: 10.1590/S0100-69162008000300010.

FREVERT, D.R.; HILL, R.W.;BRAATEN, B.C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 109, p. 265-270, 1983.

GOMES, M. C. R. **Efeito da irrigação suplementar na produtividade da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes.** Rio de Janeiro: UENF, 1999. 51p. Dissertação Mestrado.

GORNAT, B.; NOGUEIRA, L.C. **Avaliação da economia de água com irrigação localizada convencional e subterrânea em fruteiras tropicais.** Disponível em: <<http://www.iica.org.uy/p2-4.htm>>. Acesso em 12 dez. 2008.

GUSHIKEN, E.C. **Irrigating with reclaimed water through permanent subsurface drip irrigation systems.** In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 5., 1995, St. Joseph. **Proceedings...**St. Joseph: ASAE, 1995. p.269-274.

HOWELL, T.A.; McCORMICK, R.L.; PHENE, C.J. Design and instalation of large weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 28, n. 117, p. 106-112, 1985.

HOWELL, T.A.; SCHNEIDER, A.D.; DUSEK, D.A.; MAREK, T.H.; STEINER, J.L. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 38, n. 4, p. 1019-1024, 1995.

INMAN-BAMBER, N.G.; McGLINCHEY, M.G. **Crop coefficients and water use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements.** Field Crops Research, v.83, p.125-138, 2003.

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, C. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requeriments.** ASCE Manual Report on Engineering Practices.1990. 442 p.

JUAN, J.A.M.S. **Riego por goteo: teoría y práctica**. 4ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2000. 302p.

KELLER, J.; BLIESNER, I.D. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652p.

KIRKHAM, R.R.; GEE, G.W.; JONES, T.L. **Weighing lysimeters for long-term water balance investigations at remote sites**. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.48, n.5, p.1203-5, 1984.

KRAMER, P. J. **Water relations of plants**. Academic Press, New York, p. 489, 1983.

LEAL, B. G.; SEDIYAMA, G. C. **modelo matemático para determinação da curva do coeficiente de cultura, Kc**. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.12, n.2, 124-124 133, Abr./Jun., 2004.

LUCCHESI, A. A. Processo fisiológicos da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum SSP.*). **Boletim Técnico ESALQ/CENA, Piracicaba**, n.7, p. 1-50, 1995.

MAGALHÃES, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T.; (Coord). **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1987. p.113-118.

MANFRINATO, H.A. **A irrigação por gotejamento: influencia sobre as relações solo-água**. Irrigação e Tecnologia Moderna, n.22, p. 21-25, 1985.

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

MIRANDA, E. P. de. **Coeficiente de cultivo do melão (*Cucumis melo*. L.) determinado pelo balanço hídrico e graus-dias de desenvolvimento**. Fortaleza: UFC. p., 198. (Dissertação de Mestrado).

MIRANDA, F. R. de; OLIVEIRA, J. J. G.; SOUZA, F. de. **Evapotranspiração máxima e coeficientes de cultivo para a cultura da melancia irrigada por gotejamento**. Revista Ciência Agrônômica, Vol. 35, Nº.1, jan.-jun., 2004: 36 – 43.

MIRANDA, F.R.; YODER, R.E.; SOUZA, F. de. **Instalação e calibração de um lisímetro de pesagem no Projeto de Irrigação Curu-Paraipaba, CE.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.3, n.1, p.107-110, 1999.

NOBEL, P. S. **Physicochemical and environmental plant physiology.** Academic Press, New York, 1999.

PAVERO, J. **Subsurface drip irrigation: Is it a good choice for your operation?** Published by University of Nebraska and the U.S. Department of Agriculture. Disponível em: <<http://cropwatch.unl.edu/archives/2002/crop02-8.htm#top>>. Acesso em 12 dez. 2008.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R. & SENTELHAS, P. C. 2002. **Agrometeorologia.** Fundamentos e aplicações práticas. Livr. Edit. Agropecuária, Guaíba.

PEREIRA, A. S. **Compilação de coeficientes de cultura (kc) determinados em condições brasileiras.** Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br>>. Acesso em 12 dez. 2008.

PEREIRA, A.R.; SANTIAGO, A.V.; MAGGIOTO, S.R.; FOLEGATTI, M.V. **Problemas operacionais com lisímetros de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.10, n.1, p.51-6, 2002.

PEREIRA, L.S. **Necessidades de água e métodos de rega.** Lisboa: Pub. Europa-América, 2004. 313 p.

PHENE, C. J.; HUTMATCHER, R. B.; AYARS, J. E. *et al.* **Máximizing water use efficiency with subsurface drip irrigation.** St. Joseph: ASAE. 1992.

PHENE, C.; DAVIS, K. R.; HUTMATCHER, R. B. *et al.* Effect of high frequency subsurface and surface drip irrigation on root distribution of sweet corn. **Irrigation Science**, v. 12, p. 135-140, 1990.

PIMENTEL, Carlos. **A relação da planta com a água.** Seropédica, RJ: Edur, 2004.

POLJAKOFF-MAYBER, A. & LERNER, H. R. 1994. **Plants in saline environments.** In: Handbook of plant and crop stress. Pessarakli, M (Ed.), Marcel Dekker, New York, p. 65- 96.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** São Paulo, Fundação Cargill, Piracicaba. CENA. 445p.; 1985.

RODRIGUES, J. D., **FISIOLOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR**. Universidade Estadual Paulista Instituto de Biociências Campus de Botucatu. Botucatu – SP, 1995. p.01. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/6301126/Canadeacucar-Ecofisiologia>>. Acesso em 9 dez. 2008.

SADD, J. C. C.; SCALOPPI, E. J. **Análise dos principais métodos climatológicos para estimativa da evapotranspiração**. VII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. Florianópolis - SC. ANAIS. V.II. p. 999-1021. 1988.

SCARDUA, R., ROSENFELD, U. **Irrigação da cana-de-açúcar**. In: PARANHOS, S.B. *et al.* **Cana-de-açúcar**; cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.373-431.

SCHNEIDER, A. D.; HOWELL, T. A.; MOUSTAFA, A. T. *et al.* **A simplifield weighing lysimeter for monolithic soil or reconstructed soils**. Transactions of the ASAE, v14 n.3, p. 267 – 273. 1998.

SEDIYAMA, G. C., RIBEIRO, A., LEAL, B. G. **Relações Clima-Água-Planta**. Capítulo 2, pag. 46-85. In: **Manejo da Irrigação**. Editor: FARIA, M. A. *et al.* Lavras: UFLA / SBEA, 1998. 368p.

SEDIYAMA, G.C. **Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.4, n.1, p.i-xii, 1996.

SILVA, F.C.; FOLEGATTI, M.V.; PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A. **Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.7, n.1, p.19-23, 1999.

SILVA, L.D.B. **Evapotranspiração do capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq) e gramabatatais (*Paspalum notatum* Flugge) utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem**. 2003. 93 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SILVA, M. T.; AMARAL, J. A. B. do. **Estimativa da evapotranspiração e coeficientes de cultivo do amendoim irrigado pelo método do balanço hídrico no solo**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.16, n.1, p.67-76, abril/2008.

SOUZA, E. F; BERNARDO, S.; CARVALHO, J. A. **Função de Produção da Cana- de-açúcar em Relação à Água para Três Cultivares, em Campos dos Goytacazes, RJ**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal – SP, V. 19, n.1, p.28- 42, 1999.

TALLENS, J.A.M. **Riego localizado y fertirrigacion**. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1994. 363p.

TAUPIER, L. O. G. e RODRIGUEZ, G. G. **A cana-de-açúcar: Manual dos derivados da Cana-de-açúcar: Diversificação matérias-primas, derivados do bagaço, derivados do melão, outros derivados e energia**. 1ª ed. Brasília: ABIPTI, 1999, 474p. cap. 2.1, p.21-27.

THIERES G. F. SILVA. *et al.* **Análise da produtividade da água da cana-de-açúcar irrigada na região semi árida, Brasil**. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 6., 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte.

THORTHWHITE, C. W.; HARE, F. K. **The loss of water to the air**. Meteorol. Monographs 6: 163-170., 1965.

TRACOM. **Watermark manual de instalação e medição do potencial de água no solo (UMIDADE)**. Disponível em: <<http://www.tracom.com.br>>. Acesso em 12 dez. 2008.

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/PB, 2002. 82 p. (Dissertação de Mestrado).

VEIGA, C.F.M.; VIEIRA, J.R.; MORGADO, I.V. **Diagnóstico da cadeia produtiva da cana-de-açúcar do estado do Rio de Janeiro**: Relatório de Pesquisa, Rio de Janeiro: FAERJ: SEBRAE/RJ, 2006, 107p.

VIANA, T. V. de A.; AZEVEDO, B. M. de. **Apostila de meteorologia e climatologia agrícola**. Fortaleza: Mestrado em Engenharia Agrícola. Departamento de Engenharia Agrícola – Universidade Federal do Ceará - UFC. p. 04 - 245, 2008.

VIANA, T.V.A. **Evapotranspiração obtida com o sistema razão de Bowen e um lisímetro de pesagem em ambiente protegido**. Piracicaba, SP, 2000. 138p. Tese (Doutorado) - Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

VIEIRA, D. B. A irrigação sistemática na cana-de-açúcar. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, n. 30, p. 24-30, 1986.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.