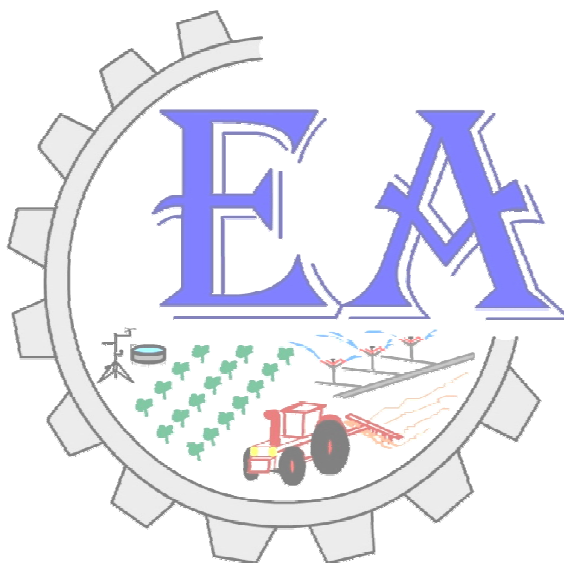




UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

José Francisco Alves do Carmo

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA
POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL NO SUBMÉDIO
DO VALE DO SÃO FRANCISCO**



JUAZEIRO/BA

2013

JOSÉ FRANCISCO ALVES DO CARMO

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA
POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL NO SUBMÉDIO
DO VALE DO SÃO FRANCISCO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Vale do São Francisco, como requisito para a obtenção de título de *Magister Science* em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Magna Soelma Beserra de Moura
Co-orientador: Thieres George Freire da Silva

JUAZEIRO, BA
2013


**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

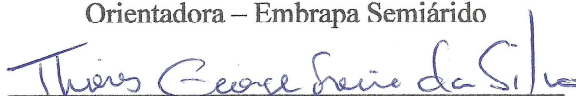
FOLHA DE APROVAÇÃO


José Francisco Alves do Carmo

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA POR
GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL NO SUBMÉDIO DO VALE SÃO FRANCISCO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Vale do São Francisco, como requisito para a obtenção de título de *Magister Science* em Engenharia Agrícola.


Magna Soelma Beserra de Moura
Orientadora – Embrapa Semiárido


Thieres George Freire da Silva
Co-Orientador - UFRPE


Mário de Miranda Villas Boas Ramos Leitão
Examinador - UNIVASF


José Monteiro Soares
Examinador – Embrapa Semiárido

Juazeiro, BA, 30 de julho de 2013.

Carmo, José Francisco Alves do

C287e Evapotranspiração da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial no Submédio do Vale do São Francisco / José Francisco Alves do Carmo. – Juazeiro, BA, 2013.
84f. 29 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus de Juazeiro, BA, 2013.

Orientadora: Profa. Dra. Magna Soelma Beserra de Moura.

Co-orientador: Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva

1. Evapotranspiração 2. Vale do São Francisco 3. Balanço de energia 4. Razão de Bowen 5. Correlações turbulentas. I. Título. II. Universidade Federal do Vale do São Francisco.

CDD 551.572

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Biblioteca SIBI/UNIVASF
Bibliotecário (a): Maria Betânia de Santana da Silva CRB4-1747.

Com todo amor e respeito, aos meus pais,
Josefa Alves do Nascimento Carmo e
Francisco do Carmo, OFEREÇO.

Com Amor e carinho, aos meus irmãos e
sobrinhos, DEDICO.

“O que quer que você faça na vida será insignificante. Mas é muito importante que você o faça. Ninguém mais o fará.”

Gandhi

AGRADECIMENTOS

A Deus, essência de todas as coisas.

Aos meus pais, Josefa Alves do Nascimento Carmo e Francisco do Carmo, pela sólida educação e tudo de bom que me passaram.

A Dra. Magna Soelma Beserra de Moura e ao Professor Thieres George Freire Silva, pela orientação, amizade e pelos preciosos ensinamentos. Muito obrigado.

Ao Professor Mário de Miranda Ramos Vilas Boas Leitão e ao Dr. José Monteiro Soares pelas preciosas contribuições ao trabalho final de tese.

Aos meus grandes amigos, Rodrigo Amorim e Alencar Júnior, pela preciosa amizade e apoio moral.

Aos bolsistas e estagiários que compunham a equipe da Dra. Magna, pela importante ajuda nas atividades experimentais.

A UNIVASF pela oportunidade do mestrado.

A Embrapa Semiárido, pela concessão das instalações, equipamentos, transporte e pelo apoio financeiro essenciais à realização desta pesquisa.

A AGROVALE, pela concessão da área experimental, e em especial ao Dr. Vinicius Vieira, pelo importante e constante apoio, também de fundamental importância à execução dessa pesquisa.

A FAPESB, pelo auxílio financeiro, importante à minha dedicação e conseqüente êxito neste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução deste trabalho.

RESUMO GERAL

A cana-de-açúcar exerce grande importância sócio-econômica na área semiárida do Submédio São Francisco e há necessidade de informações que auxiliem aos produtores no manejo racional da água de irrigação. A tomada de decisão para melhorias no manejo de hídrico das culturas comumente usa informações de evapotranspiração combinada com dados de coeficiente de cultivo (Kc) determinados localmente, ajustados para o clima e solo local, sistema de irrigação, ciclo, espaçamento e variedade. Este estudo teve como objetivo determinar a evapotranspiração (ETc) e coeficiente de cultivo (Kc) da cana-de-açúcar, variedade RB 92579 irrigada por gotejamento subsuperficial durante o ciclo de cana-soca. O experimento foi conduzido em um canal localizado no município de Juazeiro-BA, Semiárido brasileiro. A evapotranspiração de cultura (ETc) foi determinada pelo método do balanço de energia, por meio de duas técnicas distintas: (1) correlações turbulentas (EC) e (2) balanço de energia com base na razão de Bowen ($BERB$). Na área de cultivo foi instalada uma torre de monitoramento micrometeorológico equipada com vários sensores eletrônicos. Com isso foram determinados os termos do balanço de energia. A evapotranspiração de referência (ETo) foi estimada pelo método de Penman-Monteith padronizado no boletim 56 da FAO, utilizando dados meteorológicos de uma estação automática localizada próximo à fazenda. A ETc e o Kc foram determinados em escala diária e mensal, bem como para cada fase fenológica da cultura. Também foi medida a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA). Com os resultados constatou-se que a maior absorção de energia pelo sistema em estudo ocorreu no início do ciclo de cultivo, quando o albedo médio foi 19% na Fase I, evoluindo para 21, 25 e 26% nas fases II, III e IV, respectivamente. O saldo de radiação médio diário foi igual a $13,8\text{MJ m}^{-2}$, $15,4\text{MJ m}^{-2}$, $13,0\text{MJ m}^{-2}$ e $14,4\text{MJ m}^{-2}$, respectivamente para as fases de I a IV, representando 58, 65, 62 e 59% da radiação solar incidente. Durante todo ciclo produtivo, a radiação fotossinteticamente incidente sobre o dossel da cana-de-açúcar totalizou $2.948,99\text{MJ m}^{-2}$, representando em média, 44,26% da radiação solar global à superfície. Salienta-se, ainda, que em termos diários, as condições de nebulosidade influenciaram nos componentes do balanço de radiação, com exceção da irradiância de ondas longas pela superfície em condições de plena cobertura do solo, e em menor escala o albedo, que demonstra também dependência do ângulo de inclinação solar. No que se refere ao balanço de energia, as medidas dos fluxos foram influenciadas pela sazonalidade, pelo crescimento da cultura, bem como pelo tombamento característico da

variedade RB92579. Além disso, foi possível constatar que o método das correlações turbulentas apresentou subestimativa dos valores da energia disponível em 26%, devido, principalmente, à subestimativa dos fluxos de calor sensível ao longo do ciclo e do fluxo de calor latente ao início e final do ciclo. No entanto, os fluxos de calor latente obtidos pelo método das correlações turbulentas apresentaram maior conformidade com os do método da Razão de Bowen do que os fluxos de calor sensível, de modo que os valores diários da fração evaporativa variaram entre 0,66 (método das correlações turbulentas) e 0,68 (método da Razão de Bowen), revelando que a maior parte da energia disponível foi convertida em evapotranspiração atual.

Palavras-chave: evapotranspiração; Vale do São Francisco; balanço de energia; razão de Bowen; correlações turbulentas.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Balanço de radiação	3
2.2 Balanço de energia	4
2.2.1 Método das correlações turbulentas	5
2.2.2 Método da razão de Bowen	8
2.3 Evapotranspiração e coeficiente de cultura da cana de açúcar	11
3 CAPÍTULO 1	13
RESUMO	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUÇÃO	14
2. MATERIAL E MÉTODOS	16
2.1. Área experimental e instrumentação utilizada	16
2.2 Componentes do balanço de radiação	18
2.3 Cobertura do solo, fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada e índice de área foliar	20
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
3.1 Condições meteorológicas	21
3.2 Indicadores agrometeorológicos de desenvolvimento da cultura	25
3.3 Variação diurna dos componentes do balanço de radiação	28
3.4 Comportamento sazonal dos componentes do balanço de radiação	31
4. CONCLUSÕES	35
5. LITERATURA CITADA	36
4 CAPÍTULO 2	38
RESUMO	39
ABSTRACT	39
1. INTRODUÇÃO	39
2. MATERIAL E MÉTODOS	40
2.1 Área de estudo	40
2.2 Componentes do balanço de energia	41
2.3 Evapotranspiração e coeficiente de cultura	44
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
3.1 Condições meteorológicas	45
3.2 Balanço de energia	47
3.2.1 Análise de consistência dos dados do BERB	47
3.2.2 Fechamento do balanço de energia pelo método das correlações turbulentas	50
3.2.3 Comparação entre os fluxos de energia obtidos pelos dois métodos	51
3.3 Evapotranspiração, coeficiente de cultivo e requerimento hídrico da cana-de-açúcar	55
4. CONCLUSÕES	61
5. LITERATURA CITADA	62
5 CONCLUSÕES GERAIS	64
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE SÍMBOLOS

c_p = calor específico do ar à pressão constante

ρ'_v = desvio instantâneo da densidade do vapor de água em relação ao valor médio

ρ_a = densidade do ar

Agrovale = Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A.

BERB = balanço de energia com base na razão de Bowen

BOC = balanço de radiação de ondas curtas

BOL = balanço de radiação de ondas longas

CO_2 = fluxo de gás carbônico

e_a = pressão atual de saturação de vapor de água na atmosfera

e_s = pressão de saturação de vapor de água na atmosfera

EC = correlações turbulentas (eddy covariance)

ET = evapotranspiração

ETc = evapotranspiração da cultura

ETo = evapotranspiração de referência

ETa = evapotranspiração atual

FAO = Food Agriculture Organization

G = fluxo de calor no solo

H = fluxos de calor sensível

IAF = índice de área foliar

Kc = coeficiente de cultura

Kh = coeficiente de transferência turbulenta de calor

Kw = coeficiente de transferência turbulenta de vapor de água

λ = calor latente de vaporização

λE = fluxos de calor latente

Qa = radiação de ondas longas emitida pela atmosfera ou irradiância atmosférica de ondas longas

Qc = radiação de ondas curtas direta

Qd = radiação de ondas curtas difusa

Qg = radiação de ondas curtas incidente ou radiação solar global

Qs = radiação de ondas longas emitida pela superfície ou irradiância de ondas longas emitidas pela superfície

Rn = saldo de radiação

rQg = radiação de ondas curtas refletida

$rQg/Qg = r$ = albedo ou coeficiente de reflexão

$RFAi$ = radiação fotossinteticamente ativa interceptada

Rn = saldo de radiação

t_{bu} = temperatura de bulbo úmido

t_{bs} = Temperatura de bulbo seco (temperatura do ar)

T' = desvio instantâneo da temperatura em relação à temperatura média

T = temperatura média

w' = desvio instantâneo da velocidade vertical do vento em relação ao valor médio

β = razão de Bowen

Δt = variação de temperatura do ar entre dois níveis de medida

Δe = variação da pressão de vapor de água na atmosfera entre dois níveis de medida

γ = parâmetro psicrométrico

DPV = Déficit de pressão de vapor

z = ângulo zenital

1. INTRODUÇÃO GERAL

A cana de açúcar (*Saccharum spp.*) é uma gramínea de grande importância econômica para o Brasil, tanto para o setor agrícola quanto para a matriz energética nacional. Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana de açúcar, com 10,56 milhões de hectares que proporcionam a obtenção de mais de 670 milhões toneladas de colmos cujo rendimento médio é de 71,3 toneladas de colmos por hectare (IBGE, 2013), matéria prima esta destinada à produção de álcool anidro e hidratado, açúcar, aguardente, alimentação animal e como fonte de energia elétrica. No ano de 2010, a produção nacional de álcool foi de 28,4 milhões de metros cúbicos (AGRIANUAL, 2011). Mesmo com o aumento expressivo do consumo interno de álcool, as exportações além de crescerem, permitiram a formação de estoques reguladores, garantindo assim um equilíbrio tanto no fornecimento quanto nos preços no período de entressafras. Estas informações mostram a importância e a potencialidade da cana de açúcar para o setor de produção agrícola e para a matriz energética brasileira.

Isto é decorrente da expansão expressiva dos limites das fronteiras agrícolas das áreas cultivadas com cana de açúcar alcançando várias regiões do país, inclusive no Semiárido brasileiro, em face dos avanços da tecnologia de irrigação, onde o plantio da cana de açúcar pode ser feito o ano inteiro. Esta tecnologia tem possibilitado a obtenção de altas produtividades quando comparadas a outras regiões do país, pois a associação da irrigação com a fertirrigação proporciona um ótimo desenvolvimento das plantas (ANDRADE JUNIOR et al., 2012). Entretanto, a potencialidade produtiva desta região está associada, dentre outros fatores, à alta demanda evapotranspirativa desta cultura, decorrente tanto da alta disponibilidade de radiação solar ao longo de todos os meses do ano, quanto de água para irrigação.

Os processos que influenciam a demanda atmosférica de uma cultura dependem da interação biosfera-atmosfera e podem ser compreendidos por meio de medições micrometeorológicas (CABRAL et al., 2012; SILVA et al., 2012; QIN et al., 2008), como também pelo levantamento de parâmetros fisiológicos e de crescimento da vegetação do agroecossistema em estudo (GILBERT et al., 2006; TEJERA et al., 2007). Estudos micrometeorológicos envolvem alterações no albedo, na rugosidade da superfície, na umidade do solo e nas trocas de calor e vapor d'água entre a biosfera e a atmosfera, como tem sido

constatado em diversos sistemas vegetados (ADEGOKE et al., 2007). Estas alterações podem promover modificações nas respostas das plantas diante das condições ambientais a que estão submetidas, que podem ser estudadas por meios de relações entre crescimento e desenvolvimento vegetal com as variáveis agrometeorológicas (SILVA, 2009).

Isto expõe a necessidade de realização do monitoramento micrometeorológico e do crescimento da cana de açúcar para um melhor entendimento dos processos que governam a interação entre a cultura e a atmosfera para os diferentes ambientes de produção (clima e solo), sistemas de irrigação e variedades.

Em regiões de clima semiárido, como a região do Submédio do Vale São Francisco, no semiárido brasileiro, reconhecida, inclusive internacionalmente, pelas atividades agrícolas irrigadas desenvolvidas, a água apresenta-se como um recurso fundamental para a produção da cana de açúcar, de modo que seu uso eficiente pode diminuir a quantidade total aplicada no sistema de produção e aumentar o rendimento da cultura (SINGH et al., 2007). Desse modo, levando em conta a escassez de informações sobre a interação da cultura com a atmosfera nessa região, bem como sobre seu crescimento e a real vulnerabilidade do sistema de produção no tocante às relações hídricas e ambientais, especialmente sob as condições irrigadas locais, esta proposta objetiva, por meio da realização de medidas micrometeorológicas dos componentes do balanço de radiação e de energia, e da obtenção de parâmetros de crescimento da cultura, determinar a evapotranspiração (ET_c) e coeficiente de cultivo (K_c) da cana de açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial no ciclo de primeira soca sob as condições climáticas do Submédio do Vale São Francisco.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Balanço de radiação

A radiação solar representa a fonte primária de energia para todos os processos físicos naturais que ocorrem no planeta e a principal responsável pelos processos de transferência de água para a atmosfera em forma de vapor por transpiração e evaporação. O total de radiação solar que atinge a superfície do planeta, ou seja, a radiação solar global (Qg) é dividida em radiação de onda curta direta (Qc), que não sofre atenuação pela atmosfera, e radiação de onda curta difusa (Qd), que é parte refletida pela cobertura de nuvens e parte espalhada por moléculas e partículas presentes no ar. Do total de Qg que atinge a superfície, parte é absorvida e parte é refletida, compondo o balanço de radiação de ondas curtas (BOC). A parte da radiação de ondas curtas que é absorvida pelos compostos atmosféricos (vapor d'água, CO_2 , O_3 e compostos nitrosos) promove o aquecimento do ar e, conseqüentemente, a emissão de radiação de ondas longas em direção à superfície (Qa); e a parte absorvida pela superfície emite radiação de ondas longas em direção à atmosfera (Qs). Essas entradas e saídas compõem o balanço de radiação de ondas longas (BOL). O balanço de radiação compreende as fontes e sumidouros de energia que regem as condições meteorológicas do planeta (SOUZA; ESCOBEDO, 1997).

A maior parte dos processos físicos e biológicos que ocorrem ao nível da biosfera utiliza energia derivada das trocas de calor entre a superfície e a atmosfera, sendo a maior parte deste calor proveniente do balanço de energia radiante resultante da interação da superfície com a radiação solar. O saldo de radiação (Rn) é a integração dos fluxos radiativos atuantes sobre uma superfície, ou seja, a soma dos balanços de ondas curtas (BOC) e de ondas longas (BOL). Em sistemas vegetados, Rn representa a energia disponível para os processos físicos, fisiológicos e bioquímicos, como a evaporação, transpiração e fotossíntese; atuando diretamente sobre o desenvolvimento e o crescimento das plantas e indiretamente pelos efeitos no regime térmico de sistemas vegetados. Desse modo, a energia disponível para estes processos depende do balanço entre a energia radiante oriunda da atmosfera e a energia que é irradiada pelo sistema em questão (PEREIRA et al, 2002a).

Allen (2011) recomenda que, sempre que possível, deve-se obter os quatro componentes do Rn : radiação de ondas curtas incidente (Qg), irradiância atmosférica de

ondas longas (Qa), radiação de ondas curtas refletida (rQg) e irradiância de ondas longas emitidas pela superfície (Qs), pois estes podem ser mais facilmente comparados quando medidos separadamente do que em medidas integradas de Rn . Em geral, são medidos o Rn , Qg e rQg , enquanto Qa e Qs podem ser estimados com base nas leis da radiação e, ou derivados da equação do balanço de radiação (CAMPBEL; NORMAN, 1998).

A eficácia da superfície em refletir parte da radiação que incide sobre o sistema é obtida da razão rQg/Qg , conhecida como albedo ou coeficiente de reflexão (r), que é usualmente expresso em termos de %. Esse parâmetro integra os componentes do balanço de radiação, sendo determinante nos valores do balanço de ondas curtas, e por sua vez, no saldo de radiação. Assim, o albedo é influenciado pelos mesmos fatores que afetam o saldo de radiação. Segundo Hansen (1993), o coeficiente de reflexão de superfícies individuais varia com sua densidade de cobertura, cor e teor de umidade, bem como ao longo do tempo e mesmo das horas do dia, sendo função do ângulo zenital (z). Mas, estudos sobre o albedo usualmente se referem a valores de medidas realizadas em torno do meio-dia local (HANSEN, 1993; CAMPBEL; NORMAN, 1998).

2.2Balanço de energia

A energia disponível a um sistema vegetado (Rn) é utilizada para aquecimento do ar, do solo, das folhas das plantas, no processo de fotossíntese e de transpiração realizado pelas plantas e também no processo de evaporação da água das superfícies do sistema. A energia utilizada no aquecimento das estruturas das plantas (ΔA) e no processo fotossintético (ΔF) têm ínfima representatividade no total de Rn , sendo este quase que totalmente particionado entre a energia utilizada ao aquecimento do ar é conhecida como fluxo de calor sensível (H), a energia utilizada nos processos de transferência da água da superfície para a atmosfera por evaporação e transpiração, que é representada pelo fluxo de calor latente (λE) e a parte devida ao aquecimento do solo que é conhecida como fluxo de calor no solo (G) e a energia utilizada no aquecimento das estruturas das plantas. Desse modo, o balanço de energia à superfície é representado pela seguinte expressão:

$$Rn + H + \lambda E + G + \Delta A + \Delta F = 0 \quad (1)$$

O conhecimento da transferência de água de um sistema vegetado para a atmosfera é de grande importância nas mais diversas áreas do conhecimento sendo de fundamental importância na área agrícola, no que concerne ao consumo de água pelas lavouras. Neste sentido, a determinação da evapotranspiração de um cultivo (ET_c) corresponde à transferência de água para a atmosfera, sob a forma de vapor, a partir das superfícies (solo e lâminas de água livre) e das folhas das plantas dependendo, portanto, da demanda evaporativa da atmosfera e dos processos de transporte de calor e vapor que ocorrem no solo e na planta através de subcamadas situadas próximas às superfícies.

Neste sentido, a ET_c pode ser obtida pela medida da energia disponível e da determinação dos fluxos de calor sensível (H) e latente (λE) por meio do método do balanço de energia com base na razão de Bowen (BERB), que se baseia na relação do fluxo-gradiente e da transferência de massa entre a superfície e a atmosfera, bem como pelo método das correlações turbulentas ou “*EddyCovariance*” (EC) que mede diretamente os fluxos de calor latente e de calor sensível. Esses métodos têm sido amplamente aplicados em culturas como milho (STEDUTO; HSIAO, 1998), alfafa (TODD et al., 2000), café (MARIN, 2003; RIGHI, 2004), forrageira (SILVA et al., 2005), videira (TEIXEIRA et al., 2007), cana (MOURA et al., 2007; SILVA, 2009), manga (TEIXEIRA; BASTIAANSEN, 2012), entre outras.

2.2.1 Método das correlações turbulentas

A camada limite planetária (CLP) compreende uma faixa mais inferior da troposfera onde o movimento do ar é, em geral, turbulento, com a velocidade do vento apresentando intensas flutuações em todas as escalas temporais (segundos, minutos, horas, dias, etc.). Segundo Panofski (1977), sua espessura pode variar entre 1 e 3 Km durante o dia sendo condicionada por fatores como velocidade do vento, convecção e rugosidade das superfícies subjacentes. Por sua vez, a camada limite superficial (CLS) corresponde a, no máximo, 10% da CLP a partir da superfície, e é resultante de duas contribuições: primeiro, da agitação mecânica do ar, que é dependente da rugosidade da superfície e do gradiente vertical de velocidade do vento, e segundo, da convecção provocada pelo aquecimento da superfície subjacente (PANOFSKI, 1977). Isso resulta em flutuações ou turbilhões (“*eddies*”) caóticos de grande eficiência no transporte da quantidade de *momentum* calor e massa.

Os fluxos de vapor d’água e calor dentro da CLS são quase constantes com a altura desde que os seguintes critérios sejam atendidos: a) a superfície precisa ter homogeneidade

horizontal; e b) a relação $z/h < 1 < z/z_{om}$ é verdadeira, onde z_{cs} é a altura da camada superficial, h é a altura da camada limite atmosférica (CLA), e z_{om} é o comprimento de rugosidade do momentum. Quando estas condições são satisfeitas, os fluxos de vapor d'água e calor, dentro da camada superficial, podem ser escritos como:

$$\lambda E = \lambda \overline{w' \rho'_{\nu}} \quad (2)$$

$$H = \rho_a c_p \overline{w' T'} \quad (3)$$

onde λE e H são os fluxos de calor latente e sensível em $W m^{-2}$, respectivamente, λ é o calor latente de vaporização ($J kg^{-1}$), w' é o desvio instantâneo da velocidade vertical do vento do vento em relação ao valor médio ($m s^{-1}$), ρ'_{ν} é o desvio instantâneo da densidade do vapor de água em relação ao valor médio ($kg m^{-3}$), ρ_a é a densidade do ar ($kg m^{-3}$), c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($J kg^{-1} K^{-1}$), e T' é o desvio instantâneo da temperatura em relação à temperatura média T (STULL, 1988). As quantidades de $\overline{w' T'}$ e $\overline{w' \rho'_{\nu}}$ são as covariâncias entre a velocidade vertical do vento e a temperatura, e velocidade vertical do vento e a densidade de vapor, respectivamente.

Muitos métodos podem ser utilizados para mensurar ou estimar a evapotranspiração, incluindo abordagens hidrológicas, métodos micrometeorológicos e abordagens fisiológicas (RANA; KATERJI, 2000). O método da covariância dos vórtices turbulentos, também conhecido como método das correlações turbulentas ou dos fluxos turbulentos (EC), é uma técnica micrometeorológica que permite obter os fluxos de vapor de água e calor sensível por meio de medidas, em alta frequência, das flutuações na velocidade do vento, densidade de vapor d'água e temperatura do ar em uma grande variedade de sistemas ecológicos e em áreas de cultivo (SHUTTLEWORTH, 2007; DING et al, 2010). Por esse método, é possível realizar medidas de transferência de energia e massa entre sistemas vegetados terrestres e a atmosfera. Seu uso remonta algumas décadas, sendo que atualmente é um dos mais aceitos e largamente utilizado para medir fluxos de CO_2 , vapor d'água e calor sensível (BALDOCCHI, 2001; LEE et al., 2004; IBRON et al., 2007; KRISHNAN et al., 2012).

A ET é medida, de forma direta, tradicionalmente pelo método da lisimetria, no entanto, apesar da precisão em que são realizadas as medidas lisimétrica, durante o século XXI, essas foram sendo substituídos por muitas técnicas micrometeorológicas para o cálculo da ET ,

sendo o uso dos sistemas de *EC* o mais preciso (WILSON, 2002). A preferência pelo método das *EC* se deve ao fato de que o mesmo mede diretamente os fluxos de *H* e λE , permitindo a obtenção da *ETc* e do *Kc*, quando instalado em áreas de cultivo. Allen et al. (2011) afirma que a técnica das correlações turbulentas tem se tornado relativamente muito usada na mensuração da *ET* por causa da facilidade de aplicação, tanto em termos de instalações em campo quanto de processamento dos dados, pelos reduzidos custos dos sensores e pela possibilidade de co-mensurar *H*, λE , bem como fluxos de CO_2 , dependendo da configuração do equipamento utilizado.

Quando se realiza medidas do saldo de radiação (*Rn*) e do fluxo de calor no solo (*G*), o fechamento do balanço de energia pode ser examinado usando a equação do balanço de energia simplificado, desconsiderando ΔA e ΔF , como segue:

$$Rn - G = H + \lambda E \quad (4)$$

Onde *Rn* é positivo em direção à superfície e λE , *H* e *G*, são assumidos como positivos em direção à atmosfera.

No entanto, essa equação, em geral, não é totalmente satisfeita. Podem haver situações do não-fechamento do balanço de energia em sistemas de *EC*, diante do que Teixeira e Bastiaansen (2012) relatam que poucas intercomparações têm focado o papel dos esquemas de processamento de dados entre as medidas de *EC* e os métodos de fechamento de balanço em culturas irrigadas. Entretanto, essa condição tem sido verificada em outras superfícies vegetadas ao longo das décadas de estudos de *EC*, ou seja, em muitas situações ocorre o não fechamento do balanço de energia, em que a equação 3 não é satisfeita, isto é, quando a soma de $H + \lambda E$ não é igual a $Rn - G$ (BALDOCCHI et al., 1988; WILSON et al., 2002). Nessas condições, Twine et al. (2000), Wilson et al. (2002), De Bruin et al. (2005) e Foken (2006) observaram que λE e *H* podem ser subestimados com relação a $Rn - G$ em cerca de 30%. Já Oncley et al. (2007) constataram, em medidas de *EC* em diversos tipos de superfície, que o não fechamento varia muito entre os experimentos, sendo comum encontrar dados da soma $\lambda E + H + G$ representando entre 70 e 90% do valor de *Rn*.

Diante disso, correções para os dados obtidos pelo método *EC* têm sido utilizadas em diversos tipos de sistemas vegetados na tentativa de resolver o problema do não fechamento do balanço de energia pelo método *EC*. Villalobos (1997) após constatar a similaridade de erros nos valores de λE e *H* em diferentes alturas e distâncias de separação entre os sensores

do sistema *EC*, utilizou um termopar adicional acoplado ao higrômetro para determinar a perda de covariância para *H* e corrigir λE , obtendo resultados positivos. Allen (2008) relata que a carência de fechamento nos dados de *EC* pode ser resolvida pelo uso de um método simples de regressão que responde por todas as fontes de erro, assumindo-se que *Rn* é o componente que apresenta maior acurácia no balanço de energia em condições semiáridas. Assim, Teixeira e Bastiaanssen (2012) testaram três procedimentos diferentes para o fechamento do balanço de energia do método *EC* em pomares irrigados de manga no Semiárido Brasileiro com medidas adicionais de *Rn* e *G*. Alémdesses, Massman et al. (2002), Ding et al. (2010), He et al. (2010), Scott (2010) e Bilesbach (2011) também estudaram métodos de fechamento do balanço do balanço de energia por meio da *EC*.

É importante salientar, que apesar de se verificarem situações do não fechamento do balanço de energia por meio do método das correlações turbulentas ao redor de 30%, este ainda é o método mais preciso para uso na determinação dos fluxos de calor latente e sensível para aplicações em sistemas naturais e vegetados.

2.2.2 Método da razão de Bowen

O balanço de energia com base na razão de Bowen (*BERB*) é um método micrometeorológico indireto de estimativa dos fluxos de calor sensível e de calor latente por meio de medidas psicrométricas da razão de Bowen (β) (BOWEN, 1926), que, combinados com medidas de saldo de radiação (*Rn*), e fluxo de calor no solo (*G*), permite determinar a evapotranspiração (*ET*). É um método prático e relativamente confiável, que possibilita resolver a equação do balanço de energia simplificado utilizando simplesmente medidas de gradientes de temperatura do ar e pressão de vapor, dentro da camada superficial sobre a superfície evaporativa, apresentando melhores resultados quando o suprimento de água no solo não é limitante à *ET* (ALLEN et al., 2011). O método é baseado no balanço de energia, forçando o fechamento por meio do uso da relação entre os fluxos de calor latente (λE) e sensível (*H*), denominada razão de Bowen:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad (5)$$

Por essa razão, a acurácia dos valores de H e LE calculados dependem diretamente da acurácia dos valores estimados de β que, por sua vez, estão criticamente relacionados à acurácia dos valores das medidas de temperatura do ar e de bulbo úmido obtidos a cada nível de medida, os quais são utilizados para se obter os gradientes de temperatura e pressão de vapor de água.

O *BERB* tem sido amplamente utilizado em várias condições ambientais, inclusive em áreas semiáridas onde pode ocorrer advecção horizontal de calor sensível (Oliveira; Leitão, 2000). No entanto, limitações práticas e teóricas podem invalidar o *BERB* (BARR et al., 1994), de modo que, para que o método funcione bem na obtenção dos valores de da razão de Bowen, é necessário que algumas condições sejam satisfeitas. Uma delas é a equidade das difusividades turbulentas dos fluxos de calor sensível e de calor latente ($Kh/Kw=1$), proposição que pode não ser válida sob condições de advecção (VERMA ET AL., 1978, ANGUS; WATTS, 1984). Adicionalmente, os dois níveis de medida dos gradientes têm de estar dentro da camada limite ou de fluxo constante o que implica em uma extensa bordadura para garantir a ausência de gradientes horizontais de temperatura e umidade no ar e obter, assim, estimativas consistentes dos fluxos acima da superfície (ANGUS; WATTS, 1984); Por se tratar de psicrometria diferencial, as medidas têm de ser feitas em diferentes níveis de altura (FUCHS; TANNER, 1970) sendo que a forma mais comumente usada do *BERB* para medida dos fluxos usa medidas de temperatura e umidade do ar em dois níveis de altura acima da superfície, e assim sendo, cada sensor responde a uma área-fonte diferente. Por esse motivo, aplica-se a relação bordadura:altura utilizando como referência o sensor instalado no nível mais elevado do sistema *BERB*, de modo que o sensor no nível inferior fica dentro da camada de interesse (STANNARD,1997). Heilman et al. 1989, asseguram que o *BERB* funciona bem a partir de uma distância de bordadura mínima de 20:1 em relação à altura de instalação do sistema *BERB*.

Outras limitações que devem ser consideradas no que concerne a problemas encontrados nas estimativas de fluxos pelo método *BERB* estão relacionados à resolução dos sensores utilizados, à razão de Bowen quando seus valores se aproximam de -1, às dificuldades de manutenção do sistema no que se refere ao bulbo úmido, à necessidade de alternar os sensores entre os níveis de medida para evitar possíveis erros de medição, à idade e exposição dos sensores, incluindo a contaminação por poeira e teias de aranha, que podem afetar as medidas de temperatura (OHMURA, 1982; PEREZ et al., 1999; SILVA, 2009; ALLEN et al., 2011). Os dois primeiros autores supracitados descreveram erros relativos

associados ao método *BERB*, bem como técnicas que se baseiam na precisão de medida da temperatura e pressão de vapor para análise da qualidade dos dados. Silva (2009) e Soares, 2007 ressaltam que, a depender do método de aceitação ou rejeição dos valores de β e de atenuação dos efeitos advectivos, podem ser constatadas diferenças nos resultados de estimativa dos fluxos, o que aponta para a importância de se obter medidas representativas de R_n e G da área experimental e conhecer o erro de medição dos sensores, especialmente dos psicrômetros, os quais apresentam grande relevância para a obtenção dos gradientes de temperatura e pressão de vapor (RIGHI et al., 2007). Linkosalo et al. (1996) consideram um erro de 5% como aceitável enquanto Angus e Watts (1984) assumem valor em torno de 4% de erro nas medições de R_n . Perez et al., (1999) e Azevedo et al. 2003 concordam em valores de $|0,02|$ kPa e $|0,05|$ °C, para avaliar as medições da pressão de vapor e temperatura respectivamente.

Diante disso, constata-se que o *BERB* é um método muito exigente em cuidados antes da instalação, no que se refere à definição do local, a fim de atender às exigências de *fetch* e altura dos sensores; durante a condução do experimento, para garantir dados confiáveis da temperatura psicrométrica, necessitando de manutenções constantes no psicrômetro, alternância entre os sensores dos dois níveis e elevação dos mesmos com o desenvolvimento da cultura; e, posteriormente, na fase de processamento e análise dos dados, quando se faz necessária a aplicação de critérios para se selecionar dados consistentes (SILVA, 2009).

Dentre as vantagens que o método apresenta, destacam-se a de que o método apresenta simplicidade na instalação e manutenção dos sensores, a possibilidade de estimativa de fluxos em curtos intervalos (de até 5 min), além de apresentar resultados confiáveis, quando comparados com os métodos *EC* e de balanço de água no solo (UNLAND et al., 1996; ZHANG et al., 2008), diante do que o *BERB* tem sido amplamente utilizado em muitos estudos voltados para a determinação do consumo de água pelas mais diversas culturas agrícolas e sido recomendado a sua utilização na comparação da precisão de outros métodos de estimativa dos fluxos em diferentes superfícies por muitos autores.

Diversos estudos micrometeorológicos têm utilizado o método *BERB* visando o conhecimento da interação da cana de açúcar com a atmosfera e, por conseguinte, a demanda de água da cultura. O método foi utilizado por Inman-Bamber e McGlinchey (2003) com o objetivo de se avaliar os valores de K_c para a cana de açúcar cultivada na Austrália em relação aos valores definidos no boletim 56 da FAO; Moura et al. (2007) realizaram estudo com balanço de energia em cana de açúcar irrigada por sulcos no Semiárido brasileiro e

verificaram que o fluxo de calor latente correspondeu a 82% do saldo de radiação ao longo do ciclo de cana planta, e que a relação entre o saldo de radiação e o fluxo de calor latente varia com o desenvolvimento da cultura. Para este estudo foi utilizado o método *BERB*, também aplicado por Mota (2010) para determinar a evapotranspiração e o coeficiente de cultivo da cana de açúcar na região de Paraipaba, Ceará; e por Silva et al. (2011) para analisar as variações nas magnitudes e nas partições dos componentes do balanço de radiação e de energia para a cana de açúcar no semiárido brasileiro.

2.3 Evapotranspiração e coeficiente de cultura da cana de açúcar

A preocupação global em se obter energia “limpa” e de fontes renováveis provocou um aumento na demanda por bioenergia o que, por sua vez, teve grande impacto sobre o uso da água pelo setor agrícola. Nesse contexto, o Brasil se apresenta como um país com significativo potencial hídrico e bioenergético, sendo o maior produtor mundial de cana de açúcar e segundo maior produtor de etanol (KATYWADA et al., 2012). Na região Semiárida brasileira, contextualizando a região do Submédio do Vale do Rio São Francisco, que se destaca pelo seu potencial em agricultura irrigada, a cana de açúcar é cultivada sob irrigação plena devido às peculiaridades climáticas locais em termos de precipitação pluviométrica. Silva (2009), ressalva que a produtividade satisfatória da cultura nesta região se deve a técnicas utilizadas no manejo de irrigação.

No entanto, para se conseguir uma boa distribuição de sistema de irrigação e conseqüente melhora no manejo dos mananciais hídricos, se faz necessária a obtenção de acuradas estimativas de consumo de água pela cultura (INMAN-BAMBER; MC GLINCHEY, 2003), que comumente se faz por meio da obtenção de medidas de evapotranspiração, processo que consiste na combinação de dois outros processos pelo qual a água é transferida para a atmosfera, sob a forma de vapor, a partir da superfície do solo por meio da evaporação e a partir da cultura pelo processo de transpiração (ALLEN, 1998).

De acordo com Silva (2009), a evapotranspiração da cana de açúcar pode ser influenciada por fatores inerentes às condições ambientais, às técnicas agrícolas, ao sistema de irrigação, ao período de plantio, bem como à idade do corte e às cultivares. Por estes motivos, é comum encontrar diferentes valores de requerimento hídrico da cultura. Adicionalmente, o sistema de produção da cana de açúcar pode ser afetado por fatores

relacionados à planta, como tipos de cultivares e ciclo de produção; às variáveis ambientais locais, como temperatura do ar, radiação solar e precipitação; ao solo, como tipo e fertilidade; e às práticas culturais, como época e densidade de plantio (GILBERT et al., 2006).

No que concerne à demanda de água, pela cana de açúcar, Doorenbos; Kassam (1979) afirmam que o requerimento hídrico da cultura está entre 1500 mm e 2500 mm; Farias et al. (2008), avaliando a eficiência do uso de água da cana de açúcar cultivada na região dos Tabuleiros Costeiros do município de Capim, PB, verificaram que a maximização do uso eficiente de água para a variedade SP 79-1011 pode ser obtida com a lâmina de 1276 mm; Silva et al. (2011; 2012), em estudo realizado para cana-soca irrigada por sulcos sob as condições semiáridas do Submédio do Vale do São Francisco, constataram requerimento hídrico de 1695,1 mm para a variedade RB 92579. Dessa forma, com base nesses e em outros estudos, percebe-se que o requerimento hídrico da cana de açúcar pode variar em função de diversos fatores, e que sua determinação em nível local, é necessária para uso mais eficiente da água de irrigação, bem como para redução dos impactos negativos do manejo inadequado da irrigação na planta, no solo e seus impactos sobre os custos operacionais.

Em se tratando de evapotranspiração da cultura (ETc) e coeficiente de cultivo (Kc), Silva (2009b) observou que os valores de ETc e de Kc da cana de açúcar irrigada, no ciclo cana-soca, sob condição semiárida do Submédio do Vale São Francisco, foram ligeiramente inferiores aos recomendados no boletim 56 da FAO. Gonçalves (2010) constatou, no município de Piraipaba, CE, ETc acumulada igual a 1.074,1 mm, com valores máximos da ordem de 6,6 mm d⁻¹ ocorrendo na fase intermediária de crescimento da cana de açúcar. Nesse estudo, os valores de Kc foram iguais 0,23, 1,03 e 0,50, para as fases de crescimento inicial, intermediária e final da cana de açúcar, respectivamente.

Em termos de eficiência de produção, Silva et al. (2012) verificaram que a cana de açúcar irrigada por sulcos apresentou produção de 9,49 kg de colmos, 1,22 kg de açúcar e 875,23 ml de álcool por metro cúbico de água evapotranspirada pela cultura (ETc), enquanto apresentou eficiência de produção de 5,36 kg de colmos, 0,69 kg de açúcar e 494,14 ml de álcool por metro cúbico de água que entrou na área de cultivo por precipitação e irrigação ($P + I$).

CAPÍTULO 1

BALANÇO DE RADIAÇÃO EM UM CULTIVO CANA DE AÇÚCAR IRRIGADA NO SUBMÉDIO DO VALE SÃO FRANCISCO

Resumo: O objetivo desse estudo foi analisar a variação diária e sazonal dos componentes do balanço de radiação em um cultivo de cana de açúcar irrigado por gotejamento subsuperficial sob as condições climáticas do Submédio do Vale São Francisco. Para isso, medidas da radiação solar global incidente, radiação refletida, saldo de radiação e componentes derivados do balanço de radiação, como o albedo e o coeficiente de transmissividade (Kt), foram obtidos em um experimento com cana de açúcar, variedade RB 92 579, em Juazeiro-BA, e analisados para um dia de pleno sol e um dia nublado em diferentes fases de desenvolvimento da cultura, bem como ao longo do ciclo de cultivo de cana-soca, no período de novembro de 2010 a outubro de 2011. Durante todo ciclo de cultivo, a cana de açúcar se desenvolveu em um ambiente cuja temperatura média do ar foi igual a 25,1 °C, a umidade relativa equivalente a 74% e velocidade do vento de 1,7 ms⁻¹. Durante o ciclo de cultivo a radiação solar global incidente variou entre 22,15, 21,95, 19,46 e 22,49 MJ m⁻², para as fases I, II, III e IV, para as quais o saldo de radiação representou, em média, 58, 65, 62 e 59%. A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) incidente sobre o dossel da cana de açúcar totalizou 2.948,99 MJ m⁻², representando em média, 44,26% da Qg (6.662,82 MJ m⁻²). O total de RFA que alcançou o solo durante o ciclo produtivo foi 457,11 MJ m⁻², sendo que 93% deste valor foi verificado das Fases I e II, ou seja, nas fases de brotação, estabelecimento e perfilhamento. Os eventos de chuva e de irrigação, a sazonalidade da radiação global em conjunto com o nível de cobertura do solo influenciaram nos componentes do balanço de radiação e no albedo da cana de açúcar, que apresentou valor médio igual a 23%. Em termos diários, condições de nebulosidade influenciaram os componentes do balanço de radiação, com exceção da irradiância de ondas longas pela superfície em condições de plena cobertura do solo, e em menor escala o albedo, que demonstra também dependência do ângulo de inclinação solar.

Palavras-chave: saldo de radiação, albedo, radiação solar, semiárido, *Saccharum spp.*

RADIATION BALANCE ON IRRIGATED SUGARCANE IN THE SUBMIDDLE SAN FRANCISCO VALLEY

Abstract: The aim of this study is to analyze the daily and seasonal variation of the components of the radiation balance in a growing sugar cane irrigated under the climatic conditions of the Lower Basin of the San Francisco Valley. For this purpose, measurements of solar radiation incident, reflected radiation, net radiation and other components of the radiation balance obtained in an experiment with cane sugar variety RB 92579 in Juazeiro-BA, and analyzed for a sunny day and a cloudy day at different stages of crop development, as well as along the cultivation cycle of ratoon cane, from November 2010 to October 2011. Throughout the crop cycle, the cane sugar was produced in an environment where the average air temperature was equal to 25.1 ° C, relative humidity equal to 74% and wind speed of 1.7 ms⁻¹. The global solar radiation incident ranged from 22.15, 21.95, 19.46 and 22.49 MJ m⁻², for stages I, II, III and IV, for which the net radiation was on average 58, 65, 62 and 59%. The PAR incident on the canopy of cane sugar totaled 2948.99 MJ m⁻², representing on average 44.26% of Q_g (6662.82 MJ m⁻²). The total RFA that reached the ground during the production cycle was 457.11 MJ m⁻², with 93% of this value was observed in Phases I and II, ie, the stage of budding, establishment and tillering. Rainfall and irrigation, the seasonality of global radiation in conjunction with the level of cover soil influenced the components of net radiation and albedo of cane sugar, which had an average value of 23%. In everyday terms, cloudy conditions influenced the components of the radiation balance, with the exception of long-wave irradiance at the surface conditions of full ground cover, and to a lesser extent the albedo, which also shows dependence on solar inclination angle.

Keywords: Net radiation, albedo, solar radiation, semiarid, *Saccharum spp.*

1. INTRODUÇÃO

A cana de açúcar (*Saccharum* sp.) é uma gramínea de grande importância econômica para o Brasil, que é atualmente o maior produtor mundial, com 10,56 milhões de hectares cultivado e produção de mais de 670 milhões toneladas de colmos em 2012 (IBGE, 2013). No entanto, devido à elevada demanda por produtos oriundos da cana de açúcar, os limites de suas fronteiras agrícolas têm sido ampliados em várias regiões do país, inclusive no Semiárido brasileiro. Dessa forma, a indústria canavieira tem se instalado em diversas regiões do Brasil,

nas quais o desenvolvimento da cultura tem experimentado diversidade em termos de solo e clima, de maneira que em algumas áreas é possível encontrar condições ideais para sua produção, ao passo que em outras podem ocorrer restrições térmicas e, ou hídricas moderadas ou limitantes, exigindo ajustes no sistema de produção para viabilização de seu cultivo.

De modo geral, o clima, e mais especificamente, temperatura, radiação solar e precipitação (disponibilidade de água), são as variáveis que mais influenciam no crescimento, na produtividade e na qualidade da cana de açúcar. De acordo com Marin et al. (2009), a temperatura é um dos fatores mais importantes para a produção desta cultura, sendo a faixa de 26 a 33°C considerada ótima para seu desenvolvimento. No que se refere à radiação solar, sob condições de disponibilidade de água no solo e elevada temperatura, a cana de açúcar tem alta eficiência na conversão de energia radiante em energia química, apresentando bom crescimento em ambientes com radiação diária variando entre 18 e 36 MJ m⁻², sendo que o total de radiação necessário a um cultivo de cana de açúcar recebe durante um ciclo de 12 meses é igual a 6350 MJ m⁻² (RAMANUJAM; VENKATARAMANA, 1999).

Sob as condições climáticas do Semiárido brasileiro é possível plantar cana de açúcar durante todo ano e obter maiores produtividades do que em outras regiões, pois a disponibilidade de energia associada ao uso da irrigação e fertirrigação proporciona melhor desenvolvimento das plantas, maior produção e um produto de melhor qualidade (ANDRADE JUNIOR et al., 2012). Entretanto, essas características estão associadas, dentre outros fatores, a um aumento na produção de biomassa e na evapotranspiração da cultura, que para serem melhor estudados e compreendidos, é essencial se conhecer o balanço de radiação e a contribuição de cada um dos seus componentes.

O saldo de radiação é considerado o principal parâmetro utilizado em muitos métodos de determinação da perda de água da superfície para a atmosfera (CAMPBELL; NORMAN, 1998; OLIVEIRA; LEITÃO, 2000; PILAU et al., 2007) e seu valor é dependente dos componentes do balanço de radiação. A razão entre a radiação solar refletida e a radiação solar incidente é conhecida como albedo (r), que é determinante nos valores do balanço de ondas curtas, e por sua vez, no saldo de radiação. Assim, além de se conhecer os componentes do balanço de radiação, também é extremamente importante que sejam estudados alguns parâmetros dele derivados, como o albedo. Por outro lado, a cultura utiliza a radiação fotossinteticamente ativa (*RFA*) para seu crescimento e desenvolvimento, de forma que vários estudos têm relacionado a interceptação da *RFA* com o índice de área foliar (FERREIRA JÚNIOR et al., 2012; ANDRÉ et al., 2010) e, ou a produção de biomassa (SINGELS;

SMITH, 2002; ROBERTSON et al., 1999; ZHOU, 2003;), sendo conhecido como uso eficiente da radiação. Essas informações são muito importantes em estudos de análise de crescimento de plantas, em associação de variedades com ambientes de produção, assim como para o manejo eficiente da água de irrigação, e podem variar em função de vários fatores: variedades, tipo de solo, disponibilidade de água, sistema de irrigação e características climáticas, dentre outros.

Em função de sua importância para o setor agrícola e energético nacional, é necessário se conhecer como essa cultura interage com o meio para que haja maior eficiência de conversão dos recursos naturais em biomassa. Desse modo, levando em conta a escassez de informações sobre a interação da cultura com a atmosfera no semiárido brasileiro, bem como sobre seu crescimento e a real vulnerabilidade do sistema de produção no tocante às relações hídricas e ambientais, especialmente sob as condições irrigadas do semiárido brasileiro, este estudo visa analisar a variação diária e sazonal dos componentes do balanço de radiação em um cultivo de cana de açúcar irrigado sob as condições climáticas do Submédio do Vale São Francisco.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área experimental e instrumentação utilizada

Este estudo foi conduzido em um canal irrigado pertencente à empresa Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A. – Agrovale (latitude 09°26' S; longitude 40°19' W e altitude de 396 m acima do nível médio do mar), no município de Juazeiro, Bahia, no Submédio do Vale São Francisco. Segundo a classificação climática de Köppen, esta região apresenta clima do tipo BSw^h, caracterizado por clima quente de semiárido, chuvas de verão e irregulares, com temperaturas médias anuais superiores a 18°C e ausência de excedente hídrico, o que confere à esta região a necessidade de utilização de irrigação para suprir a necessidade hídrica das culturas (SEI, 1998).

Foi utilizada a variedade de cana de açúcar RB 92 579, cultivada em um Vertissolo, em espaçamento duplo de 1,3 m por 0,7 m, irrigada por gotejamento subsuperficial, com gotejadores enterrados a 0,20 m de profundidade (Fig. 1). O estudo foi realizado no ciclo de

cana-soca, no período de 19 de novembro de 2010 a 25 de outubro de 2011, totalizando 347 dias após a última colheita (DAC).

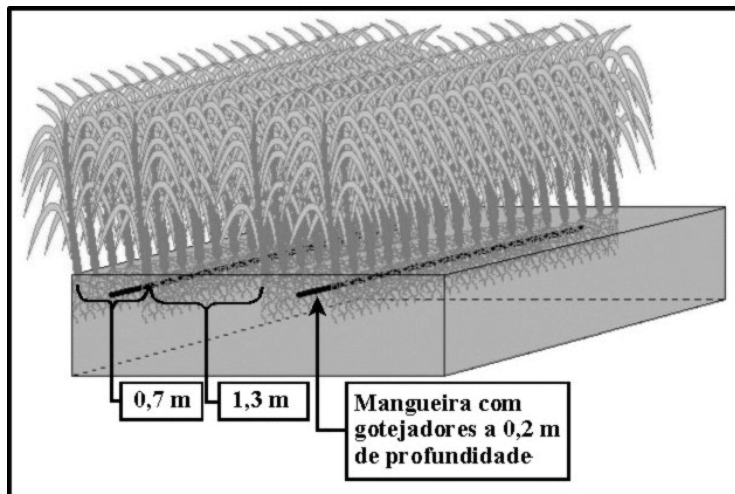


Figura 1. Espaçamento de plantio e disposição das mangueiras de irrigação na área de cultivo cana de açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial, Juazeiro-BA

Os componentes do balanço de radiação foram medidos por meio de um saldo radiômetro, modelo CNR1 (KippeZonen INC, NY, USA), instalado a 8,0 m da superfície do solo. A quantificação do nível de cobertura do solo, índice de área foliar e fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada foram medidos por dois tipos de sensores de radiação quantum, sendo um pontual, modelo LI-190, instalado no topo da torre e dois sensores quantum lineares (modelo LI-191) posicionados na superfície do solo (abaixo do dossel da cultura). Também foram realizadas medidas de temperatura e de umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação e temperatura do solo. A aquisição e armazenamento dos dados foram feita por meio de um micrologger modelo CR23X (Campbell Scientific INC, Logan, Utah, USA), programado para realizar leituras a cada minuto e registrar a média dos dados a cada 30 minutos.

As irrigações foram realizadas com base na evapotranspiração de referência, exceto para os dias de chuva, determinada segundo o método de Penman-Monteith padronizado pela FAO (ALLEN et al., 1998) e no valores de coeficiente da cultura (K_c) determinados por Silva (2009). A Figura 2 mostra a variação de água no solo ao longo do ciclo de cultivo, bem como o conteúdo de água no solo. Nota-se picos de variação positiva de água no solo concomitantes com os eventos de precipitação mais expressivos seguidos de posterior variação negativa devido a suspensão da irrigação posteriormente aos dias de chuva.. As irrigações foram

realizadas em frequência diária, com exceção dos dias em que houve precipitação, até os 307 DAC , quando então a irrigação foi suspensa visando proporcionar a maturação fisiológica da planta e, conseqüentemente, aumento da concentração de sacarose nos colmos. A lâmina de água aplicada por irrigação foi da ordem de 1496,8 mm, enquanto o total precipitado foi 189,8 mm, totalizando 1686,6 mm de água. Os principais eventos de chuva ocorreram em dezembro de 2010 e em fevereiro de 2011, compreendendo as fases F1 e F2 do ciclo de cultivo..

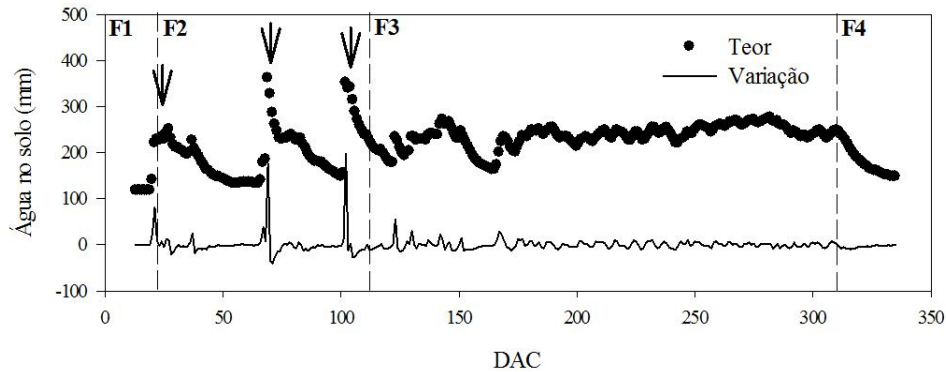


Figura 2. Totais diários da lâmina de irrigação e precipitação pluviométrica durante o ciclo de cana-soca da variedade RB 92579 irrigada por gotejamento subsuperficial no Submédio do Vale São Francisco, Juazeiro – BA. As setas apontam os eventos mais expressivos de precipitação pluviométrica.

2.2 Componentes do balanço de radiação

A determinação do saldo de radiação (Rn) é representada pela expressão como segue:

$$Rn = BOC + BOL \quad (1)$$

em que Rn é o saldo de radiação, BOC é o balanço de radiação de ondas curtas e BOL é o balanço de radiação de ondas longas. O balanço de radiação de ondas curtas, obtido pela diferença entre a radiação solar de ondas curtas incidente sobre a superfície (radiação solar global) e a radiação de ondas curtas refletida pela superfície do sistema, que foi calculado pela seguinte equação:

$$BOC = Qg + rQg \quad (2)$$

em que Qg é a radiação solar global incidente, em e rQg é a radiação solar de ondas curtas refletida pela superfície, em.

A rQg depende da capacidade de reflexão de parte da radiação de ondas curtas pela superfície, que é conhecida como albedo (r) ou coeficiente de reflexão, e que foi obtida pela razão entre a radiação refletida (rQg) e a radiação solar global (Qg) conforme a expressão a seguir:

$$r = \frac{rQg}{Qg} \times 100 \quad (3)$$

em que r é dado em porcentagem (%).

O balanço de radiação de ondas longas (BOL) foi obtido pela diferença entre o fluxo de radiação de ondas longas da atmosfera que é emitido para a superfície e o fluxo de radiação de ondas longas emitido pela superfície em direção à atmosfera, dado pela equação:

$$BOL = Qa - Qs \quad (4)$$

em que Qa é a radiação de ondas longas incidente sobre a superfície, e Qs é a radiação de ondas longas refletida pela superfície.

A unidade utilizada para todos os fluxos de radiação foi em $W\ m^{-2}$ quando se referirem a medidas obtidas a cada 30 minutos e $MJ\ m^{-2}$, para os totais diários. Convencionou-se que os fluxos de radiação em direção à superfície são positivos, enquanto os que são emitidos em direção à atmosfera negativos.

Além dos componentes do balanço de radiação, também foi calculada a transmissividade atmosférica (Kt) com base na razão entre os fluxos integrados da radiação de solar global incidente à superfície (Qg) e no topo da atmosfera (Qo), conforme equação a seguir:

$$Kt = \frac{Qg}{Qo} \quad (5)$$

em que Kt é a transmissividade atmosférica (adimensional), Qg é radiação solar incidente à superfície e Qo é a irradiância no topo da atmosfera (Vianello e Alves,1991), com base na latitude local, declinação solar e ângulo horário.

Conforme em estudos de Escobedo et al. (2009), foram utilizados os dados de Kt para identificação das condições de cobertura de céu, adotando-se: $Kt < 0,35$ para céu nublado; $0,35 \leq Kt < 0,55$, para céu parcialmente nublado; $0,55 \leq Kt \leq 0,65$, para a condição de céu parcialmente aberto; e $Kt > 0,65$ para céu aberto ou ensolarado.

Para cada fase de desenvolvimento da cana de açúcar foi analisado o comportamento dos componentes do balanço de radiação ao longo de um dia de céu aberto e um dia de céu nublado ou parcialmente nublado, com exceção da fase III, para a qual foram observados dois dias ensolarados e dois dias de céu nublado (ou parcialmente nublados), devido sua maior duração (09 de março a 20 de setembro de 2011). Adicionalmente, foi feita a análise dos parâmetros ao longo do ciclo de cultivo em termos de valores médios diários. Assim, a determinação do saldo de radiação foi obtida com base na obtenção detalhada de cada componente, como segue:

$$Rn = Qg + rQg + Qa + Qs \quad (6)$$

2.3 Cobertura do solo, fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada e índice de área foliar

Com base nos dados medidos de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foi determinado o nível de cobertura do solo (NCS) ou a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada ($fRFA_i$) pelo dossel da cana de açúcar utilizando-se a equação 7 (GOWER et al, 1999):

$$fRFA_i = 1 - \frac{RFA_b}{RFA_t} \quad (7)$$

em que RFA_t é a radiação fotossinteticamente ativa incidente no topo do dossel e RFA_b corresponde a radiação fotossinteticamente ativa que alcança a superfície do solo. Os dados medidos da radiação fotossinteticamente ativa a cada 30 minutos, em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, foram convertidos em totais diários (MJ m^{-2}) e utilizados para o cálculo diário de sua fração interceptada ($fRFA_i$), bem como do seu valor médio para o período de estudo.

Para a determinação do IAF , foi utilizada a metodologia proposta por Silva (2009), utilizando seis amostras de folha da cana de açúcar, que foram analisadas no Laboratório de

Ecofisiologia Vegetal da Embrapa Semiárido, utilizando-se um integrador de área foliar, modelo LI-3000 (Li-Cor, US). Os dados de *IAF* foram correlacionados com o número de dias após a colheita (*DAC*) a fim de se obter um modelo matemático para estimar o seu valor ao longo do ciclo de cultivo.

Para análise estacional dos componentes do balanço de radiação ao longo do ciclo, foram considerados quatro estádios de desenvolvimento, recomendado pela FAO (ALLEN et al., 1998) para a cultura da cana de açúcar, definidos com base em observações biométricas realizadas em campo, de acordo com metodologia descrita em Silva (2009). Dessa forma, foram delimitadas os seguintes subperíodos fenológicos: Fase I - da brotação ao estabelecimento, que correspondeu a um período de 21 dias após a colheita (*DAC*) do ciclo anterior; Fase II - do estabelecimento da planta ao perfilhamento, ocorrido entre 22 e 111 *DAC* (90 dias); Fase III – referente ao período de máximo crescimento vegetativo, compreendido entre os 112 e 306 *DAC* (195 dias) e Fase IV - correspondente à maturação fisiológica, que ocorreu entre os 307 e 347 *DAC* (41 dias).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Condições meteorológicas

Na Figura 3 (A, B e C) estão apresentados os valores médios diários da temperatura do ar (*Tar*), em °C, umidade relativa do ar (*UR*), em % e velocidade do vento (*Vv*), em m s^{-1} medidos sobre o dossel da cana de açúcar irrigada, durante o ciclo de primeira soca. Percebe-se que no início do ciclo, os valores de *Tar* média diária variou entre 27 e 29 °C e posteriormente reduziu-se para 24,6 °C, enquanto a *UR* apresentou valores variando de 53% nos dias mais secos a valores próximos de 90% em dias com ocorrência de precipitação pluviométrica ao final da Fase I, quando ocorreram cerca de 22mm de precipitação. Verifica-se ainda que a velocidade média diária do vento mostrou-se um pouco mais elevada no início do ciclo ($4,4 \text{ m s}^{-1}$), mas que reduziu para $1,82 \text{ m s}^{-1}$ devido a ocorrência de chuva. Nesta fase, que corresponde ao período de brotação e estabelecimento da cultura, as condições climáticas foram favoráveis ao bom desenvolvimento da cana de açúcar, o que também foi constatado ao longo das demais fases produtivas da cultura.

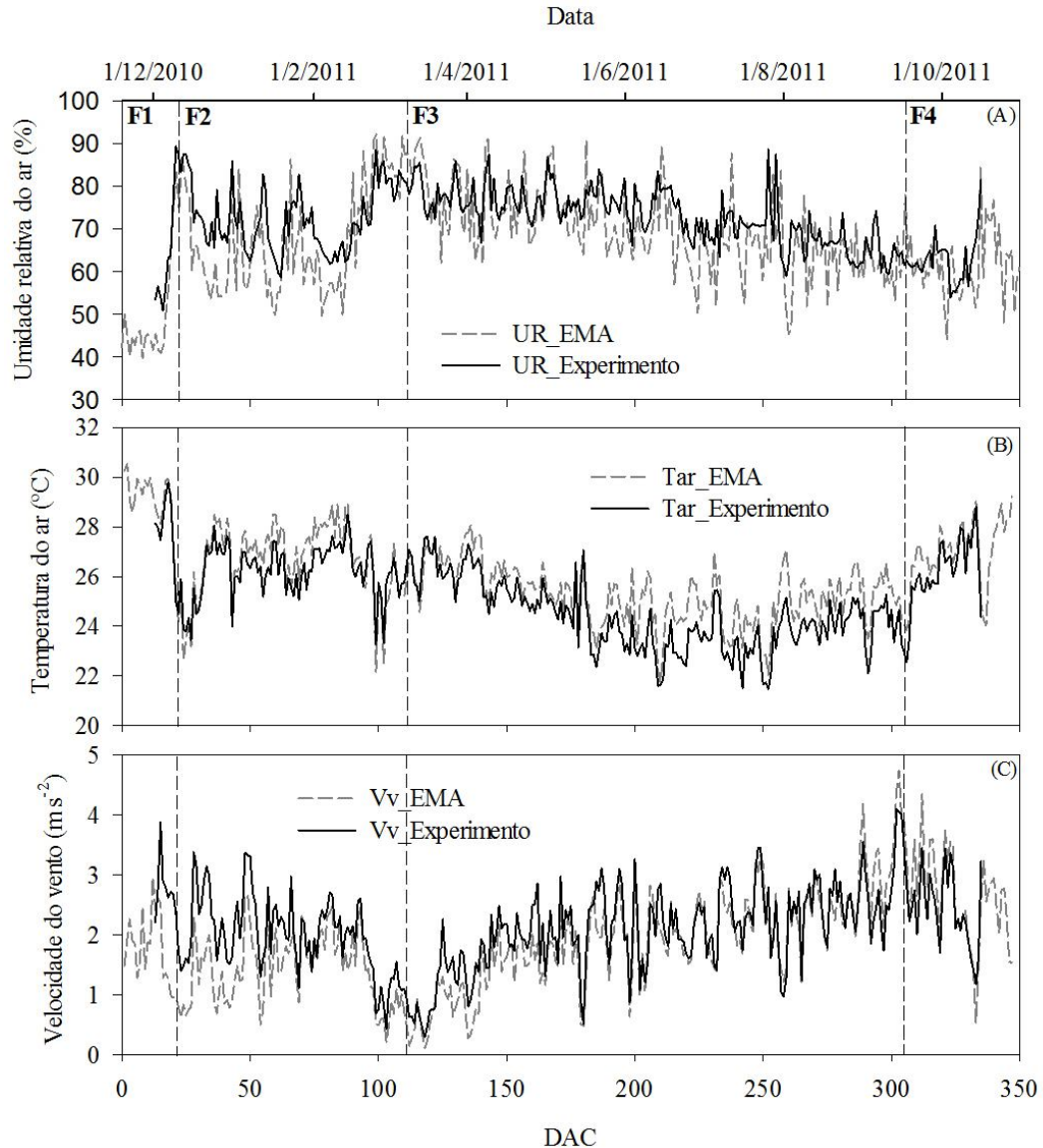


Figura 3. Média diária da temperatura (Tar , °C) e umidade relativa do ar (UR , %) (a) e velocidade do vento ($m s^{-1}$) EMA e também sobre o dossel da cana-soca da variedade RB 92579 irrigada por gotejamento subsuperficial no Submédio do Vale São Francisco, Juazeiro-BA.

Os valores de Tar e UR apresentaram grandes oscilações no estabelecimento e perfilhamento da cana (Fase II), quando ocorreram dias com Tar média igual a 22,9 °C e outros com valor médio de 28,8 °C. No que concerne à UR , verificou-se que seus valores variaram entre 59% e 87%. As variações nos valores percebidas na Figura 3A se devem a presença de nebulosidade e frequente ocorrência de eventos de precipitação, que totalizaram 112,8mm na Fase II, e velocidade do vento média igual a 2,3m s⁻¹. Com isso, verificou-se que o manejo de irrigação foi ajustado, e a irrigação foi praticamente suspensa nesse período.

A fase de máximo crescimento vegetativo (Fase III), que ocorreu entre março e setembro de 2011, foi caracterizada por uma curva decrescente da T_{ar} até o final de julho, quando alcançou 21,5 °C, mas que voltou a aumentar, atingindo um máximo ao redor de 29 °C. Na Fase III, os valores médios da T_{ar} , UR e Vv foram, respectivamente, iguais a 24,1 °C, 76,6% e 2,6 m s⁻¹. Esse período é marcado pela passagem do outono e inverno, quando ocorrem os menores valores de temperatura do ar na região de estudo, e também parte do período seco, caracterizado pela ocorrência de eventos de chuva com baixos valores, mas que totalizaram 42,6 mm.

Na fase de maturação (Fase IV), foi observada uma ascensão nos valores médios diários da temperatura do ar, que variaram de 24,3 °C a 28,5 °C, com média de 26,4 °C para o período, que apesar da irrigação estar suspensa, observou-se um leve aumento da umidade relativa do ar, que passou de 53% para quase 80%, quando então ocorreram dois eventos de precipitação iguais a 1,2 mm cada. Assim, durante todo ciclo de cultivo, a cana de açúcar foi cultivada em um ambiente cuja temperatura média do ar oscilou em torno de 25,1 °C, a umidade relativa equivalente a 74% e velocidade do vento de 1,7 ms⁻¹.

As marchas diárias da radiação solar ocorrida no topo da atmosfera (Q_o) e na superfície vegetada (Q_g) entre dezembro de 2010 e outubro de 2011 da área experimental cultivada com cana de açúcar, apresentaram uma sazonalidade destes parâmetros, cujos valores máximos ocorreram nos meses de verão enquanto os mínimos no inverno. Assim, no dia 23 de junho/2011 foi determinado que o valor de Q_o foi igual a 25,75 MJ m⁻², enquanto em 25 de dezembro/2011 foi de 43,35 MJ m⁻² (Figura 4A). Verificou-se, também, que o valor diário de transmissividade atmosférica ou coeficiente de claridade (Kt) (Figura 4B), seguiu as variações correspondentes à radiação solar global à superfície (Q_g), apresentando variação entre 23,17 e 83,03%, cujo valor médio ocorrido durante o ciclo de cultivo foi de 59,41%. Dos 323 dias avaliados, somente 3,1% foram caracterizados como dias de céu nublado, enquanto 33,4% (108 dias) corresponderam a dias de céu claro, com Kt maior do que 0,65; 32,8% equivaleram a dias parcialmente nublados e 30,7% de dias parcialmente abertos. Portanto, 64,1% do total de dias analisados, foram considerados dias de céu parcialmente aberto e aberto.

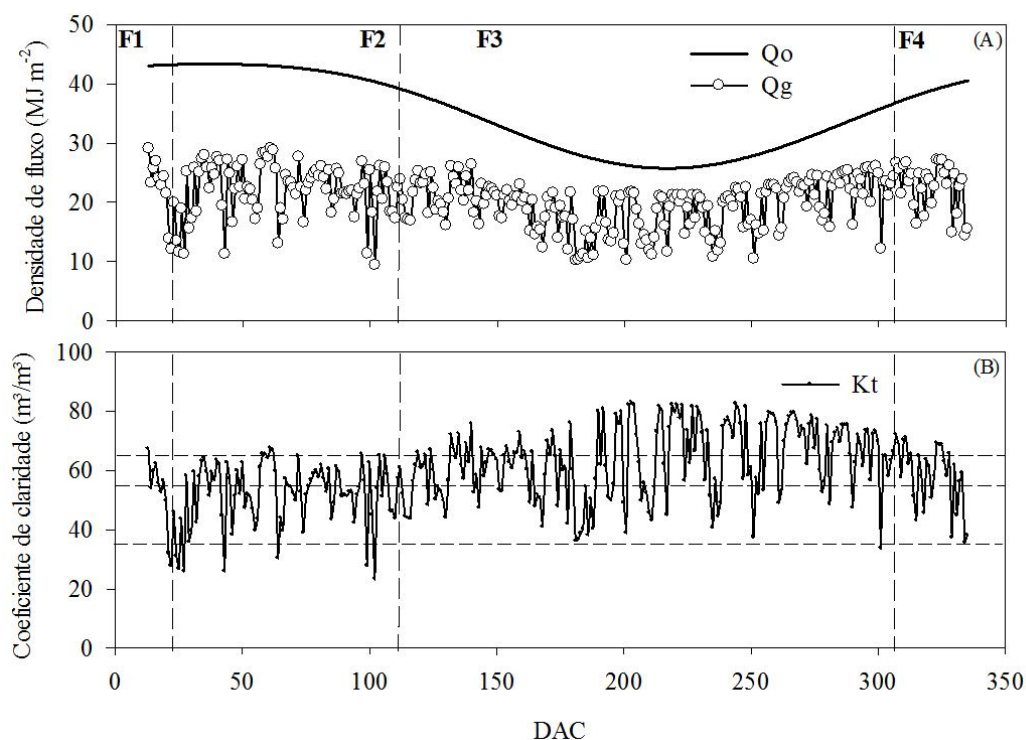


Figura 4.(A) Radiação solar diária no topo da atmosfera (Q_0) e à superfície (Q_g) e (B) coeficiente de clareza (K_t) na área de cultivo da cana de açúcar variedade RB 92579 irrigada por gotejamento subsuperficial no Submédio do Vale São Francisco, Juazeiro-BA.

Assim, de acordo com os dados de K_t , foram selecionados os dias ensolarados (S), que constituíram os 13 DAC (fase I), 35 DAC (fase II), 139 e 256 DAC (fase III), 310 DAC (fase IV), respectivamente com K_t iguais a 72%, 69%, 75%, 80% e 71%; e nublados ou parcialmente nublados (N) corresponderam aos 25 DAC (fase I), 43 DAC (fase II), 162 e 271 DAC (fase III) e 328 DAC (fase IV). Estes dias foram utilizados nas análises diárias dos componentes do balanço de radiação.

3.2 Indicadores agrometeorológicos de desenvolvimento da cultura

A fim de obter os índices que relacionassem as condições ambientais com o desenvolvimento da cultura, foram realizadas medidas da radiação fotossinteticamente ativa acima (RFA_t) e abaixo (RFA_b) do dossel da cana de açúcar, bem como da RFA interceptada pela cultura (RFA_i) ao longo de seu ciclo produtivo (Figura 5 A e B), enquanto a Figura 5C apresenta o comportamento da temperatura média do solo (T_{solo}) a 2 cm de profundidade.

Na fase de brotação e estabelecimento da planta (Fase I), os valores de RFA_t e RFA_b se apresentaram bastante próximos entre si, com média igual a $463,64 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $455,25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente, representando frações de 0,45 e de 0,44 entre estas radiações e a radiação solar global incidente na área em estado. Ao longo dessa fase fenológica incidiu um total de $110,16 \text{ MJ m}^{-2}$ de RFA sobre o dossel da cana, tendo cerca de 21% deste valor sido interceptado. Porém, o comportamento da interceptação de radiação cresceu do início ao final desta fase (Figura 5B). Contudo, a temperatura do solo apresentou um comportamento decrescente em decorrência dos elevados valores médios da RFA_t (Figura 5A) em função de não ter ocorrido irrigação (Figura 1), cujos valores decresceram de 34°C para 25°C (Figura 5C). Com o crescimento da cultura sendo beneficiado pelos elevados valores de radiação solar, temperatura do ar e ocorrência de chuva, a fase de estabelecimento e perfilhamento (Fase II) foi marcada pela grande redução de RFA_b , cujos valores passaram de $400,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para $30,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 5A) tendo a média sido da ordem de $164,39 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, enquanto o valor medido da RFA_t foi de $451,27 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Esses valores mostram o comportamento da interceptação de energia pela cultura, que apresentou uma tendência crescente nessa fase de desenvolvimento (Figura 5B), cujo valor acumulado RFA_i foi de $654,89 \text{ MJ m}^{-2}$. No que concerne a temperatura do solo, constatou-se que a chuva ocorrida na área de estudo, fez com que esse parâmetro alcançasse valores da ordem de 25°C como no final da Fase I, mas que tenderam a aumentar devido à redução do conteúdo de água no solo, bem como do aumento da RFA_t . Porém, com o aumento da interceptação de radiação pela cultura, a temperatura do solo tendeu a decrescer até o final da Fase II (Figura 5C).

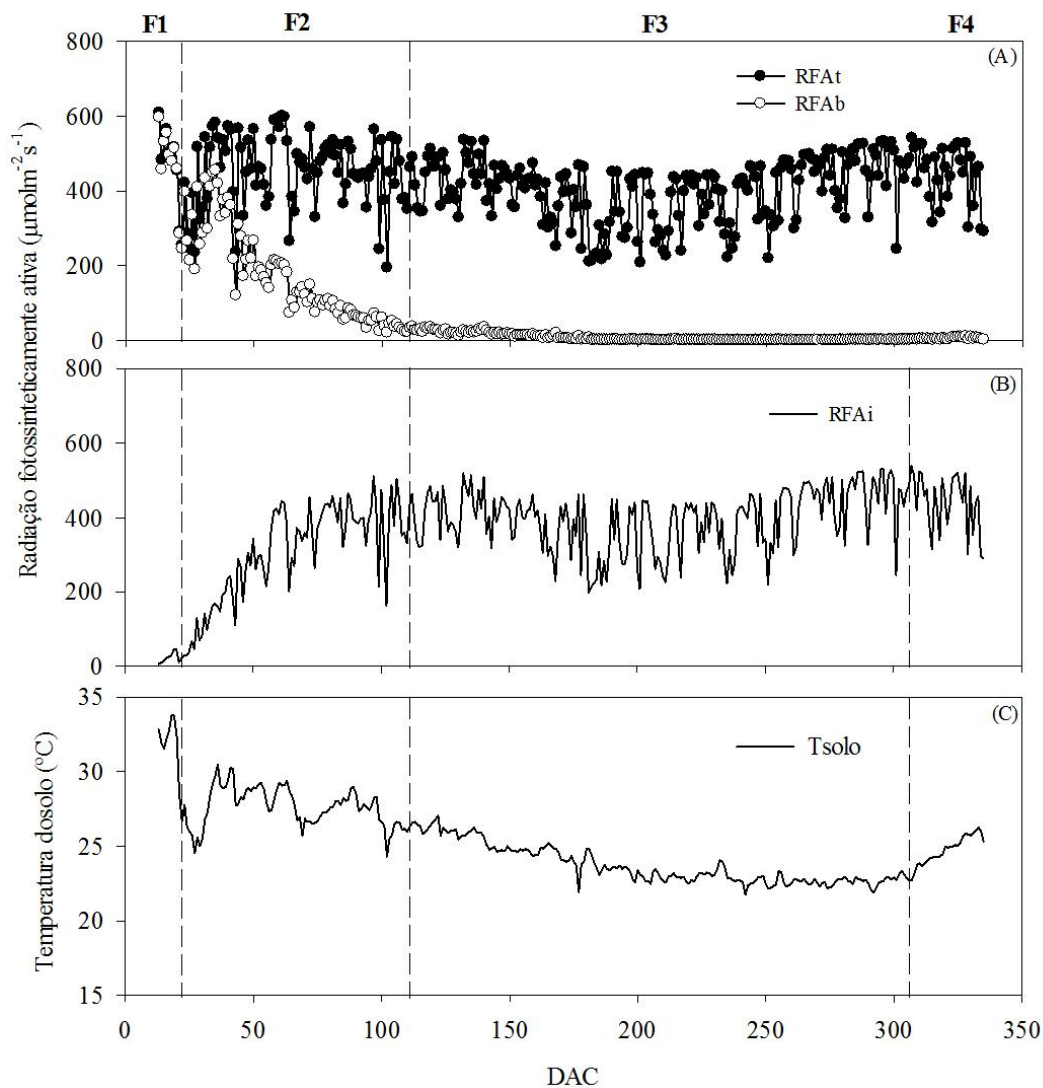


Figura 5. Média diária da radiação fotossinteticamente ativa incidente acima (*RFAt*) e abaixo (*RFAb*) do dossel (A), radiação fotossinteticamente ativa interceptada (*RFAi*) (B) e temperatura do solo a 2cm de profundidade (C) em cultivo da cana de açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial no Submédio do Vale São Francisco, Juazeiro-BA.

A fase III do ciclo produtivo desta cultura, que corresponde à fase de máximo crescimento vegetativo e é mais longa é aquela na qual a cultura apresenta seu máximo crescimento, quando então pode ocorrer tombamento dos colmos devido ao elevado teor de sua biomassa, conforme constatado por Silva et al (2012) por volta dos 238 *DAC*. No presente estudo, essa fase ocorreu entre os meses de março e setembro (111 a 306 *DAC*), compreendendo o período de menor incidência de radiação solar na região, quando a média de Q_0 foi $30,71 \text{ MJ m}^{-2}$ e de Q_g $19,46 \text{ MJ m}^{-2}$, resultando numa incidência média diária de

400,44 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de *RFA* no topo da cultura, e de 6,29 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ abaixo do dossel. Na Figura 4a pode-se ainda verificar que houve uma alternância de dias com valores elevados e baixos de *RFA_t*, que foi quase totalmente interceptada pela cana de açúcar (Figura 5B), cujos dados contrastam com os valores praticamente constantes de *RFA_b*, em decorrência da cobertura vegetal máxima o solo, condição esta que também implicou na redução da temperatura do solo, que passou de valores da ordem de 26-25 °C no início da Fase III para valores em torno de 23-22 °C ao final desta fase (Figura 5C), cuja média foi de 23,7 °C.

A Fase IV teve início aos 307 *DAC*, no mês de setembro de 2011, quando então ocorria suspensão da irrigação, prática adotada para possibilitar a maturação da planta e, conseqüentemente, maior acúmulo de sacarose nos colmos na fase final de maturação, bem como para permitir a entrada de máquinas na área para realização da colheita, visto que se trata de um solo da classe Vertissolo. Nessa fase, o valor médio de *RFA_t* média foi da ordem de 440,22 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, que foi quase totalmente interceptada (426,64 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Diante destas condições, constatou-se uma tendência de aumento da temperatura do solo, até valores da ordem de 26 °C (Figura 5C).

Quando se considera o ciclo produtivo como um todo, verifica-se que a radiação fotossinteticamente ativa incidente sobre o dossel da cana de açúcar totalizou 2.948,99 MJ m^{-2} , representando em média, cerca de 44,26% da *Q_g* (6.662,82 MJ m^{-2}). No que concerne à *RFA*, constatou-se que o seu valor foi de 457,11 MJ m^{-2} , sendo que 93% deste valor ocorreram nas Fases I e II, que correspondem às fases de brotação, estabelecimento e perfilhamento. Portanto, os comportamentos das curvas tanto de radiação fotossinteticamente ativa incidente abaixo do dossel da cana de açúcar quanto da temperatura do solo, refletem o crescimento da cana. Assim, com base nos valores de *IAF* obtidos com base no número de dias após a colheita (*DAC*), foi elaborado um modelo matemático cuja curva foi ajustada ao modelo “Pico Gaussiano”, com quatro parâmetros, cujo R^2 foi de 0,96, segundo a equação apresentada na Figura 6. Assim, com base nesta equação, pôde-se constatar, aos 21 *DAC*, que o *IAF* foi igual a 0,45 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, se elevando acentuadamente, até alcançar o valor máximo de 7,68 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ aos 221 *DAC*. Nesse período a cultura já apresentava um fator de cobertura do solo praticamente igual a 1,0 (100%), valor este se manteve invariável até a colheita, enquanto o valor de *IAF*, começou a decair até 4,21 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$. Essa redução no *IAF* e constância no fator de cobertura do solo é decorrente da presença de folhas mortas na fase final de desenvolvimento da cana de açúcar.

Verificou-se, portanto, que aos 106 *DAC* o solo já se encontrava 94% coberto pela cultura, enquanto Silva et al. (2011), obtiveram 93% de cobertura do solo apenas aos 150 *DAC* para a mesma variedade (RB 92-579). No que se refere à fração da *RFA* interceptada Ferreira Júnior et al. (2012), trabalhando com a variedade RB 98-710, obtiveram valor igual a 0,95, ocorrendo aos 193 *DAC*.

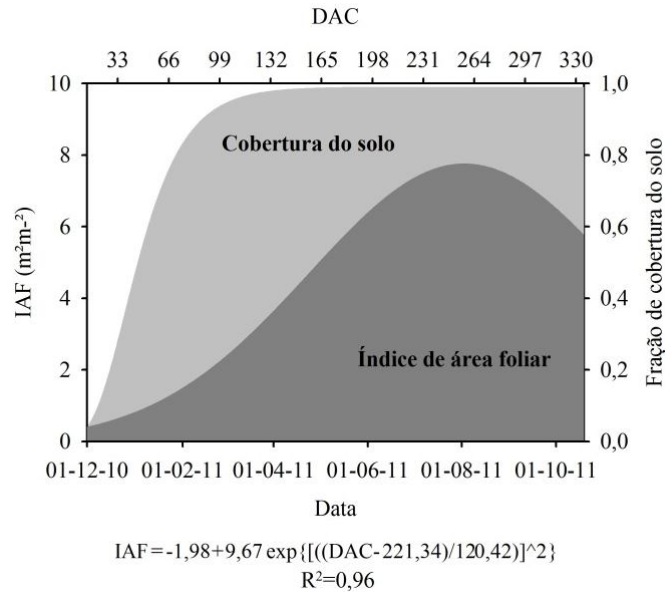


Figura 6. Fração de cobertura do solo e índice de área foliar (*IAF*) da cana de açúcar variedade RB 92579 irrigada por gotejamento subsuperficial, durante o ciclo de cana-soca, no Submédio do Vale São Francisco, Juazeiro-BA.

3.3 Variação diurna dos componentes do balanço de radiação

Na Figura 6 está representada a variação diurna da radiação solar incidente (Qg), radiação refletida (rQg), saldo de radiação (Rn) e albedo (τ) observados para dias representativos correspondente às quatro fases de desenvolvimento da cana de açúcar, que foram selecionados com base no valor de Kt (Figura 4B). A Tabela 1 sumariza os valores totais diários para os respectivos parâmetros, bem como para a radiação de ondas longas advinda da atmosfera (Qa), radiação de ondas longas emitida pela superfície (Qs), balanço de radiação de ondas curtas (BOC), balanço de radiação de ondas longas (BOL) e a relação de Rn/Qg .

As curvas de Qg mostraram comportamento semelhante nos dias ensolarados, com valores máximos da ordem de 1069,5; 1030,0; 1006,0; 888,0 e 1022,0 Wm^{-2} alcançados entre 11h30min e 11h47min nos dias 13, 35, 139, 256 e 310 *DAC*, respectivamente (Figura6). Estes instantes coincidem com o meio dia solar e correspondem aos momentos em que os raios solares incidem mais perpendicularmente sobre a superfície. Embora o dia 256 *DAC* (01/08/2011) tenha sido considerado de sol pleno, (Figura 7G.) destacou-se como o dia com o menor valor de Qg por se tratar de um dia de inverno (01/08/2011), período no qual o sol encontrava-se declinado mais para o norte, mais distante da terra e com menor ângulo de incidência, proporcionou uma menor incidência de radiação sobre a cultura. Percebe-se ainda na Figura 7 que em todos os dias ensolarados, os menores valores de Qg foram constatados na parte inicial e final do dia devido ao ângulo de inclinação dos raios solares terem que atravessar uma camada atmosférica mais espessa, ocorrendo assim uma interação maior da radiação solar com os aerossóis e partículas presentes na atmosfera antes de atingir a superfície. Na mesma ordem, as curvas deste parâmetro obtidas para dias nublados, bem como para Rn , rQg e albedo (Figuras 7B, 7D, 7F, 7H e 7J), mostraram acentuada variação ao longo do dia devido à presença frequente da nebulosidade.

O albedo apresentou-se crescente ao longo dos dias de sol pleno observados, com menores valores próximos ao meio-dia de 0,15; 0,17; 0,18; 0,19 e 0,22, respectivamente para os 13, 35, 139, 256 e 310 *DAC*. Esse comportamento diferente do obtido para Qg indica que o albedo é melhor explicado pelo desenvolvimento da cultura, que vai paulatinamente proporcionando maior cobertura do solo ao longo do ciclo, do que pela própria sazonalidade da Qg .

Na Tabela 1, percebe-se que o menor valor médio de rQg contrasta com a maior incidência de Qg da fase I quando comparado com as demais. Acontece que esta fase compreende o período de reduzida cobertura do solo (cerca de 2%), como pode ser constatado na Figura 5, o que sugere uma maior absorção de radiação incidente pelo sistema confirmada pelo maior valor de Qs . Ainda no que se referem aos valores médios diários, foram observadas nas duas primeiras fases diferenças expressivas de r entre um dia ensolarado e um dia nublado em (4,0%). No entanto, comparando-se as fases (Tabela 1), em ambos os dias observados para as fases I e II o albedo constatado foi menor que o observado para as fases III e IV. Isso reforça o que foi constatado para rQg e indica que houve uma maior absorção da radiação incidente pelo sistema solo-planta nos dois primeiros casos. Em termos de balanço de ondas longas (*BOL*), a Tabela 1 mostra que a emitância atmosférica apresentou valores

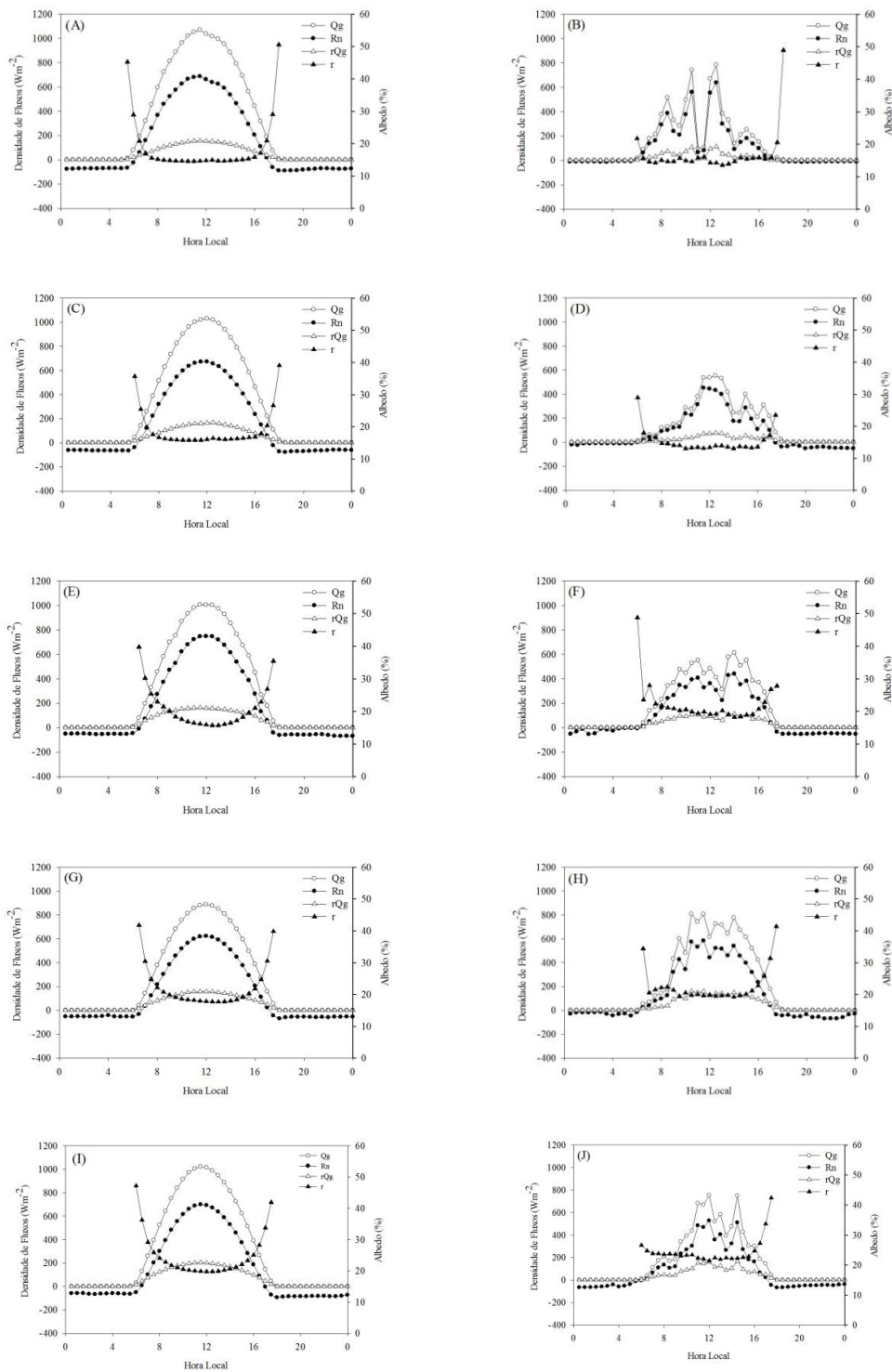


Figura 7. Variação diurna da radiação global (Q_g), radiação refletida (rQ_g), saldo de radiação (R_n) e albedo (r) para dias de céu claro e nublados, representativos das fases de crescimento da cana de açúcar, Juazeiro-BA.

menores do que a emitância terrestre, tanto nos dias ensolarados quanto nos nublados, para as quatro fases. Porém, verifica-se que a diferença entre Q_s e Q_a foi maior nos dias com maior incidência de radiação global e em decorrência disso o BOL apresentou valores muito mais negativos nos dias ensolarados do que nos dias nublados. Como consequência, nos dias ensolarados a amplitude entre Q_g e R_n foi maior do que nos dias nublados.

Tabela 1. Totais diários dos componentes do balanço de radiação (MJ m^{-2}) em um dia ensolarado (S) e um dia nublado (N) em diferentes estádios de desenvolvimento da cana de açúcar irrigada, Juazeiro-BA.

		DAC	Q_g^*	rQ_g^*	r^{**}	Q_a^*	Q_s^*	BOL^*	BOC^*	R_n^*	R_n/Q_g	Q_o^*	Kt^{**}
Fase	S	13	29,9	4,4	0,15	32,2	43,1	-10,9	24,7	13,8	47,4	40,7	0,72
I	N	22	12,1	1,8	0,15	37,2	38,9	-1,7	10,3	8,5	70,8	40,6	0,30
Fase	S	35	27,9	4,6	0,17	32,6	41,9	-9,2	23,3	14,0	50,3	40,6	0,69
II	N	43	11,3	1,6	0,14	35,9	38,7	-2,8	9,7	6,9	61,2	40,6	0,28
Fase	S	139	26,4	4,8	0,18	32,7	38,9	-6,2	21,5	15,4	58,2	35,1	0,75
III	N	162	15,1	3,0	0,20	34,8	38,2	-3,4	12,1	8,7	57,5	31,9	0,47
Fase	S	256	22,9	4,4	0,19	31,3	37,7	-6,4	18,4	12,1	52,8	28,5	0,80
III	N	271	19,2	4,0	0,21	33,6	37,7	-4,2	15,3	11,1	57,7	30,8	0,63
Fase	S	310	26,7	5,8	0,22	31,3	39,1	-7,8	20,9	13,2	49,2	37,5	0,71
IV	N	328	14,9	3,4	0,23	35,1	39,2	-4,1	11,5	7,4	49,3	39,9	0,37

*Valores dados em MJ m^{-2} ; **Adimensional; Q_g =Radiação solar global incidente; rQ_g =radiação solar refletida; r =albedo; Q_a =radiação de ondas longas incidente; Q_s =radiação de ondas longas refletida; BOC =Saldo de radiação de ondas curtas; BOL =Saldo de radiação de ondas longas; R_n =Saldo total de radiação; Q_o =Irradiância solar no topo da atmosfera;

3.4 Comportamento sazonal dos componentes do balanço de radiação

Analisando os componentes do balanço de radiação longo do ciclo de cultivo, (Figura 8), observa-se que a radiação solar global (Q_g) foi mais elevada no início, apresentando valor médio de $22,4 \pm 5,4 \text{ MJ m}^{-2}$ até por volta dos 140 DAC, (07 de abril de 2011). A partir desta data, os valores de Q_g começaram a decrescer até por volta dos 230 DAC (07 de julho de 2011), com valores abaixo de 20 MJ m^{-2} . Em seguida, observou-se a elevação gradativa da densidade de fluxo de Q_g , a qual somete se estabiliza ao período final do ciclo de cultivo, com valores semelhantes aos constatados ao início, comportamento que segue o padrão sazonal de radiação solar incidente na região (MOURA, 2007). Em termos de ciclo da cultura, esse parâmetro mostrou comportamento inverso ao que foi observado por Silva (2011), em estudo sobre balanço de radiação e energia em um ciclo de cana de açúcar sob as condições de

semiárido. No entanto, considerando-se qua a época de início do cultivo do referido autor, compreendendo o período de junho de 2007 a junho de 2008, os valores estão de acordo e evidenciam a relação de Qg com as efemérides astronômicas determinadas pela distância relativa terra-sol (PEREIRA, 2002a).

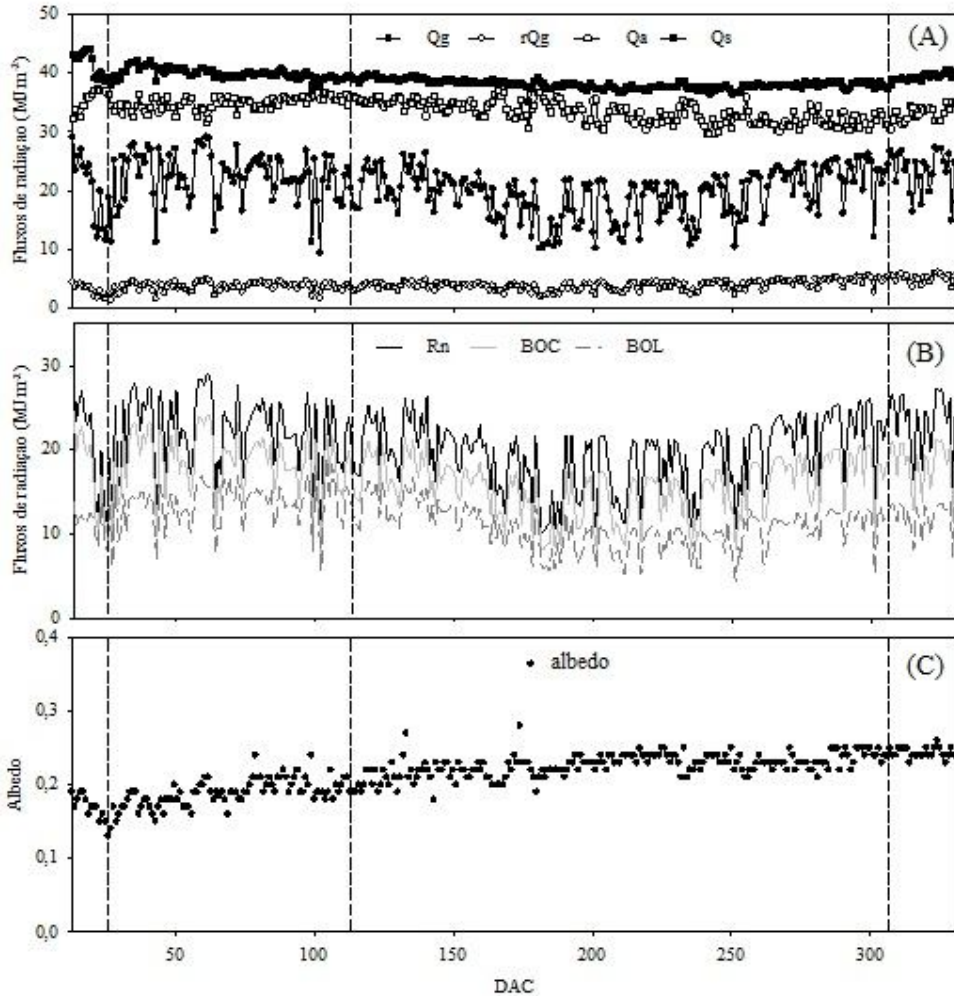


Figura 8. Totais diários dos componentes do balanço de radiação em função do número de dias após a colheita (DAC) da cana de açúcar variedade RB 92579 irrigada por gotejamento subsuperficial, Juazeiro-BA.

*(a) Radiação solar global (Qg), radiação de ondas curtas refletida (rQg), radiação de ondas longas emitida pela atmosfera (Qa) e radiação de ondas longas emitida pela superfície (Qs); (b) Saldo de radiação (Rn), balanço de radiação de ondas curtas (BOC) e balanço de radiação de ondas longas (BOL); e (c) Albedo ou coeficiente de reflexão da radiação de ondas longas.

As condições de pouco sombreamento do solo até os 44 DAC (nível de cobertura do solo < 50%), proporcionaram maior absorção da radiação incidente pelo sistema, o que pode ser constatado na Figura 8A, na qual, durante esse período observaram-se baixos valores médios de rQg ($3,2 \pm 0,8 \text{ MJ m}^{-2}$). A partir daí até os 80 DAC os valores médios de rQg

aumentaram para $3,6 \pm 0,8 \text{ MJ m}^{-2}$, pois tende a ser regida pelas flutuações de Qg , em decorrência do aumento do índice de cobertura do solo (Figura 6), condição esta que se mantém até o fim do ciclo de cultivo da cana. No entanto, por volta dos 180 *DAC*, observou-se uma redução acentuada nos valores de rQg , em virtude do tombamento característico da variedade, evento este que provocou distúrbios no arranjo do aparato fotossintético da cana, expondo tanto os colmos da planta, quanto parte da superfície do solo, o que pode condicionar o aumento da absorção de radiação e, conseqüentemente, redução dos valores da rQg . Resultados semelhantes foram observados por Silva (2011) aos 238 *DAC* em estudo de variação do balanço de radiação e de energia da cana de açúcar irrigada por sulcos sob condições climáticas semelhantes.

Quando se analisa a variação dos valores médios diários relativos à radiação de ondas longas emitida pela superfície, constatou-se que eles foram mais elevados do que a emitância atmosférica (Fig. 8^a). No início do ciclo de cultivo os valores de Qs apresentaram-se bem mais elevados do que os de Qa , o que justifica a obtenção de valores mais negativos constatados para o *BOL*. A partir de então, a diferença entre Qa e Qs tendeu a diminuir até ~140 *DAC*, proporcionando pequenas flutuações dos valores de *BOL* até o final do ciclo de cultivo da cana.

Ferreira Júnior et al. (2012), em estudo realizado com cana de açúcar em Rio Largo, AL, observaram que os maiores valores de índice de área foliar (*IAF*) da variedade RB 92-579 no início do ciclo coincidiram com altos fluxos de radiação solar, sendo que esta variedade destacou-se por apresentar maior interceptação de *RFA* acumulada durante o ciclo de cultivo, com *IAF* máximo igual a $3,84 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Estes autores informam que a média diária da radiação solar incidente no cultivo foi da ordem de $20,9 \text{ MJ m}^{-2}$ até os 70 *DAC*, com interceptação de *RFA* equivalente a $1,9 \text{ MJ m}^{-2}$. Nesse mesmo estudo, entre os 71 e 193 *DAC*, a radiação solar incidente média de apenas $14,9 \text{ MJ m}^{-2}$, o que pode ter limitado o crescimento das plantas. Por outro lado, André et al. (2010) realizaram estudo concernente aos aspectos energéticos do desenvolvimento da cana de açúcar, em Campo dos Goytacazes, RJ, observaram que na fase de desenvolvimento dos colmos, a irradiância solar global foi de $20,36 \text{ MJ m}^{-2}$, quando a cultura apresentava um índice de área foliar entre 7,0 e $8,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e as plantas apresentavam altura média de 3,65 m.

O saldo de radiação (Figura 8B) variou de acordo com a sazonalidade apresentada pela radiação global (Figura 8A), com exceção para o período inicial, no qual foi regido pelas mudanças nos componentes proporcionadas pelo intenso crescimento da cultura. No início do

ciclo de desenvolvimento da cultura (Fase I), com Rn representando 58% de Qg , os valores do BOC apresentaram-se mais elevados ($19,0 \pm 4,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), como resultado da maior incidência de Qg , quando então tendeu a decrescer até por volta os 240 DAC (Fase III) (Figura 8B). Os menores valores constatados deste parâmetro, associados à relativa elevação do BOL resultaram em pequenos valores de Rn ($9,5 \pm 2,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) (Figura 8B).

Na fase II, que representa a fase de perfilhamento e estabelecimento da cana de açúcar, o saldo de radiação representou 65% da radiação global, indicando maior demanda de energia pelo sistema. As fases I, III e IV apresentaram valores na relação Rn/Qg da ordem de 58%, 62% e 59%, respectivamente, (Tabela 2). Silva (2009), comparando a relação Rn/Qg em cana de açúcar sob condições irrigadas, obteve valor médio de 59,5%; enquanto Teixeira et al. (2008), obtiveram valores de 51 e 50% em cultivos irrigados de mangueira e uva de vinho; que também são cultivos importantes para a região do Submédio do Vale São Francisco.

Tabela 2. Valores médios, em MJ m^{-2} (albedo em %) dos componentes do balanço de radiação para as quatro fases de desenvolvimento da cana de açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial no Submédio do Vale São Francisco, Juazeiro-BA.

	Duração (dias)	Qg	rQg	r	Qa	Qs	Rn	BOC	BOL	Rn/Qg
Fase I	22	22,4	3,4	19%	34,8	42,3	13,8	18,9	-7,5	0,58
Fase II	90	22,2	3,6	21%	34,9	39,9	15,4	18,5	-5,0	0,65
Fase III	195	19,4	3,9	25%	33,2	37,9	13,0	15,5	-4,9	0,62
Fase IV	31	22,5	4,9	26%	33,7	39,4	14,4	17,6	-5,7	0,59

A maior absorção de energia pelo sistema foi constatada no início do ciclo de cultivo da cana em decorrência da obtenção dos menores coeficientes de reflexão (Figura 8C). Observou-se que os valores deste parâmetro evoluíram de acordo com o desenvolvimento da cultura, tendo alcançado os menores valores até os 60 DAC, quando então tenderam a elevar-se até os 310 DAP. Nesse momento a irrigação foi suspensa, caracterizando início da fase de maturação fisiológica, na qual a cultura é submetida a estresse hídrico, visando aumento da concentração de sacarose nos colmos, condição esta que proporcionou um declínio considerável dos valores do albedo (Figura 8C). Os valores médios constatados para as fases I, II, III e VI foram $19 \pm 1,9\%$, $21 \pm 4,9\%$, $25 \pm 3,1\%$ e $26 \pm 4,7\%$, respectivamente, cujo valor médio para o ciclo foi de $23 \pm 4,3\%$. Valores semelhantes foram constatados por Silva et al (2011) estudando a variação do balanço de radiação em cana de açúcar irrigada por sulcos, em Juazeiro, BA, quando observaram entre os 50 e 300 DAC que a radiação total incidente variou

entre 20 e 26 MJ m⁻², enquanto o albedo apresentou variação de 15% aos 50 *DAC* à 27% aos 230 *DAC*, com albedo médio igual a 23% e *IAF* máximo igual a 5,5 m² m⁻². Esses valores foram semelhantes aos observados por Cabral et al. (2012), que obtiveram albedo para a cana de açúcar cultivada em São Paulo variando entre 0,15 (15%) e 0,23 (23%), do início ao final do ciclo produtivo, com índice de área foliar máximo da ordem de 5,0 m² m⁻². Entretanto, um pouco diferente daqueles constatados por André et al (2010), que apesar de terem apresentados valores também crescentes do albedo com o aumento do *IAF* da cultura, seu valor médio foi de 0,24 (24%) para o estágio de perfilamento, 0,27 (27%) para estágio inicial de desenvolvimento de colmos, 0,30 (30%) para o desenvolvimento de colmos e 0,31 (31%) para maturação, com valor médio do albedo para todo o ciclo da cultura igual a 0,28 (28%); Silva (2009) observou valores oscilando entre 15 e 27%, com valor médio de 23% para o ciclo.

CONCLUSÕES

1. Constatou-se que desenvolvimento da cana de açúcar pode ser representado por meio de medidas da radiação fotossinteticamente ativa acima e abaixo do dossel, que refletem a fração de cobertura do solo e o índice de área foliar.
2. Verificou-se que as condições de nebulosidade influenciaram de maneira marcante nos componentes do balanço de radiação, com exceção da emitância de radiação de ondas longas pela superfície em condições de plena cobertura do solo, e em menor escala, o albedo, que demonstrou, também, dependência do ângulo de inclinação solar.
3. Observou-se que os eventos de chuva e de irrigação, a sazonalidade da radiação global em conjunto com o nível de cobertura do solo influenciaram de modo significativo nos componentes do balanço de radiação e no albedo da cana de açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial.

LITERATURA CITADA

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWEL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p. 921-929, 2011.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; RIBEIRO, V. Q.; DUARTE, J. A. L.; BRAGA, D. L.; NOLETO, D. H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana de açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.1, p.76-84, jan. 2012.
- ANDRÉ, R. G. B.; MENDONÇA, J. C.; MARQUES, V.S.; PINHEIRO, F. M.A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana de açúcar. parte 1: balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, 375 - 382, 2010.
- CAMPBELL, G. S., NORMAN, J. M. **An Introduction to Environmental Biophysics**, 2nd ed. 1998, XXI, 286 p. 79 illus.
- ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E.N.; OLIVEIRA, A.P.; SOARES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v.86, p.299-309, 2009.
- FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; TEODORO, I.; SANTOS, M.A.; PORFIRIO, A. C. S. Crescimento e fotossíntese de cana de açúcar em função de variáveis biométricas e meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.11, p.1229-1236, 2012
- MARIN, F. R. et al. Cana-de-Alçúcar. In : Monteiro, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. 530 p. il.
- MOURA, M. S. B.; SOARES, J. M.; GURGEL, M. T.; SILVA, T. G. F. Balanço de energia na cana de açúcar irrigada no Submédio São Francisco. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 27, 2007, Mossoró. **Anais...** Mossoró: ABID, 2007. 1 CD-ROM.
- OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R. Estimativas de evapotranspiração e as consequências devido aos erros na determinação de saldo de radiação e efeitos advectivos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB**, 2000. v. 4, n. 3, p. 343 – 347.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba – RS, **Agropecuária**, 2002a, 478 p.
- PEREIRA, L. S.; OEWIS, T, ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 57, p. 175-206, 2002b.
- PILAU, G. P.; ANGELOCCI, L. R.; SCARPARI FILHO, J. A. Balanço de radiação de uma laranjeira em pomar e sua relação com radiação solar global e com saldo de radiação de gramado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, n. 3, p. 257-266, 2007.
- RAMANUJAM, T., VENKATARAMANA, S. Radiation interception and utilization at different growth stages of sugarcane and their influence on yield. **Indian Journal of Plant Physiology**, 4, 85-89, 1999.

- SILVA, T. G. F. **Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência do uso de água da cana de açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco**. 2009. 176 f. Tese (Doutorado em Meteorologia agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SILVA, T. G. F. et al. Variação do Balanço de Radiação e de Energia da Cana de açúcar Irrigada no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, 2011. v. 15, n. 2, p. 139 – 147.
- SINGELS, A., SMIT, M. A. The effect of row spacing on an irrigated plant crop of sugarcane cultivar NCo376. **Proceedings South African Sugar Technology Association**, Durban, v. 76, p. 94-105, 2002
- SOUZA, J. L.; ESCOBEDO, J. F. Balanço de radiação em cultivos de feijão-vagem com e sem cobertura de polietileno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32 n. 1, p. 1-15, 1997.
- TEIXEIRA, A. H. DE C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, N. D.; MOURA, M. S. B.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v.362, p.110-127, 2008.
- VIANELLO, R.L., ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária, UFV, 1991. 449P.
- ZHOU, M. M.; SINGELS, A.; SAVAGE, M. J. Physiological parameters for modeling differences in canopy development between sugarcane cultivars. **Proceedings of the South African Sugar Technology Association**, Durban, v. 77, p. 610–621, 2003.

CAPÍTULO 2

BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA DE AÇÚCAR IRRIGADA POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL COM BASE NOS MÉTODOS DAS CORRELAÇÕES TURBULENTAS E RAZÃO DE BOWEN

Resumo: O objetivo deste estudo foi analisar os componentes do balanço de energia obtidos pelos métodos das correlações turbulentas (*EC*) e da razão de Bowen (*BERB*), e determinar a evapotranspiração e o coeficiente de cultura da cana de açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco. Para tanto, densidades de fluxos de calor latente e sensível foram medidas sobre um cultivo ao longo do ciclo de produção durante o período de novembro de 2010 a outubro de 2011. Com os resultados obtidos foi possível verificar que o método *EC* apresentou subestimativa da energia disponível em 26%, e o fluxo de calor latente em 19% em relação ao método da Razão de Bowen. Os valores diários da fração evaporativa variaram entre 0,66 (método das correlações turbulentas) e 0,68 (método da Razão de Bowen), revelando que a maior parte da energia disponível foi convertida em evapotranspiração real. A evapotranspiração média diária da cultura diferiu entre os dois métodos, apresentando valores de 3,6 e 4,1 mm d⁻¹ para os métodos *EC* e *BERB*, resultando em um requerimento hídrico total de 1478mm. Os valores do coeficiente de cultura da cana de açúcar obtidos foram 0,54 e 0,75 na fase inicial, 0,83 e 0,87 na fase de máximo crescimento para os métodos *EC* e *BERB*, respectivamente, e 0,52 para a fase final, determinado pelo método *BERB*.

Palavras-chave: Evapotranspiração, Vale do São Francisco, correlações turbulentas, razão de Bowen, *Saccharum spp.*

ENERGY BALANCE AND EVAPOTRANSPIRATION FOR SUBSURFACE DRIP IRRIGATED SUGAR CANE BASED ON EDDY COVARIANCE AND BOWEN RATIO METHODS

Abstract: The aim of this study was to determine the evapotranspiration of sugarcane under subsurface drip irrigation in semi-arid conditions of the lower basin of the Valley of the São Francisco using the methods of turbulent correlations and Bowen ratio. Therefore, the

densities of latent and sensible heat fluxes were measured in culture throughout the production cycle during the period November 2010 to October 2011. These results showed that the method presented *EC* underestimation of the energy available by 26%, and the latent heat flux by 19% compared to the method of Bowen. Evaporation fraction of the daily values ranged from 0.66 (turbulent correlation method) and 0.68 (Bowen method) reveals that most of the available energy is converted to *ET*. Average daily *ET* differ between the two methods, with values of 3.6 and 4.1 mm d⁻¹ for *EC* and *RB* methods, resulting in a total water requirement of 1478mm. The sugarcane crop coefficient values obtained were 0.54 and 0.75 in the initial phase, 0.83 and 0.87 in the phase of maximum growth of the *EC* and *BERB* methods, respectively, and 0.52 for phase end, determined by the *BERB* method.

Key-words: evapotranspiration; Semiarid; energy balance; Bowen ratio; eddy covariance.

1. INTRODUÇÃO

O uso adequado da água no sistema de produção agrícola pode ser controlado por meio do conhecimento dos requerimentos hídricos das culturas, dentre os quais é muito importante a determinação da evapotranspiração (*ET*), que é a transferência de água para a atmosfera sob a forma de vapor a partir da superfície do solo e das folhas das plantas dependendo a *ET*, portanto, da demanda evaporativa da atmosfera e dos processos de transporte de calor e de vapor da água que ocorrem no solo e na planta através de subcamadas situadas próximas as referidas superfícies.

A *ET* é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, sendo um consumidor primário de enormes quantidades de água (ALLEN et al, 2011). Portanto é um elemento importante na irrigação, quando se visa à determinação das alocações de água e melhoria de seu manejo e melhoria do planejamento do sistema de irrigação e escalonamento do sistema de produção.

A determinação da *ET* é bastante relevante para assegurar o suprimento de água, requerido pelas culturas, bem como para diminuir os impactos ambientais da irrigação e melhorar o cálculo das perdas de água por drenagem e escoamento em cultivos de cana de açúcar, os quais são frequentemente superdimensionados (INMAN-BAMBER; MCGLINCHEY, 2003; INMANBAMBER; SMITH, 2005; SILVA, 2009; SILVA et al.,

2012). O aumento da eficiência do uso da água também é importante para as melhorias do rendimento da cultura e da sustentabilidade do sistema de produção.

No planejamento e manejo de áreas irrigadas, um alto grau de precisão da evapotranspiração das culturas (ET_c) faz-se necessário, de modo a minimizar o desperdício de água e, para tanto, têm-se utilizado métodos micrometeorológicos para determiná-la. Nesse âmbito, a estimativa da ET_c pode ser obtida pela partição da energia disponível ($R_n - G$) entre calor sensível (H) e calor latente (λE) utilizando o método do balanço de energia com base na razão de Bowen ($BERB$), que se baseia na relação do fluxo-gradiente e transferência de massa e pelo método das correlações turbulentas ou “*EddyCovariance*” (EC). Esses métodos têm sido amplamente aplicados em culturas como milho (STEDUTO; HSIAO, 1998), alfafa (TODD et al., 2000), café (MARIN, 2003; RIGHI, 2004), forrageira (SILVA et al., 2005), videira (TEIXEIRA et al., 2007), cana de açúcar (MOURA et al., 2007; SILVA et al., 2011; SILVA et al., 2012), manga (TEIXEIRA; BASTIAANSEN, 2012) entre outras. E por meio da relação ET_c/ET_o (em que ET_o é a evapotranspiração de referência) obtêm-se o coeficiente de cultivo (K_c), que varia de acordo com os estádios fenológicos da cultura e que é utilizado no manejo de irrigação.

Assim, este estudo objetivou analisar os componentes do balanço de energia obtidos pelos métodos das correlações turbulentas e da razão de Bowen, e a determinação da evapotranspiração e o coeficiente de cultura da cana de açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial, sob as condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A pesquisa foi conduzida em um campo de produção de cana de açúcar da Usina Agroindústrias do Vale do São Francisco – AGROVALE (latitude: 9°29’S; longitude: 40°21’O; altitude: 395m). O clima da região, de acordo com a classificação de Koppen, é do tipo BSw^h com temperatura do ar oscilando em torno de 26,2 °C, umidade relativa do ar de 64,4%, precipitação total anual igual a 549,8mm, média diária do número de horas de brilho solar de 7,5 horas, radiação solar média de 442,3 W m⁻², evaporação do tanque classe A igual a 7,3 mm dia⁻¹ e velocidade do vento de 2,2 m s⁻¹. Esta região é caracterizada por apresentar

irregularidade temporal e espacial no que concerne ao regime pluviométrico, principalmente, entre os meses de janeiro e abril, que corresponde ao período mais chuvoso do ano. Diante disso, a prática da irrigação destaca-se de fundamental importância para a atividade agrícola desta região, tanto no primeiro quanto no segundo semestre.

O campo de produção de cana de açúcar selecionado para instalação deste estudo compreendeu uma área de 7,86 ha, cultivado com a variedade RB 92-579, em Vertissolo, em espaçamento duplo de 1,3 m por 0,7 m, irrigada por gotejamento subsuperficial, com gotejadores enterrados a 0,20 m da superfície do solo. O estudo foi realizado para o ciclo de cana-soca, que compreendeu o período de 18 de novembro de 2010 a 31 de outubro de 2011, totalizando 347 dias.

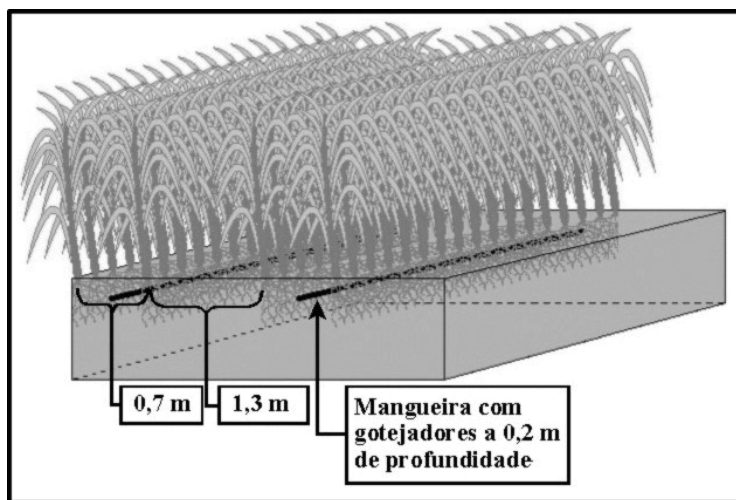


Figura 1. Espaçamento de plantio e disposição das mangueiras de irrigação na área de cultivo cana de açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial, Juazeiro-BA

2.2 Componentes do balanço de energia

No centro do campo de produção selecionado foi instalada uma torre micrometeorológica equipada com sensores para medir os elementos meteorológicos e os componentes do balanço de energia. O local selecionado apresentou *fetch* adequado em relação à altura da torre instrumentada, uma vez que estava circundado por outros campos de produção da mesma variedade de cana, e no sentido do vento predominante (sudeste) os plantios se estendiam por mais de 6,0 Km.

Para determinação dos componentes do balanço de energia foram instalados dois sistemas, sendo um para realização de medidas em baixa frequência, para uso da metodologia do Balanço de Energia com Base na Razão de Bowen (*BERB*) e outro em alta frequência, para utilização do método das correlações turbulentas ou *EddyCovariance* (*EC*).

O balanço de energia (Rn) simplificado no sistema solo-planta-atmosfera é constituído pelos fluxos verticais de calor latente (λE), calor sensível (H), de calor no solo (G), todos expressos em $W\ m^{-2}$. Foram considerados também os fluxos associados à absorção de calor pelo volume ocupado pela vegetação (S) e à energia utilizada na fotossíntese (M). Estes dois últimos, por serem pequenos em comparação com os demais fluxos, têm sido negligenciados no cômputo do balanço de energia (VILLA NOVA, 1973), bem como a advecção de calor sensível e de calor latente. Assim, o balanço de energia simplificado à superfície se reduz à seguinte equação:

$$Rn = \lambda E + H + G \quad (1)$$

Os dados de saldo de radiação (Rn) foram medidos por meio de um saldo radiômetro, modelo CNR1 (Net radiometer - Kipp&Zonen B.V., Delft, Netherlands), instalado à 4,0 m acima do dossel da cultura, enquanto os de fluxo de calor no solo (G) foram medidos por meio de dois fluxímetros (HFT3-REBS, CampbellScientific, Inc. Logan, Utah, USA) colocados inter e entre fileiras de plantas, à 0,06 m de profundidade. Além destes, foram feitas medições da temperatura e da umidade relativa do ar utilizando um sensor HMP45C (Vaisala, Finlândia) velocidade e direção do vento, medidos com um anemômetro (03001-5, R. M. Young, Wind Sentry, CampbellScientific, Inc. Logan, Utah, USA) e da precipitação pluviométrica, por meio de um pluviômetro (CS700-L Hydrological Services Rain Gage, Liverpool, Austrália). Para armazenamento dos dados em baixa frequência foi utilizado um datalogger modelo CR23X (CampbellScientific, Inc. Logan, Utah, USA) programado para realizar medidas de 30 segundos e armazenar médias a cada 30 minutos.

Os fluxos de λE e H foram obtidos pelas metodologias de *BERB* e *EC*. Pelo método da razão de Bowen, os fluxos de H e λE foram obtidos segundo as expressões 2 e 3, respectivamente:

$$\lambda E_{RB} = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (2)$$

$$H_{RB} = \frac{\beta(Rn - G)}{1 + \beta} \quad (3)$$

em que Rn , H , λE e G são dados em $W m^{-2}$ e β , que corresponde a razão de Bowen é adimensional, e pode ser expresso como:

$$\beta = \gamma \left(\frac{\Delta t}{\Delta e} \right) \quad (4)$$

em que Δt e Δe são as diferenças de temperatura do ar ($^{\circ}C$) e de pressão de vapor d'água (kPa), respectivamente. Para sua obtenção foram realizadas medidas da temperatura de bulbo seco (t_{bs}) e de bulbo úmido (t_{bu}) em psicrômetros situados nos níveis z_1 e z_2 acima do dossel, sendo o primeiro sempre ajustado à altura de 1,5 vezes a altura média da cultura, conforme proposto por InmmanBamber e Mc Glinchey (2003) e o segundo a 1,0 m acima do primeiro. Assim, considerando a equação psicrométrica, os valores de β foram dados por:

$$\beta = \left[\frac{\Delta + \gamma (t_{bu1} - t_{bu2})}{\gamma (t_{bs1} - t_{bs2})} - 1 \right] \quad (5)$$

em que Δ é a declividade da curva de pressão de vapor d'água ($kPa \ ^{\circ}C^{-1}$), t_{bu1} , t_{bu2} , t_{bs1} e t_{bs2} são as temperaturas de bulbo úmido e seco ($^{\circ}C$) correspondentes aos níveis z_1 e z_2 .

Os erros associados ao método *BERB* na estimativa de β , e conseqüentemente no cálculo de λE foram avaliados seguindo os critérios definidos por Perez et al. (1999), com base nos dados do perfil de pressão de vapor d'água em cada horário de medição, na resolução dos sensores e na conversão de sinais da relação fluxo-gradiente.

Para obtenção dos fluxos de λE e H pelo método de *EC*, foi instalado um sistema constituído por um higrômetro modelo KRYPTON KH_2O (Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) para mensuração das concentrações de vapor de água; um anemômetro sônico tridimensional modelo CSAT3 (Campbell Scientific, Logan, Utah, USA), para mensuração da temperatura do ar (T) e os componentes da velocidade do vento nas direções x, y e z, e por um sensor HMP45C (Vaisala, Finlândia), para medir a temperatura e a umidade relativa do ar. Os equipamentos foram fixados 8,0 m acima da altura média da vegetação da área de estudo, posicionados considerando a direção do vento predominante. As medidas foram realizadas à taxa de 10 Hz, por meio de um datalogger modelo CR1000 (Campbell Scientific Inc. Logan,

UT, EUA). A partir dos dados de covariância obtidos, os fluxos de λE e de H foram calculados para intervalos de 30 minutos, segundo as seguintes expressões:

$$\lambda E_{EC} = \lambda \overline{w' \rho_v'} \quad (6)$$

$$H_{EC} = \rho_a c_p \overline{w' T_a'} \quad (7)$$

em que λE_{EC} e H_{EC} são expressos em $W m^{-2}$; λ é o calor latente de vaporização ($J Kg^{-1}$); w' , ρ_v' e T_a' são os desvios instantâneos da velocidade vertical do vento ($m s^{-1}$), da densidade de vapor d'água ($Kg m^{-3}$) e temperatura do ar ($^{\circ}C$), respectivamente, em relação aos valores médios; ρ_a é a densidade do ar ($Kg m^{-3}$); c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($J Kg^{-1} K^{-1}$).

2.3 Evapotranspiração e coeficiente de cultura

Para converter os valores do fluxo λE , que representa a energia por unidade de área e por unidade de tempo, em unidade de lâmina evaporada e/ou transpirada em um dado intervalo de tempo, ou seja, a evapotranspiração atual (ETa), foi utilizada a relação entre λE e λ multiplicado pelo intervalo de tempo das medições correspondentes ao saldo de radiação, gradientes de temperatura e de vapor d'água e do fluxo de calor no solo, logo:

$$ETa = \frac{\lambda E \cdot it \cdot f_{tempo}}{\lambda} \quad (8)$$

em que λE e λ são expressos em $W m^{-2}$; it é o intervalo de tempo armazenamento dos valores médios das medidas (30 minutos); f_{tempo} é o fator de ajuste da escala de tempo (60 segundos). Posteriormente, foi realizada a integração destes valores para obtenção da ET diária da cultura ($mm dia^{-1}$), como segue:

$$ET = \sum_{Rn-G>0}^{i=1} ETa \quad (9)$$

Com base na eq. 6, foi calculado o requerimento hídrico da cultura pela soma dos valores diários de ET obtidos no período de monitoramento, correspondentes a cada fase fenológica da cana de açúcar, delimitadas como: Fase I ($F1$ -brotação e estabelecimento), Fase II ($F2$ -estabelecimento e perfilhamento), Fase III ($F3$ -crescimento máximo) e Fase IV ($F4$ -maturação fisiológica).

Para determinação da evapotranspiração de referência, foram utilizados dados diários de radiação solar global (Qg), temperatura do ar (Ta), precipitação (P), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (Vv) de uma estação agrometeorológica automática instalada em uma área próxima à Usina, na Fazenda Brasil Uvas. Para o cálculo da ETo , utilizou-se o método de Penman-Monteith padronizado no boletim 56 da FAO (ALLEN et al., 1998), dado pela expressão:

$$ETo = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (10)$$

Com base na razão entre os valores de ET e ETo , foi determinado o coeficiente de cultivo (Kc) tanto a nível diário, como para as diferentes fases de crescimento da cultura, segundo a expressão:

$$Kc = \frac{ET}{ETo} \quad (11)$$

onde Kc é adimensional e ETc e ETo são expressos em mm.dia^{-1} .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Condições meteorológicas

Na Figura 2 está apresentada a média diária das variáveis ambientais obtidas durante o período de estudo. por meio da estação agrometeorológica, tais como: radiação solar global (Qg , $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$); velocidade do vento (Vv , m s^{-1}); temperatura do ar (Tar , $^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa (UR , %) que foram utilizados para o cálculo da evapotranspiração de referência

(*ET_o*). Verificou-se que os valores médios de *Q_g* correspondentes às fases *F1*, *F2* e *F4* do ciclo foram da ordem de 22,3, 22,1 e 22,4 MJ m⁻² d⁻¹, respectivamente, indicando que estas apresentaram mais elevada demanda atmosférica do que a fase *F3*, quando o valor de *Q_g* foi da ordem de 19,4 MJ m⁻² d⁻¹ (Fig. 2c). Quando se analisa o comportamento da umidade relativa do ar (*UR*) constata-se que seus valores foram menores nas fases *F1* (71,3%) e *F4* (68,8%), com valores médios de 76,4 e 76,0% nas fases *F2* e *F3*, respectivamente (Fig. 2a).

No que concerne ao déficit de pressão de vapor (*DPV*) constatou-se que os seus maiores valores médios na fase I, período no qual não houve irrigação com apenas um evento de precipitação considerável (20,8 mm) ocorrido no dia 10 de dezembro de 2010 (22º dia após a colheita). Constatou-se que os seus valores variaram entre 2,0 e 0,3 KPa, e a velocidade do vento apresentou médias nessa fase entre 2,7 e 1,0 m s⁻¹, tendo sido constatado um decréscimo dos valores de *DPV* ao longo da fase II, com variação entre 1,6 e 0,2 KPa (Fig. 2b).

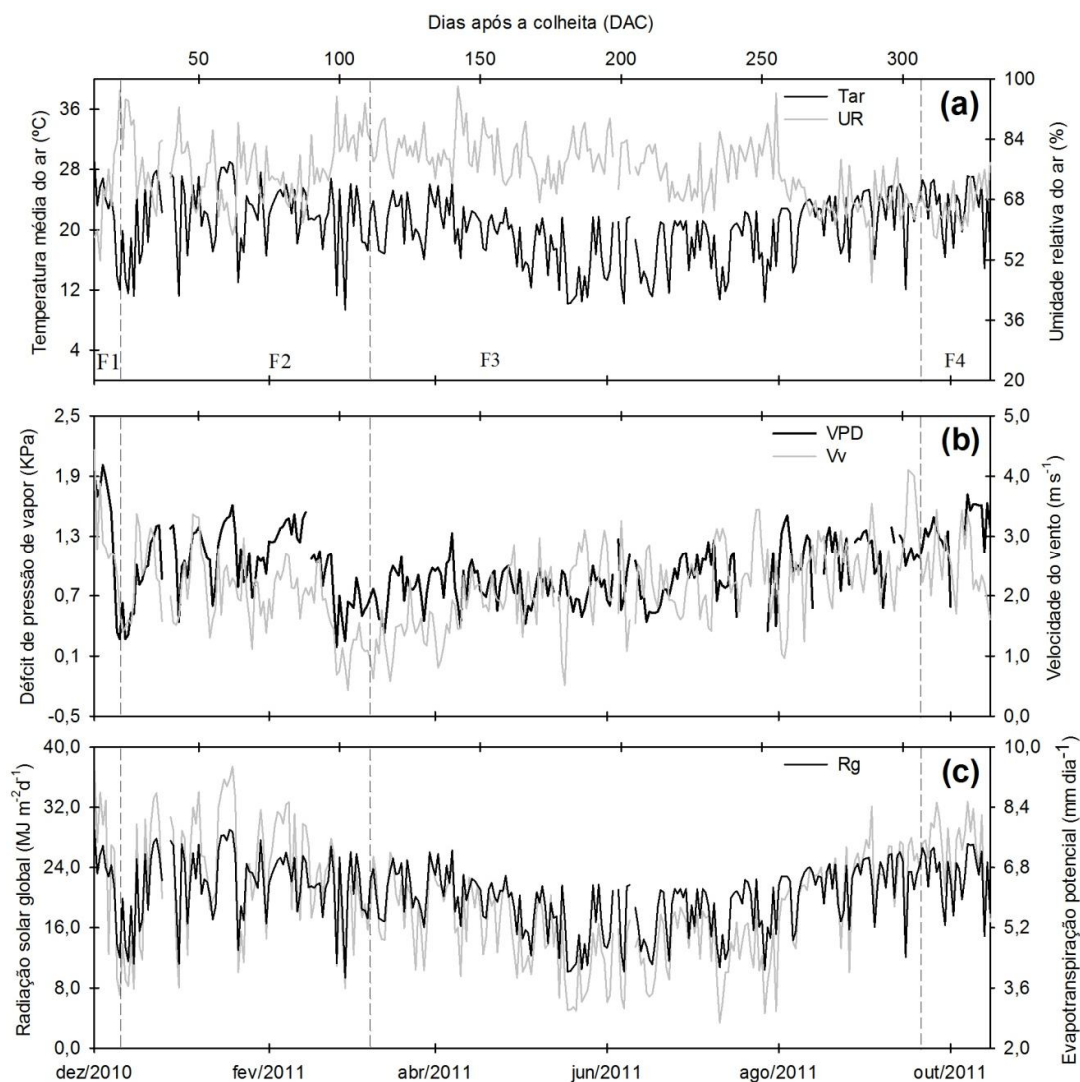


Figura 2. Valores diários das variáveis ambientais obtidas ao longo do ciclo de desenvolvimento da cana de açúcar, sendo: (a) radiação solar global (Q_g) e umidade relativa do ar (UR); (b) Temperatura (T_{ar}) e déficit de pressão de vapor (DPV); (c) velocidade do vento (V_v) e evapotranspiração de referência (E_{to}), Juazeiro-BA.

A fase III foi caracterizada pelas menores médias dos valores máximos (máximo de 1,5 KPa), bem como da maior variação na V_v , que oscilou entre 4,3 e 0,6 m s⁻¹, enquanto na fase IV foram constatadas as maiores médias dos valores mínimos de DPV , com o valor mínimo de 0,6 e maior média de 1,7 KPa. Nesta fase, os valores de V_v variaram entre 3,3 e 1,0 m s⁻¹. Os valores médios de DPV correspondentes às fases I, II, III e IV foram 1,4 KPa, 1,0 KPa, 0,9 KPa e 1,4 KPa, e de V_v foram 1,7 m s⁻¹, 1,5 m s⁻¹, 2,1 m s⁻¹ e 2,3 m s⁻¹, respectivamente. A temperatura média do ar (Fig. 2a) alcançou sua maior média no período F1, em torno de 26,6°C. Seus valores mínimos ocorreram em F3 (em torno de 24,6°C).

3.2 Balanço de energia

3.2.1 Análise de consistência dos dados do BERB

A análise da consistência física dos dados da razão de Bowen (β), foi feita com base nos critérios estabelecidos por Perez et al. (1999), e que rejeita os valores de β inferiores a $-0,75$. Foi analisado um total de 15504 dados médios diários obtidos para intervalos de 30 minutos ao longo do ciclo produtivo da cana, revelando que 56,8% deles foram considerados fisicamente consistentes (Tabela 1). No que concerne aos erros tipo “C”, constatou-se que a maior frequência ocorreu no período noturno, enquanto a menor frequência ao início e fim do dia, quando $Rn - G < 0$, totalizando 25,6%. Esta condição também favorece a ocorrência de erros de tipo “D”, que não foram constatados nesse estudo.

Outro tipo de erro que também não ocorreu neste estudo foi o erro de tipo “A”. Silva et al. (2011) ressaltam que erros desse tipo ocorrem particularmente após eventos de irrigação ou precipitação, condicionando valores de $H < 0$, quando os gradientes são negativos. Esses autores constataram 0,2% de erros do tipo “A” em estudo realizado em um cultivo de cana de açúcar irrigada por sulcos, com intervalo médio de sete dias entre os eventos de irrigação, condição que difere de maneira marcante da ocorrida no presente estudo, cuja irrigação era do tipo gotejamento subsuperficial com frequência diária. Perez et al. (1999) propuseram que sob condições de gradientes negativos os valores de H devem ser positivos.

Os erros do tipo “B” foram constatados em menor escala e ocorreram no período diurno em condições de $(Rn - G) > 0$ e gradientes negativos que condicionaram valores H negativos e LE positivos, quando somente o inverso seria verdadeiro.

Os casos em que os valores razão de Bowen foram inferiores a $-0,75$ foram responsáveis por 11,8% dos dados inconsistentes observados, sendo que, do total de dados analisados, 19,2% encontravam-se dentro da faixa de rejeição. Perez et al. (1999), utilizando o método da razão de Bowen em quatro localidades de clima semiárido, obtiveram dados consistentes entre 56 e 70%, Silva et al. (2011) obtiveram 62,8% dos dados válidos em seu estudo.

Após a análise de consistência dos dados e assumindo como dias válidos aqueles que apresentaram, pelo menos, 80% dos dados consistentes no período diurno (Silva, 2009), observou-se que a fase $F1$ não apresentou dias inválidos, enquanto a $F4$ destacou-se como a mais afetada, tendo 50% dos dias sido considerados inválidos (Tabela 1).

Tabela 1. Análise de consistência física dos dados da razão de Bowen (β), Juazeiro-BA.

Período (nº de dias)	Dados consistentes (%)*	Tipos de erro				$\beta < -0,75$ *	$(-1- \varepsilon) < \beta < (-1+ \varepsilon)^*$	Dias válidos (%)**
		A*	B*	C*	D*			
F1 (10 dias)	2,1	0,0	0,1	0,5	0,0	0,5	0,7	100
F2 (89 dias)	13,4	0,0	0,2	11,0	0,0	2,9	6,6	89,9
F3 (195 dias)	35,9	0,0	4,3	13,1	0,0	7,1	11,4	74,4
F4 (29 dias)	1,8	0,0	0,1	0,4	0,0	0,8	0,5	50,0
Ciclo	56,8	0,0	5,8	25,6	0,0	11,8	19,2	77,4

Obs.: *Considerando o número total de dados observados (15504 dados); **Considerando o número de dias monitorados (323 dias); Tipos de erro: “A”= $(Rn-G)>0; \Delta e>0; \beta < -1+|\varepsilon|$; “B”= $(Rn-G)>0; \Delta e<0; \beta > -1-|\varepsilon|$; “C”= $(Rn-G)<0; \Delta e>0; \beta > -1-|\varepsilon|$; “D”= $(Rn-G)<0; \Delta e<0; \beta < -1+|\varepsilon|$

A fase F3 apresentou os menores valores de β , bem como maior número de dias considerados inválidos (50 dias), representando 68,5% do total de dias rejeitados. Isso se deve ao tombamento característico da cana, que pode ocorrer nessa fase fenológica, após os 180 DAC, o que implica no aumento da distância entre o dossel da cultura e os psicrômetros do sistema BERB, reduzindo de forma bastante expressiva o gradiente de temperatura do ar (Δt_{bs}) e, em menor expressão, o gradiente da temperatura de bulbo úmido (Δt_{bu}). Em termos de ciclo, do total de 323 dias monitorados 77,4% (250 dias) foram considerados válidos para estimativa dos fluxos de LE e H . Para representar situações nas quais o método BERB funciona e quando ele falha na estimativa de H e LE foram escolhidos os dias julianos 222 (10-Agosto-2011) e 243 (31-Agosto-2011) respectivamente (Figura 3).

O dia 222 (a) apresentou valores de gradientes de temperatura do ar (Ta) e pressão de vapor d'água (e) positivos de pressão de vapor e temperatura, tanto no período noturno quanto diurno. No entanto, no período entre 00h30min e 6h30min observaram-se valores de $\beta < -1$, que estão dentro da faixa de rejeição devido à ocorrência de valores de gradientes muito pequenos, quando relacionados com a faixa de resolução dos sensores, o que levou a valores de $H > 0$ e de $LE < 0$ fisicamente inconsistentes, pois, atendendo às condições de $(Rn - G) < 0$ e de $\Delta e > 0$, somente seria possível $H < 0$ e $LE > 0$ (PEREZ et al., 1999). De acordo com Silva (2011), tais condições acusam atmosfera estável, o que leva à obtenção de

valores inconsistentes de β e, conseqüentemente, dos fluxos de H e de LE . Entre 07h30min e 17h00min, os valores de H e LE mostraram-se maiores que zero, atendendo às condições de $(Rn - G) > 0$, implicando na obtenção de gradientes positivos e de valores de $\beta > 0$, sendo considerados, portanto, fisicamente consistentes.

Analisando o dia 243 (b), notou-se tanto para o período noturno quanto para o diurno, a predominância de valores de gradientes e de β inferiores a zero, porém não foram constatados valores β inferiores a -0,75. No entanto, no período noturno, foram obtidos gradientes de temperatura e de pressão de vapor muito pequenos que se aproximaram do limite de resolução dos sensores, tornando os valores de β inconsistentes e, portanto, dentro da faixa de rejeição $(-1 - |\epsilon|) < \beta < (-1 + |\epsilon|)$ (PEREZ et al., 1999). Em decorrência disso, predominaram valores de $H > 0$ e $LE < 0$, condição considerada como inconsistente quando $(Rn - G) < 0$ e $\beta < -1$.

Para o período diurno, com $(Rn - G) > 0$, verificaram-se valores inconsistentes de $H < 0$ e de $LE > 0$, caracterizando o erro tipo “B”, que já fora anteriormente comentado.

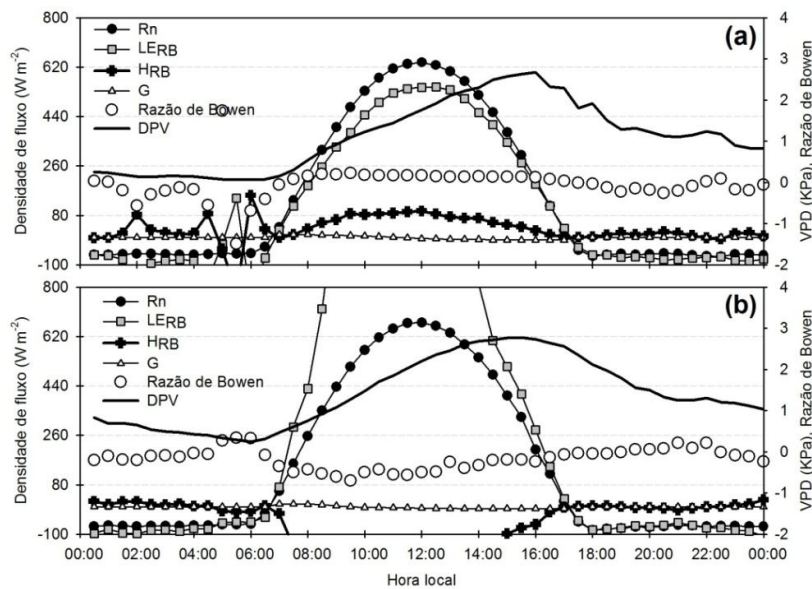


Figura 3. Curso diário (dados médios de 30 minutos) do balanço de energia com base na razão de Bowen para a cultura da cana de açúcar. (a) dia 10/08/2011, considerado válido e (b) dia 31/08/2011, considerado inválido na estimativa dos fluxos de H e de LE , Juazeiro-BA.

3.2.2 Fechamento do balanço de energia pelo método das correlações turbulentas

O fechamento do balanço de energia pelo método *EC* durante o período de estudo foi realizado em escala diária (Figura 4). Nessa escala de tempo, os erros concernentes às medições do fluxo de calor no solo atribuídos às variações da umidade do solo e nível de sombreamento são reduzidos. O valor médio da razão entre $(H + \lambda E)_{EC}$ e $(Rn - G)$ foi de 74,0% (a), com uma raiz do erro médio quadrático (RMSE) de $4,0 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$, que correspondeu a 27,2% da energia disponível. Teixeira e Bastiaansen (2012) encontraram RMSE de $1,7 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$, próximo do limite mínimo da faixa de 10 a 30% comumente encontrado na literatura. Wilson et al. (2002) avaliaram o fechamento do balanço de energia em 50 períodos de um ano em 22 localidades, com períodos de observações entre 1 e 4 anos em cada localidade, e encontraram valores variando entre 15 e 30% para a desigualdade entre $(H + \lambda E)_{EC}$ e $(Rn - G)$, para todas as localidades. Em primeira análise, pode-se afirmar que os valores de H_{EC} e de λE_{EC} , ou mesmo de $(H + \lambda E)_{EC}$ não são confiáveis quando suas medidas de fluxos refletem erros do próprio sistema, como os causados por chuva e pela ausência de correção ou exclusão de dados referentes ao compasso da direção do vento quando fora do eixo do vento predominante considerado. Quando os efeitos destes erros são corrigidos, a energia armazenada no dossel das plantas, considerando que a cana de açúcar apresenta alta densidade de colmos e de folhas, pode resultar como fonte de erro para o não-fechamento entre os fluxos de energia obtidos e a energia disponível. Vale ressaltar que este parâmetro não está incluso no cômputo dos valores dos fluxos pelo método *EC*.

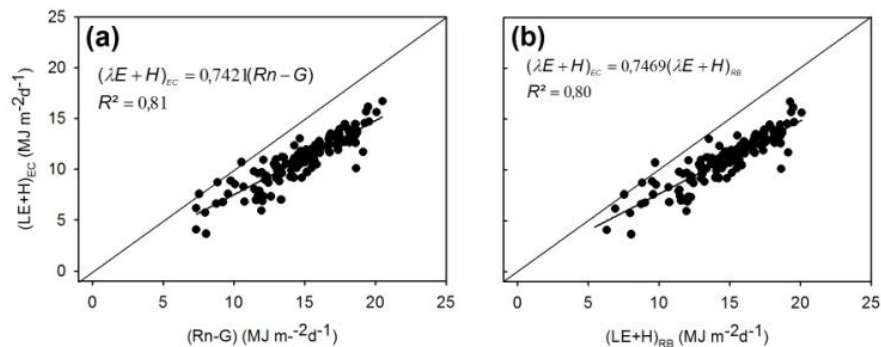


Figura 4. Relação entre a soma dos fluxos de calor latente e sensível determinado pelo método das correlações turbulentas $(LE + H)_{EC}$ com a energia disponível $(Rn - G)$ (a) e com a soma dos fluxos de calor latente e sensível determinado pelo método da razão de Bowen $(LE + H)_{RB}$ para a cana de açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial no Submédio do Vale São Francisco, Juazeiro-BA.

3.2.3 Comparação entre os fluxos de energia obtidos pelos dois métodos

Os métodos *EC* e *BERB* particionaram a energia disponível ($Rn - G$) de maneira diferente. A Tabela 2 sumariza os valores dos fluxos médios diários por fase de desenvolvimento, bem como a fração evaporativa média diária para cada fase e para o ciclo.

Quando se analisa a fração evaporativa, verificou-se que as fases *F2* e *F3* destacaram-se como mais representativas do ciclo produtivo da cana por condicionarem maior número de dias com medidas válidas. Ambos os métodos apresentaram valores semelhantes, embora o método *EC* tenha produzido valores ligeiramente inferiores, indicando subestimativa nos valores de λE_{EC} em relação ao método *BERB*. Contudo, ambos os métodos confirmaram que a maior parte da energia disponível ao sistema foi convertida em evapotranspiração atual (ETa) (Tabela 2). Verificou-se na fase *F1* que os valores de λE_{EC} foram muito pequenos, enquanto os de λE_{RB} apresentaram-se mais elevados do que os obtidos nas outras fases. Em *F4*, a suspensão da irrigação condicionou impacto sobre a fração evaporativa, uma vez que a energia disponível foi particionada quase que por igual entre H_{RB} e λE_{RB} (Tabela 2).

Na Figura 4 estão apresentadas as densidades de fluxos obtidas pelos métodos *BERB* (a) e de *EC* (b) determinados ao longo do período de estudo. Verificou-se que os valores de λE_{RB} mostraram-se superiores aos valores de H_{RB} , com exceção para períodos compreendidos entre 23/12/2010 e 07/01/2011 em que ocorreu reduções bruscas nos valores de λE_{RB} e elevação dos valores de H_{RB} .

O método *EC* também apresentou valores de λE superiores aos de H na maior parte do ciclo produtivo da cultura, com exceção para o início e final do ciclo, em que os valores de H_{EC} mostraram-se superiores aos de λE_{EC} , em que, na fase *F1* o valor médio do fluxo de H foi ligeiramente superior ao de λE (Tabela 2). Comportamento similar foi constatado para *F4*, em que a diferença entre estes fluxos apresentou-se mais acentuada. Os maiores valores de erro padrão de estimativa da média obtidos para as fases *F1* e *F2* quando comparados com os dos outros períodos de desenvolvimento da cultura, indicam que as variações entre os valores dos fluxos de calor sensível e de calor latente obtidos pelos dois métodos foram maiores na fase inicial e final do ciclo de cultivo.

Comparando-se os dois métodos (Figura 5a, b e c) observou-se que os valores de H_{RB} foram predominantemente mais elevados do que H_{EC} , até por volta dos 180 DAC, quando ocorreu o tombamento característico da cultura, o que proporcionou o aumento da distância entre os psicrômetros do sistema *BERB* e o dossel da vegetação. Como consequência, ocorreu

uma redução nos valores dos fluxos de H_{RB} , tornando-os ligeiramente inferiores aos de H_{EC} , mas que voltou a se elevar em $F4$, quando ocorreu a suspensão da irrigação para maturação fisiológica da cultura. Esta redução pode ser decorrente da diminuição do IAF decorrente do tombamento que, por sua vez, promove redução na quantidade de água evapotranspirada.

Tabela 2. Componentes do balanço de energia pelos métodos das correlações turbulentas (EC) e da razão de Bowen (RB), em cana de açúcar variedade RB 92579, no Submédio São Francisco.

Fases	(Rn-G)	H_{EC}	λE_{EC}	$\frac{\lambda E_{EC}}{Rn - G}$	H_{RB}	λE_{RB}	$\frac{\lambda E_{RB}}{Rn - G}$
F1	14,5±0,9	5,4±1,6	4,3±0,7	0,29	3,5±0,4	11,4±0,9	0,79
F2	15,9±0,3	3,2±0,1	9,9±0,4	0,62	6,7±0,3	10,2±0,3	0,64
F3	13,0±0,2	1,8±0,1	9,4±0,3	0,72	3,4±0,2	10,0±0,2	0,77
F4	14,5±0,5	5,4±0,3	1,1±0,1	0,08	7,8±0,4	7,5±0,5	0,52
Ciclo	14,5±0,5	3,95±0,5	9,6±0,4*	0,66*	5,3±0,4	9,8±0,5	0,68

*Valores compreendendo o período das fases F2 e F3, considerado como mais representativo para o método EC por apresentar maior quantidade de dias com medidas obtidas.

Considerando-se os valores médios diários obtidos ao longo do ciclo de cultivo da cana, verificou-se que a soma $(H + \lambda E)_{EC}$ mostrou-se cerca de 25% inferior à $(H + \lambda E)_{RB}$, uma vez que o método $BERB$ força o fechamento do balanço entre os fluxos de energia e a energia disponível (Fig. 4b). Por outro lado, comparando-se os fluxos de calor sensível, observou-se que o método EC desfavorece o cálculo dos valores de H , uma vez que H_{EC} foi cerca de 58% inferior ao de H_{RB} . Essa discrepância, certamente, pode ser atribuída a distorções no fluxo do vento, que são causadas pelo corpo dos sensores e pelas estruturas de montagem do sistema quando o vento sopra em direções diferentes daquela da direção predominante.

Quando se compara os valores de λE determinados por ambos os métodos, verificou-se que o valor de λE_{EC} foi inferior ao de λE_{RB} em apenas 19%, implicando numa diferença de 6% para menos na comparação entre $(H + \lambda E)_{EC}$ e $(H + \lambda E)_{RB}$, indicando que os valores obtidos apresentaram boa representatividade da energia disponível e que, portanto, são viáveis para obtenção da evapotranspiração (ETc) e, conseqüentemente, do coeficiente de cultivo (Kc) da cultura. Teixeira e Bastiaanssen (2012) verificaram subestimativa de 18% dos valores de λE_{EC} com relação aos de λE_{RB} .

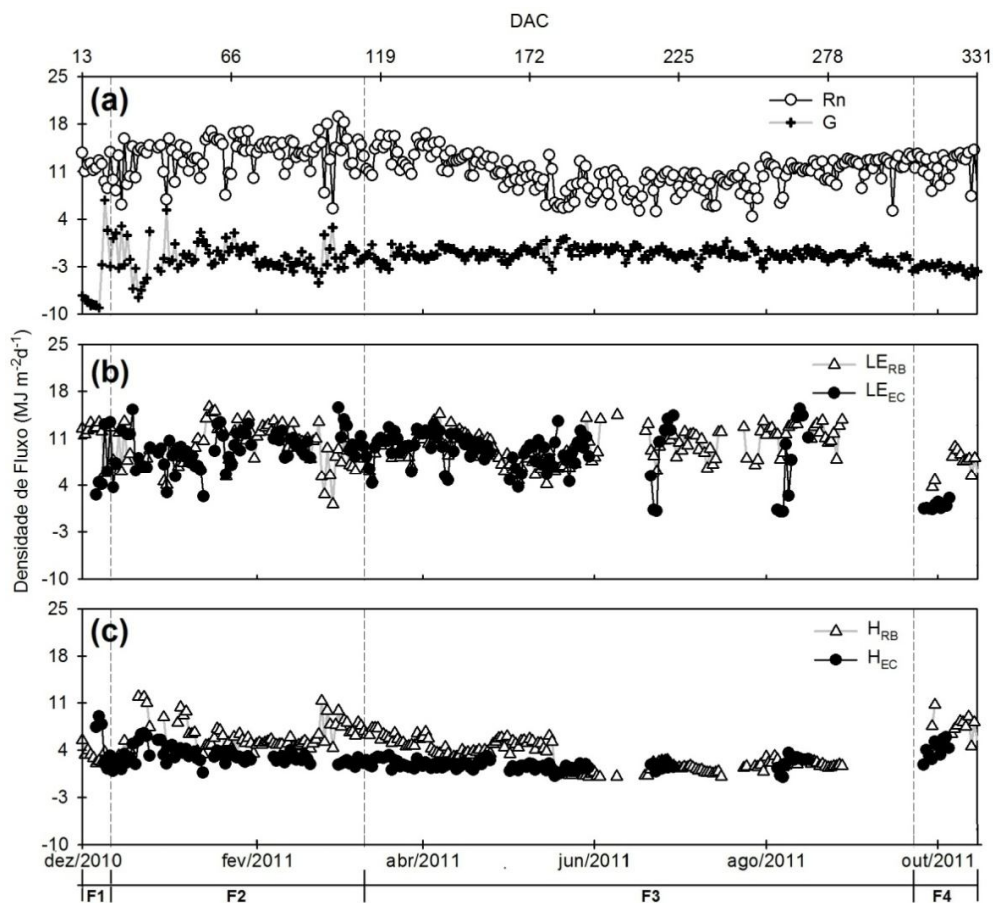


Figura 5. Totais diários dos fluxos de energia determinados na cana de açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial no Submédio do Vale São Francisco. (a) Saldo de radiação (R_n) e fluxo de calor no solo (G); (b) Fluxo de calor latente (LE) e (c) Fluxo de calor sensível (H) determinados pelos métodos das correlações turbulentas (EC) e razão de Bowen ($BERB$), Juazeiro-BA.

A Figura 7 compara os valores médios de 30min dos fluxos de calor latente (a) e de sensível (b) ao longo do dia. O dia escolhido foi um dia de céu aberto ($Kt > 0,65$), na fase de máximo crescimento da cultura ($F3$), na qual a cana de açúcar encontrava-se plenamente desenvolvida e, portanto, com a máxima atenuação dos turbilhões de alta frequência (CABRAL et al., 2012). Constatou-se, durante o período noturno, que λE_{RB} apresentou valores negativos e inferiores aos de λE_{EC} , que apresentaram valores positivos. Durante a noite, λE_{RB} foi negativo e praticamente igual à $(R_n - G)$, enquanto λE_{EC} apresentou valores mais elevados próximos de zero. Verificou-se também que H_{RB} e H_{EC} apresentaram valores praticamente iguais no período noturno, enquanto durante o período diurno H_{EC} mostrou-se levemente inferior a H_{RB} .

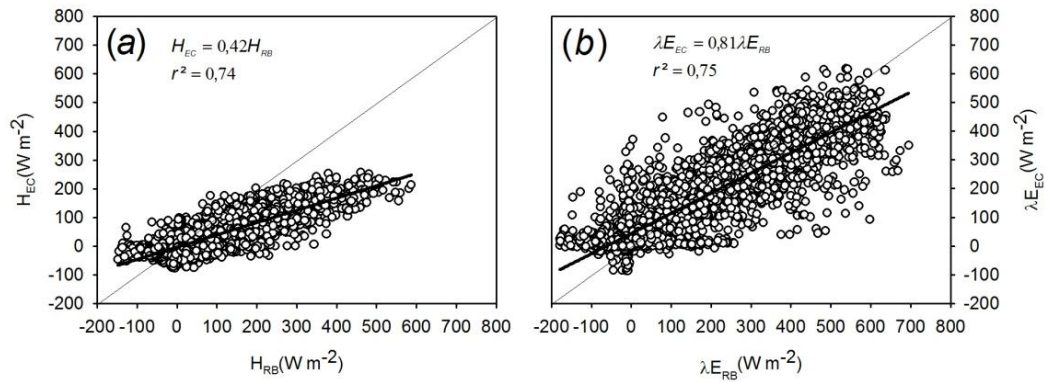


Figura 6. Relação entre os fluxos de calor sensível (a) e calor latente (b) determinados pelos métodos das correlações turbulentas (*EC*) e da razão de Bowen (*BERB*) para a cana de açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial no Submédio do Vale São Francisco

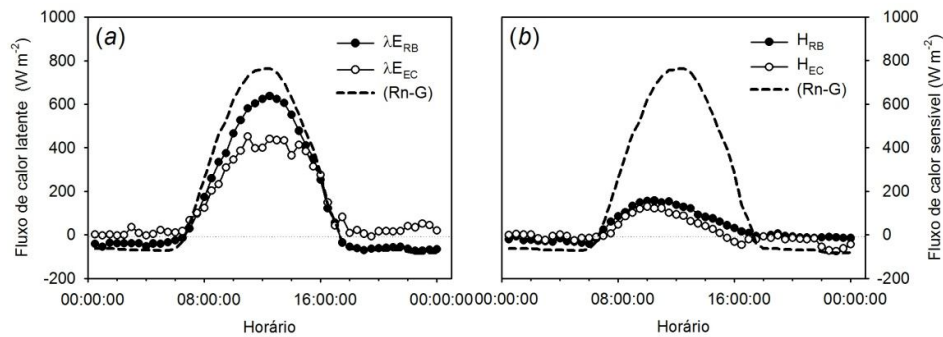


Figura 7. Fluxos de calor latente (*LE*) (a) e de calor sensível (*H*) (b) determinados pelos métodos das correlações turbulentas (*EC*) e da razão de Bowen (*RB*) e a energia disponível ($Rn - G$) para um dia de sol pleno do ciclo de cultivo da cana de açúcar no Submédio São Francisco, Juazeiro-BA.

3.3 Evapotranspiração e coeficiente de cultura

A Figura 8 mostra a variação da evapotranspiração diária para a cana de açúcar (a), ao longo do seu ciclo de cultivo, obtida pelos dois métodos, bem como a evapotranspiração de referência (b). Constatou-se que os valores de ET_{CRB} variaram entre 1,5 e 7,4 mm dia⁻¹ ao longo do ciclo, enquanto os valores de ET_{CEC} variaram entre 1,2 e 7,1 mm dia⁻¹. Constatou-se para a primeira fase de desenvolvimento da cultura (F1), que os valores de ET_{CRB} foram superiores aos de ET_{CEC} , variando entre 4,8 e 5,5 mm dia⁻¹, e 1,3 a 4,0 mm dia⁻¹, com valor

médio de $5,1 \pm 0,23$ e $2,2 \pm 1,56$ mm dia⁻¹, respectivamente. Essa diferença acentuada pode ser decorrente da grande diferença entre os níveis de medida dos distintos métodos. Constatou-se também que o valor de *ETcRB* mostrou-se bastante superior ao obtido por Silva et al., (2012) que utilizando sistema *BERB*, constatou para essa fase, valor médio de 3,0 mm dia⁻¹ para a mesma variedade, em cultivo de cana de açúcar irrigada por sulco. Essa fase é caracterizada pela brotação das gemas e pelo início de desenvolvimento da planta, de modo que, a quantidade de vapor d'água transferido para a atmosfera é oriundo, majoritariamente, da evaporação a partir da superfície do solo por se encontrar praticamente desnudo. Os dias dessa fase apresentaram, em sua maioria, um valor de *Kt* superior a 0,55, enquanto o fluxo de calor no solo tornou-se predominantemente negativo durante o período diurno, indicando elevada taxa evaporativa, o que vem a concordar com o elevado valor mínimo obtido de *ETcRB* (Figura 8, b). O período entre o final de *F1* e o início de *F2* foi marcado por eventos de precipitação de volume muito pequeno. No período inicial de *F2*, *ETcRB* e *ETcEC* mostraram tendência semelhante, tendo os valores menores sido obtidos no início, mas que tenderam a se elevar até os 80 DAC, quando então as condições de nebulosidade influenciaram de modo marcante a energia disponível e, conseqüentemente, os valores de *ETc*. Os valores médios constatados para esta fase oscilaram entre 2,1 a 7,4 mm dia⁻¹ e 1,3 a 6,8 mm dia⁻¹ para *ETcRB* e *ETcEC* respectivamente, com médias de $4,1 \pm 1,22$ e $3,7 \pm 1,06$ mm dia⁻¹, respectivamente (Fig.8).

Valores semelhantes foram constatados na fase seguinte (*F3*), com *ETcRB* variando de 1,7 a 7,1 mm dia⁻¹ (média de $4,1 \pm 0,99$ mm dia⁻¹) e *ETcEC* variando entre 1,2 e 7,1 mm dia⁻¹ (média de $3,8 \pm 1,12$ mm dia⁻¹). Essa fase corresponde ao período de máximo crescimento vegetativo e que pode apresentar maiores valores de *ETc* quando comparados com os das demais fases, condição esta não constatada no presente estudo (Fig 8). Os baixos valores de *ETc* mostraram-se relativamente reduzidos nessa fase em decorrência da coincidência com o período de inverno, em que a disponibilidade de energia é reduzida, as temperaturas são mais amenas, o que resulta numa menor demanda evapotranspirométrica da atmosfera.

A fase *F4* é caracterizada pela suspensão da irrigação para condicionar a maturação fisiológica da cultura, o que implica numa redução da *ETc*, como se pode observar com os valores de *ETcRB*, que mostraram um declínio acentuado (Figura 8), apresentando valores que oscilaram entre 1,4 mm e 4,0 mm e média de $3,0 \pm 0,7$ mm.. Em termos gerais, a evapotranspiração média diária obtida pelo método *eddy covariance* apresentou-se inferior

à obtida pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen, cujas médias foram da ordem de $3,7 \pm 1,12$ e $4,1 \pm 1,09$ respectivamente.

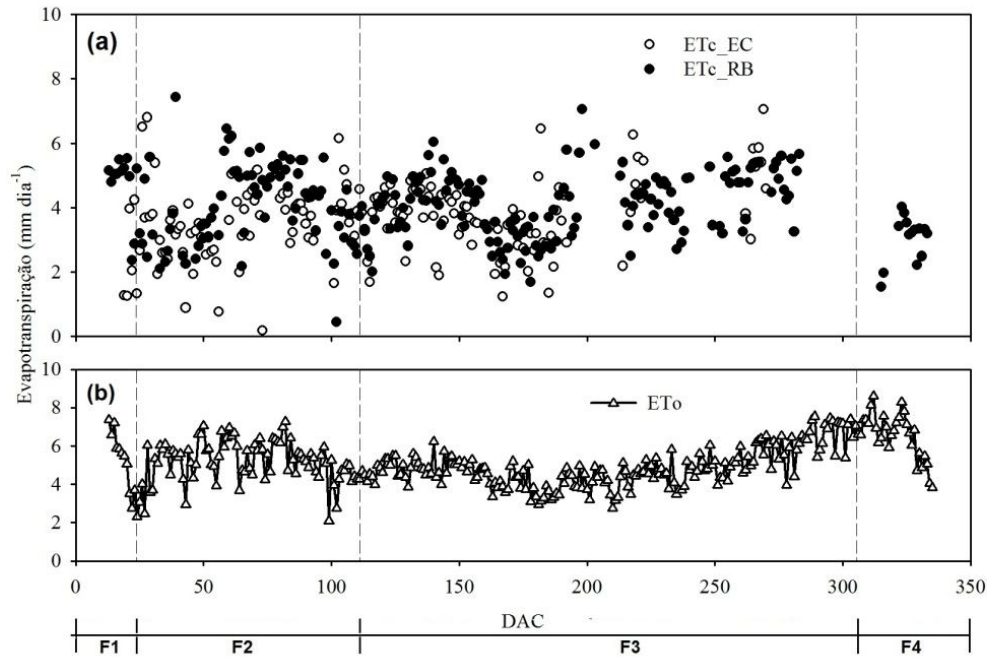


Figura 8. Evapotranspiração de cultivo ao longo do ciclo da cana de açúcar, obtida pelos métodos *BERB* (*ETcRB*) e *EC* (*ETcEC*), Juazeiro-BA.

Analisando-se o comportamento do coeficiente de cultivo obtido para a cultura da cana-de-açúcar ao longo do seu ciclo produtivo, observou-se para a fase 1 que os valores variaram entre 0,23 e 1,13 para o método *EC* e entre 0,70 e 0,86 para o método *BERB*, cujas médias foram de $0,54 \pm 0,51$ e de $0,75 \pm 0,07$ respectivamente (Figura 9). Vale salientar que as medições e armazenamento dos dados se iniciou aos 13 DAC, quando foi finalizada a instalação completa dos equipamentos e que eventos de precipitação ocorreram ao final da fase 1. Verificou-se que os valor de *Kc_EC* médio obtido foi próximo aos valores determinados por Inman-Bamber; Mc Glynchey (2003) (0,4) e pela FAO (Allen et al, 1998) (0,40), enquanto o valor médio de *Kc_RB* foi bastante superior, devido à grande diferença entre os valores de *ETcEC* e de *ETcRB* nessa fase de desenvolvimento, porém. No entanto, o valore de *Kc_RB* obtido foi mais próximo do valor determinados por Silva et al. (2012), que foi da ordem de 0,65 para a mesma variedade, sob condições climáticas semelhantes e utilizando o método *BERB*, porém com data de início do ciclo e sistema de irrigação diferentes. Vale salientar que o *Kc* médio para a fase inicial da cana de açúcar sob condições

de alta frequência de irrigação ou períodos chuvosos pode aumentar substancialmente podendo alcançar valores de 1,2..

Constatou-se na fase F2, que é caracterizada pelo estabelecimento e perfilhamento da cultura, que os valores de Kc_{EC} foram mais elevados que os da fase F1, variando entre 0,38 e 1,62, com média de $0,74 \pm 0,26$. Os valores de Kc_{RB} apresentaram elevação menos acentuada com relação aos valores da fase 1 variando entre 0,35 e 1,56, com média de $0,79 \pm 0,22$ de modo que as médias dos dois métodos apresentaram valores muito próximos (Figura 9). Na fase F3, que é caracterizada pelo máximo crescimento da cultura, de março a setembro, foi constatada maior equidade na terminação dos valores de Kc determinados pelos dois métodos com relação à fase anterior, com Kc_{EC} variando entre 0,31 e 1,70, apresentando média de $0,83 \pm 0,24$, que apresentou-se ligeiramente inferior à média do Kc_{RB} ($0,87 \pm 0,14$). Nessa fase, com a cultura plenamente estabelecida e o solo totalmente encoberto, a ET depende, predominantemente da transpiração das plantas, que foi influenciada pelas características climáticas predominantes. Pôde-se constatar que os valores apresentados apresentaram-se bastantes inferiores aos valores informados no boletim 56 da FAO (1,25). Em região semiárida da Tailândia, Watanabe et al. (2004) encontraram um valor médio de 1,10 para a fase de máximo crescimento da cana de açúcar, o mesmo constatado por Silva et al. (2012) sob condições climáticas do semiárido brasileiro, porém o período de máximo crescimento da cultura coincidiu com a estação mais quente e seca nos dois estudos. Do mesmo modo, Gonçalves (2010) obteve Kc médio de 1,03 para a fase de máximo crescimento da cana de açúcar irrigada por gotejo subsuperficial, no estado do Ceará, plantada no mês de julho.

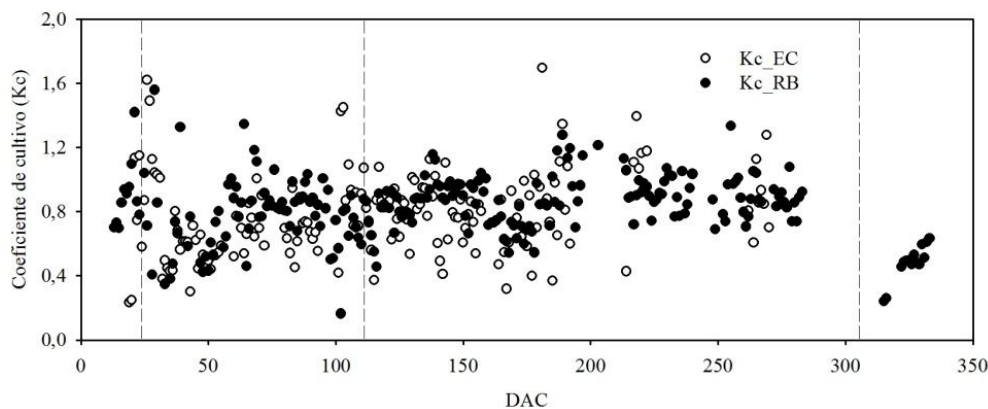


Figura 9. Valores médios diários do coeficiente de cultivo (Kc) da cana de açúcar obtido pelos métodos EddyCovariance e Balanço de Energia – Razão de Bowen, Juazeiro-BA.

Na última fase de desenvolvimento (*F4*), que corresponde à fase de maturação da cana-de-açúcar, observou-se que o valor médio de *KcRB* apresentado pela cultura foi de $0,52 \pm 0,1$ (variação entre 0,24 e 0,78), enfatizando o estresse hídrico ao qual a cultura foi submetida. A FAO recomenda, para esse estágio, *Kc* de 0,75 para cultivos sem estresse hídrico, bem manejados, em climas sub-úmidos ($UR_{\text{mínima}} \approx 45\%$; $Vv \approx 2 \text{ m s}^{-1}$). Não foi possível obter o *KcEC* para essa fase devido à ocorrência de problemas com a aquisição de dados.

Com os valores de *Kc* definidos para cada fase de desenvolvimento da cana de açúcar, foram feitas extrapolações dos valores de *ETc* para os dias excluídos (considerados inválidos), bem como para os dias no início e final do ciclo, nos quais não foram realizadas medições, com exceção para a fase *F4*, pelo método *EC*, devido à falha no armazenamento de dados. Por fim, obtiveram-se a *ETc* acumulada para o ciclo de cultivo, bem como para cada uma das fases de desenvolvimento da cana, (Figuras 10 e 11). A *ETcRB* acumulada para todo o ciclo cultivo foi da ordem de 1478 mm, inferior à demanda atmosférica ($ET_o=1805 \text{ mm}$), bem como aos 1687 mm que entraram no sistema por precipitação e irrigação ($P + I$). Da lâmina de água total que entrou no sistema, 1497 mm foram aplicados por irrigação e apenas 190 mm foram devidos à precipitação pluviométrica.

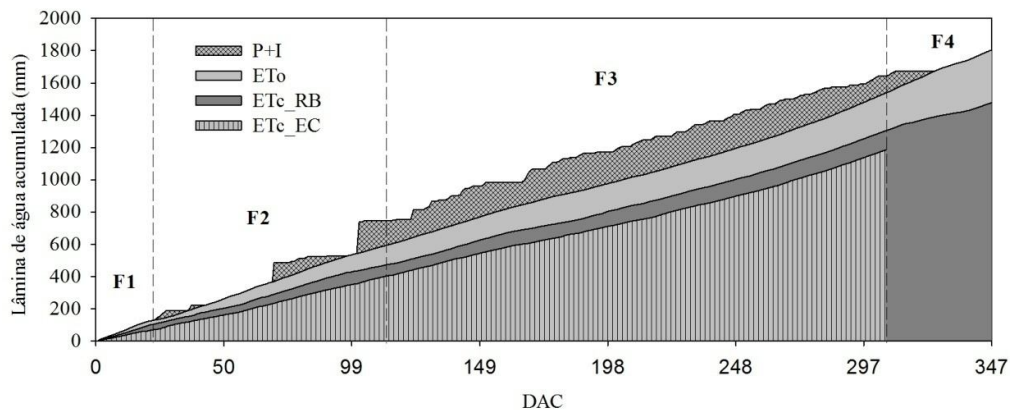


Figura 10. Acúmulo das lâminas de entrada ($P + I$) e saída ($ETcEC$ e $ETcRB$) ao longo do ciclo de cultivo da cana de açúcar.

Analisando-se a demanda de água da cana em cada uma das fases de desenvolvimento, constatou-se que na fase *F1* os valores acumulados de $ETcRB$ e de $ETcEC$ foram da ordem de 103 mm e 69 mm, enquanto a lâmina de água que entrou no sistema por $P+I$ foi da ordem de 127 mm, dos quais 106 mm foram devidos à irrigação e apenas 21 mm foram oriundos de precipitação pluviométrica. Esses valores indicam que a demanda de água pela cultura foi

atendida nessa fase, havendo, inclusive, um pequeno excesso na lâmina aplicada. A fase *F2* de desenvolvimento da cana apresentou valores de consumo de água semelhantes entre os métodos *BERB* e *EC* tendo acumulado 364 mm e 330 mm respectivamente. No entanto, a lâmina de água que entrou no sistema por irrigação foi de 508 mm que somados aos 113 mm que entraram por precipitação totalizaram uma lâmina de água de 621 mm nesta fase, excesso que promoveu a saturação hídrica do solo que, combinada à elevada umidade relativa do ar constatada nessa fase (média de 76,4%) possivelmente pode ter contribuído para os baixos valores de *ETc* e *Kc* obtidos. Vale ressaltar que a umidade relativa do ar média para cada fase de desenvolvimento foi inferior a 70% apenas na fase *F4*. Na fase de máximo crescimento vegetativo (*F3*) constatou-se que a lâmina de água que entrou no solo por *P + I* foi da ordem de 894 mm (*P* = 43 mm e *I* = 851 mm) enquanto a lâmina de água requerida determinada pelo método *BERB* foi 837 mm, e pelo método *EC*, 787 mm. A fase final do ciclo de cultivo, caracterizada pelo pela suspensão da irrigação, apresentou demanda de água de 173 mm, determinada pelo método *BERB*, uma vez que, nesse período, o método *EC* apresentou problemas no armazenamento de dados. No entanto, o processo de maturação fisiológica, que visa o aumento no acúmulo de sacarose nas plantas, induzido pelo estresse pode ter sido afetado devido à presença de água disponível no solo, acumulada ao longo das fases *F1*, *F2* e *F3* nas quais a lâmina de água aplicada excedeu a lâmina demandada pela cultura (Figura 11). Vale salientar que o *Kc* utilizado na irrigação da cana de açúcar ao longo do ciclo do presente estudo foi determinado por Silva et al. (2012), os quais, com exceção da fase *F1*, são superiores aos constatados no presente estudo, justificando, portanto a lâmina de água de irrigação superior à lâmina de água demandada pela cultura.

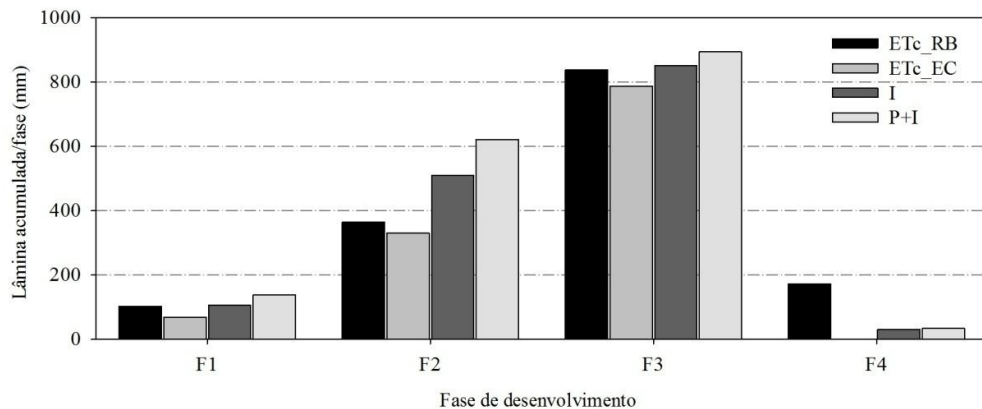


Figura 11. Lâminas de entrada (*P + I*) e saída (*ETcEC* e *ETcRB*) de água em cada fase de

desenvolvimento da cultura e total acumulado ao final do ciclo, Jazeiro-BA.

CONCLUSÕES

1. Constatou-se que o método das correlações turbulentas subestimou os valores dos fluxos de energia e, por consequência, a evapotranspiração da cultura, quando comparados com os fluxos obtidos pelo método da razão de Bowen;

2. Ambos os métodos revelaram que a maior parte da energia disponível (~67%) foi convertida em evapotranspiração real;

3. A evapotranspiração média diária da cultura diferiu entre os dois métodos, apresentando valores de 3,6 e 4,1 mm d⁻¹ para os métodos *EC* e *BERB*, resultando em um requerimento hídrico total de 1478 mm.

4. Ao longo do ciclo decultivo da canadeaçúcar, os valores do coeficiente de cultura foram da ordem de 0,54 e de 0,75 na fase F1, 0,74 e 0,79 para a fase F2, 0,83 e 0,87 na fase F3 para os métodos *EC* e *BERB*, respectivamente, e 0,52 para a fase F4 pelo método *BERB*.

5. A lâmina de água aplicada ao longo do ciclo produtivo foi superior à evapotranspiração da cultura devido ao Kc utilizado para realizar as irrigações em cada fase de desenvolvimento ter sido maior do que o obtido no presente estudo.

LITERATURA CITADA

- ALLEN, R. G.; PEREIRA L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement Accuracy. **Agricultural Water Management, Amsterdam**, v. 98, p. 899-920, 2011.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guide-lines for computing cropwaterrequirements. In: United Nations FAO, **Irrigation and Drainage Paper 56**. FAO, Rome, Italy. 1998.
- CABRAL, O. M.R. et al. Water use in a sugarcane plantation. **Global Change Biology: Bioenergy**. v. 4, p. 555-565, 2012.
- GONÇALVES, F. M. **Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da cana de açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial**. 2010. 65 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- 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**, Amsterdam, 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**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.
- MARIN, F. **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. 2003. Tese (Doutorado) 134 f. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- MOURA, M. S. B.; SOARES, J. M.; GURGEL, M. T.; SILVA, T. G. F. Balanço de energia na cana de açúcar irrigada no Submédio São Francisco. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 27, 2007, Mossoró. **Anais...** Mossoró: ABID, 2007. 1 CD-ROM.
- PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 97, p. 141-150, 1999.
- RIGHI, E. Z. **Balanço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. 2004, 168 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- SILVA, C. T. S.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V.; DANTAS NETO, J.; CARVALHO, C. M.; GOMES FILHO, R. R. Crescimento da cana de açúcar com e sem irrigação complementar sob diferentes níveis de adubação de cobertura nitrogenada e potássica. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v.3, n.1, p.3–12, 2009
- SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 705-712, 2005.
- SILVA, T. G. F.; **Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera eficiência do uso de água da cana de açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco**. 2009. 176 f. Tese (doutorado). Universidade Federal de Viçosa.
- SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; JUNIOR, W. F. G. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana de açúcar irrigada

no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v.15, n.12, p.1257–1265, 2011.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; JUNIOR, W. F. G. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana de açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v.16, n.1, p.64–71, 2012.

SILVA, T. J. A. **Evapotranspiração e coeficiente de cultivo de maracujazeiros determinados pelo método do balanço de radiação e lisimetria de pesagem hidráulica**. 2005. 113 f. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de

SILVA, W. F.; AGUIAR, D. A.; RUDHORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M.; AULICINO, T. L. I. N. **Análise da expansão da área cultivada com cana de açúcar na região Centro-Sul do Brasil: safras 2005/2006 a 2008/2009** Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 467-474.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy conductance. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 169-184, 1998.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. II. Variation in coupling with the atmosphere and the role of leaf area index. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 201-213, 1998.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. III. Validity of Bowen ratio–energy balance technique for measuring water vapor and carbon dioxide fluxes at 5-min intervals. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 215-228, 1998.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; BASSOI, L. H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the Sao Francisco river basin, Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 94, p. 31–42, 2007.

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; Five methods for interpret Field measurements of energy fluxes over a micro-sprinkler-irrigated mango orchard. **Irrigation Science**, v. 30, p 13-28, 2012.

TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, p. 335–348, 2000.

VILLA NOVA, N.A. **Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz**. 1973, 89 f. Tese (Livre-Docência). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Com este estudo foi possível conhecer as relações entre os componentes do balanço de radiação nas diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial no Submédio do Vale São Francisco, bem como alguns indicadores agrometeorológicos do crescimento da cultura. O período de estudo ocorreu sob condições climáticas dentro dos limites exigidos pela cultura, com o suprimento de água feito por meio de irrigação. Observou-se que o desenvolvimento da cana-de-açúcar pode ser representado por meio de medidas da radiação fotossinteticamente ativa acima e abaixo do dossel, que refletem a fração de cobertura do solo e pelo índice de área foliar.

A maior absorção de energia pelo sistema em estudo ocorreu no início do ciclo de cultivo, quando o albedo médio foi 19% na Fase I, evoluindo para 21, 25 e 26% nas fases II, III e IV, respectivamente. O saldo de radiação médio diário foi de $13,8\text{MJ m}^{-2}$, $15,4\text{MJ m}^{-2}$, $13,0\text{ MJ m}^{-2}$ e $14,4\text{ MJ m}^{-2}$, correspondentes às fases de F1 a F4, respectivamente, representando 58, 65, 62 e 59% da radiação solar incidente, respectivamente. Durante todo ciclo produtivo, a radiação fotossinteticamente ativa incidente sobre o dossel da cana-de-açúcar totalizou $2.948,99\text{ MJ m}^{-2}$, representando em média, 44,26% da radiação solar global à superfície. Vale salientar, ainda, em termos diários, que as condições de nebulosidade influenciaram de modo marcante nos componentes do balanço de radiação, com exceção da irradiância de ondas longas pela superfície em condições de plena cobertura do solo, e em menor escala o albedo, que demonstrou também dependência do ângulo de inclinação solar.

No que se refere ao balanço de energia, foram utilizadas duas metodologias: razão de Bowen e correlações turbulentas. Pode-se observar que as medidas dos fluxos foram influenciadas tanto pela sazonalidade e pelo crescimento da cultura, quanto pelo da planta. Além disso, foi possível constatar, que o método das correlações turbulentas subestimou os valores da energia disponível em 26%, devido, principalmente, à subestimativa dos fluxos de calor sensível ao longo do ciclo e do fluxo de calor latente ao início e final do ciclo. No entanto, os fluxos de calor latente obtidos pelo método das correlações turbulentas apresentaram maior conformidade com os obtidos pelo método da Razão de Bowen do que os fluxos de calor sensível, de modo que os valores diários da fração evaporativa variaram entre 0,66 (método das correlações turbulentas) e 0,68 (método da Razão de Bowen), revelando que a maior parte da energia disponível foi convertida em evapotranspiração atual.

Constatou-se, também, que a evapotranspiração média diária da cana-de-açúcar diferiu entre os dois métodos, apresentando valores de 3,6 mm d⁻¹ e 4,1 mm d⁻¹ para o método das correlações turbulentas e da razão de Bowen, respectivamente, resultando em um requerimento hídrico da ordem de 1185,6 e 1304,6mm, até o final da fase de máximo crescimento.

Constatou-se ainda, que os valores de coeficiente de cultivo obtidos para a cultura ao longo do ciclo de estudo, pelo método da razão de Bowen foram iguais a 0,75; 0,79; 0,75 e 0,52 para as fases I, II, III e IV, respectivamente, enquanto os obtidos pelo método das correlações turbulentas, foram de 0,54; 0,74 e 0,83, para as fases de I, II e III, respectivamente.

6. REFERÊNCIAL TEÓRICO

ALLEN, R. G.; KJAERGAARD, J.; GARCIA, M.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **Fine-tuning components of inverse-calibrated, thermal-based remote sensing models for evapotranspiration**. In: Proc. 17th Pecora Conference on the Future of L and Imaging, Denver, November 18-20, 11 pp. 2008.

ALLEN, R. G.; PEREIRA L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement Accuracy. **Agricultural Water Management, Amsterdam**, v. 98, p. 899-920, 2011.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M.. Crop evapotranspiration: guide-lines for computing cropwater requirements. In: United Nations FAO, **Irrigation and Drainage Paper 56**. FAO, Rome, Italy, 1998.

ALMEIDA, A. C. dos S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica em unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; RIBEIRO, V. Q.; DUARTE, J. A. L.; BRAGA, D. L.; NOLETO, D. H.. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana de açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.1, p.76-84, jan. 2012.

ANDRÉ, R. G. B.; MENDONÇA, J. C.; MARQUES, V.S.; PINHEIRO, F. M.A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana de açúcar. parte 1: balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, 375 - 382, 2010.

ANGUS, D. E.; WATTS, P. J. Evapotranspiration How good is the Bowen ratio method?. **Agricultural Water Management, Amsterdam**, v. 8, p. 133-150, 1984.

AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 58, p. 241-254, 2003.

BAILLIE, C. **Strategies for Maximizing Sugarcane Yield with Limited Water in the Bundaberg District**. 2004. Dissertation (Master's degree) 183 p. – University of Southern Queensland, Queensland.

BALDOCCHI, D. D. et al. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. **Bulletin of the American Meteorological Society**. 2001.

BALDOCCHI, D. D.; B. B. Hicks, and T. P. Meyers. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, **69**, 1331-1340, 1988.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal, FUNEP, 1988. 44 p.

BILESBACH, D. P. Estimating uncertainties in individual eddy covariance flux measurements: A comparison of methods and a proposed new method. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.151, p.394-405, 2011.

BONNETT, G. D.; HEWITT, M. L.; GLASSOP, D. Effects of high temperature on the

- BROTZGE, J. A.; CRAWFORD, K. C. Examination of the surface energy budget: a comparison of eddy correlation and bowen ratio measurement systems. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 4, p. 160-178. 2003.
- CABRAL, O. M. R., ROCHA, HUMBERTO R., GASH, J. H., LIGO, M. A. V., TATSCH, J. D., FREITAS, H. C., BRASILIO, E. Water use in a sugarcane plantation. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 4, p. 555-565, 2012.
- CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; LIGO, M. A. V.; BRUNINI, O.; DIAS, M. A. F. S. Fluxos turbulentos de calor sensível, vapor d'água e CO₂ sobre plantação de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*) em Sertãozinho-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 61-70, 2003.
- CAMARGO, A. P.; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- CAMPBELL, G. S., NORMAN, J. M. **An Introduction to Environmental Biophysics**, 2nd ed. 1998, XXI, 286 p. 79 illus.
- COSTA, C. T. S.; FERREIRA V. M.; ENDRES, L.; FERREIRA D. T. R. G.; GONÇALVES, E. R.; Crescimento e produtividade de quatro variedades de cana-de-açúcar no quarto ciclo de cultivo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 3, p. 56-63, jul.-set., 2011.
- DE BRUIN, H. A. R.; HARTOGENSIS, O. K.; ALLEN, R. G.; KRAMER, J. W. J. L. Note on the regional advection perturbations in an irrigated desert (R AP ID) experiment. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 80, p. 143-152. 2005.
- DING, R.; KANG, S.; LI F.; ZHANGA, Y.; TONGA L.; SUN, Q. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p. 87-95, 2010
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yields response to water**. Rome: FAO, 1979. 306 p. (FAO.Irrigation and Drainage Paper, 33).
- ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E.N.; OLIVEIRA, A.P.; SOARES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v.86, p.299-309, 2009.
- FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; DANTAS NETO, J. Y.; GHEYI, H. R. Eficiência no uso da água na cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de zinco no litoral paraibano. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 28, n. 3, p. 494-506, 2008.
- FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; GHEI, H. R.; índice de área foliar em cana-de-açúcar sob diferentes níveis de irrigação e zinco na paraíba. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.20, n.4, p.45-55, 2007.
- FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; TEODORO, I.; SANTOS, M.A.; PORFIRIO, A. C. S. Crescimento e fotossíntese de cana de açúcar em função de variáveis biométricas e meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.11, p.1229-1236, 2012
- FOKEN, T.; WIMMER, F.; MAUDER, M.; THOMAS, C.; LIEBETHAL, C. Some aspects of the energy balance closure problem. **Atmospheric Chemistry and Physics**. V.6, p. 4395-4402. 2006.

- GAVA, G. J. C.; TRIVELIN, P. C.; OLIVEIRA, M. W.; PENATTI, C. P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 11, p. 1347-1354, 2001.
- GAVILÁN, P.; BERENGENA, E. J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, New York, v. 25, p. 127-140, 2007.
- GILBERT, R. A.; SHINE JR., J. M.; MILLER, J. D.; RAINBOLT, C. R. The effect genotype, environmental and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 95, p. 156-170, 2006.
- GONÇALVES, F. M. **Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial**. 2010. 65 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- growth and composition of sugarcane internodes. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 57, p. 1087-1095, 2006.
- HE, H. et al. Uncertainty analysis of eddy flux measurements in typical ecosystems of ChinaFLUX. **Ecological Informatics**. Amsterdam, v. 5, p. 492-502. 2010.
- HEILMAN J. L.; BRITTIN, C. L.; NEALE, C. M. U. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 44, p. 261-273, 1989.
- IBGE. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/acervo/acervo2.asp?e=v&p=LA&z=t&o=26>. Acesso em 23/06/2013.
- IBRON, A.; DELLWIK, E.; FLYVBJERG, H.; JENSEN, N. O.; PILEGAARD, K. Strong low-pass filtering effects on water vapour flux measurements with closed-path eddy correlation systems. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v. 147, p. 140-156, 2007.
- INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 36, n. 1, p. 41-51, 1994.
- INMAN-BAMBER, N. G.; MCGLINCHEY, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 83, p. 125-138, 2003.
- INMAN-BAMBER, N. G.; MUCHOW, R. C.; ROBERTSON, M. J. Dry partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 76, p. 71-84, 2002.
- INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.
- KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. Modelling sugarcane production systems. I. development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 61, p. 253-271, 1999.
- KRISHNAN, P.; MEYERS, T. P.; SCOTT, R. L.; KENNEDY, L.; HEUER, M. Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semi-arid grasslands in North America. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v. 153, p. 31-44, 2012.

LACLAU, P.; LACLAU J. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, v.114, p.351–360. 2009.

LAGE, M.; BAMOUH, A.; KARROU, M.; EL MOURID, M. Estimation of rice evapotranspiration using a microlysimeter technique and comparison with FAO Penman-Monteith and pan evaporation methods under Moroccan conditions. **Agronomie**, Paris, v. 23, p. 625–631, 2006.

LEE, X; YU, Q; SUN, X; LIU, J; MIN, Q; LIU, Y; ZHANG, X. (2004) Micrometeorological fluxes under the influence of regional and local advection: a revisit. **Agricultural and Forrest Meteorology**, v.122 p.111–124, 2004.

LINKOSALO, T.; PIPATWATTANAKUL, D.; HARI, P. Systematic errors in measuring irradiance related to levelling of the sensor. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 79, p. 149–155, 1996.

MARIN, F. R. et al. Cana-de-Alçúcar. In : Monteiro, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. 530 p. il.

MARIN, F. **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. 2003. Tese (Doutorado) 134 f. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MASSMAN, W. J. LEE, X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v.113, p.121-144, 2002.

MOLDER, M.; GRELLÉ, A.; LINDROTH, A.; HALLDIN, S. Flux-profile relationships over a boreal forest – roughness sublayer corrections. **Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam**, v. 98-99, p. 645-658, 1999.

MOURA, M. S. B.; SOARES, J. M.; GURGEL, M. T.; SILVA, T. G. F. Balanço de energia na cana-de-açúcar irrigada no Submédio São Francisco. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 27, 2007, Mossoró. **Anais...** Mossoró: ABID, 2007. 1 CD-ROM.

OHMURA, A. Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. **Journal Applied Meteorology**, Boston, v. 21, p. 595–598, 1982.

OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R. Estimativas de evapotranspiração e as consequências devido aos erros na determinação de saldo de radiação e efeitos advectivos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB**, 2000. v. 4, n. 3, p. 343 – 347.

OLIVEIRA, R. A. de. **Análise de Crescimento da cana-de-açúcar, na região Noroeste do Paraná**. 2004. Tese (Mestrado) 80 f. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

OLIVEIRA, R. A. de; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O T.; BESPALHOK FILHO, J. C.; ZUFFELLATO RIBAS, K. C.; SILVA, D. K. T. da. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 2, p. 71-76, 2007.

ONCLEY, S. P. et al. The energy balance experiment EBEX-2000, Part I: overview and energy balance. **Boundary-Layer Meteorology**, v.123, p.1–28, 2007.

ORTEGA-FARIAS, S. O.; CUENCA, R. H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 81, p. 131–143, 1996.

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

PANOFSKY, H. A. Wind structure in strong winds below 150 m. **wind engineering**, v.1, p.91-103, 1977.

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

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba – RS, **Agropecuária**, 2002a, 478 p.

PEREIRA, A. R.; MACHADO, E. C. um simulador dinâmico do crescimento de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia, Campinas**, v. 45, p. 107-122, 1986.

PEREIRA, L. S.; OEWIS, T; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 57, p. 175-206, 2002b.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 97, p. 141-150, 1999.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; MARTINEZ-COB, A. A simple model for estimating the Bowen ratio from climatic factors for determining latent and sensible heat flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 25-23, 2008.

PILAU, G. P.; ANGELOCCI, L. R.; SCARPARI FILHO, J. A. Balanço de radiação de uma laranjeira em pomar e sua relação com radiação solar global e com saldo de radiação de gramado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, n. 3, p. 257-266, 2007.

RANA, G., KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 13, p. 125-153, 2000.

RAMANUJAM, T., VENKATARAMANA, S. Radiation interception and utilization at different growth stages of sugarcane and their influence on yield. **Indian Journal of Plant Physiology**, 4, 85–89, 1999.

RIGHI, E. Z. **Balanço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. 2004, 168 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

RIGHI, E. Z.; ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R. Energy balance of a young drip irrigated coffee crop in southeast Brazil: an analysis of errors and reliability of measurements by the Bowen ratio method. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 15, n. 3, p. 367-279, 2007.

ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; WOOD, A. W.; CAMPBELL, J. A. Accumulation of reducing sugars by sugarcane: effects of crop age, nitrogen supply and cultivar. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 49, p. 39-50, 1996.

- SCOTT, R. L. Using watershed water balance to evaluate the accuracy of eddy covariance evaporation measurements for three semiarid ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v. 150, p. 219-225, 2010.
- SHUTTLEWORTH, W.J. Putting the “vap” into evaporation. *Hydrology and Earth System Sciences* 11 (1), 210–244.2007.
- SILVA, C. T. S.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V.; DANTAS NETO, J.; CARVALHO, C. M.; GOMES FILHO, R. R. Crescimento da cana-de-açúcar com e sem irrigação complementar sob diferentes níveis de adubação de cobertura nitrogenada e potássica. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v.3, n.1, p.3–12, 2009a.
- SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 705-712, 2005.
- SILVA, T. G. F.; **Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco**. 2009. 176 f. Tese (doutorado). Universidade Federal de Viçosa.
- SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; JUNIOR, W. F. G. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v.15, n.12, p.1257–1265, 2011.
- SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; JUNIOR, W. F. G. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v.16, n.1, p.64–71, 2012.
- SILVA, W. F.; AGUIAR, D. A.; RUDHORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M.; AULICINO, T. L. I. N. **Análise da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil: safras 2005/2006 a 2008/2009**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 467-474.
- SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R.E.; SHINE JR., J.M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 88, p. 171-178, 2004.
- SINGELS, A., SMIT, M. A. The effect of row spacing on an irrigated plant crop of sugarcane cultivar NCo376. **Proceedings South African Sugar Technology Association**, Durban, v. 76, p. 94-105, 2002
- SINGELS, A.; SMIT, M. A.; REDSHAW, K. A.; DONALDSON, R. A. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 249–260, 2005.
- SINGH, P. N.; SHUKLA, S. K.; BHATNAGAR, V. K. Optimizing soil moisture regime to increase water use efficiency of sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid complex) in subtropical India. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 90, p. 95-100, 2007.
- SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**. Amsterdam. V. 92 p. 169–183, 2005.
- SOARES, J. M.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. Bowen ratio-energy balance associated errors in Vineyards under dripping irrigation. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 233-240, 2007.

- SOUZA, J. L.; ESCOBEDO, J. F. Balanço de radiação em cultivos de feijão-vagem com e sem cobertura de polietileno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32 n. 1, p. 1-15, 1997.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy conductance. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 169-184, 1998a.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. II. Variation in coupling with the atmosphere and the role of leaf area index. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 201-213, 1998b.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. III. Validity of Bowen ratio–energy balance technique for measuring water vapor and carbon dioxide fluxes at 5-min intervals. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 215-228, 1998c.
- STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer, 1988. 666 p.
- TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, N. D.; MOURA, M. S.,B.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 362, p. 110-127, 2008.
- TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; BASSOI, L. H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the Sao Francisco river basin, Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 94, p. 31–42, 2007.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; Five methods for interpret Field measurements of energy fluxes over a micro-sprinkler-irrigated mango orchard. **Irrigation Science**, v. 30, p 13-28, 2012.
- TEJERA, N. A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 102, p. 64–72, 2007.
- TERUEL, D. A.; BARBIERI, V.; FERRARO JÚNIOR., L A. Sugarcane leaf area índex modeling under different soil water conditions. **ScientiaAgrícola**, Piracicaba, v. 54, p.39-44, 1997. Número especial.
- TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, p. 335–348, 2000.
- TOLEDO FILHO, M. da R. **Estudo micrometeorológico de um cultivo de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) no estado de Alagoas**. 2001. 134f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- TWINE, T. E. et al. Correcting eddy - covariance flux underestimates over a grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**. V.103, p.279-300, 2000.
- UNLAND, H. E.; HOUSER, P. R.; SHUTTLEWORTH, W.; YANG, Z. L. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid sonoran desert site. **Agricultural Forest and Meteorology**.Amsterdan, v. 82, p. 119-153, 1996.
- VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L. Turbulent exchange coefficients for sensible heat and water vapor under advective conditions. **JournalAppliedMeteorology**, Boston, v. 17, p. 330–338, 1978.

VIANELLO, R.L., ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária, UFV, 1991. 449P.

VILLA NOVA, N.A. **Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz**. 1973, 89 f. Tese (Livre-Docência). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

VILLALOBOS, F. J. Correction of eddy covariance water vapor flux using additional measurements of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.88, p.77-83, 1997.

WATANABE, K. et al.; Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand. **Agricultural Water Management**, Amsterdam. v.67, p. 133–143, 2004.

WILSON, K. B. et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorology**.v.113, p.223-243, 2002.

ZHANG, B.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, L. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 1629-1640, 2008.

ZHOU, M. M.; SINGELS, A.; SAVAGE, M. J. Physiological parameters for modeling differences in canopy development between sugarcane cultivars. **Proceedings of the South African Sugar Technology Association**, Durban, v. 77, p. 610–621, 2003.