



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE-UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS-CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS-UACA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E DA CULTURA CANA-DE-
AÇÚCAR**

BRUCE KELLY DA NOBREGA SILVA

**CAMPINA GRANDE-PB
2010**

BRUCE KELLY DA NOBREGA SILVA

Análise de sensibilidade dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e da cultura cana-de-açúcar

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Meteorologia, da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento as exigências para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Área de Concentração: Agrometeorologia

Orientadores

Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva

Prof. Dr. Pedro Vieira de Azevedo

CAMPINA GRANDE-PB

2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586a

Silva, Bruce Kelly da Nobrega

Análise de sensibilidade dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e da cultura da cana-de-açúcar / Bruce Kelly da Nobrega Silva. — Campina Grande, 2010.

69 f. :

Dissertação (Mestrado em Meteorologia)- Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva; Prof. Dr. Pedro Vieira de Azevedo.

1. Razão de Bowen 2. Análise de sensibilidade 3. Método de Penman-Monteith 4. Análise de Erros I. Título.

CDU 551.57 (043)


BRUCE KELLY DA NOBREGA SILVA


ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E DA CULTURA DA CANA-DE-ACÚCAR

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 01/03/2010

BANCA EXAMINADORA


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


Prof. Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO DE SOUSA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


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

DEDICATÓRIA

A toda minha família. Em especial, a Mafalda Maria da Nóbrega (minha avó) e Maria do Socorro da Nóbrega Silva (minha mãe), Izabella Irla da Nóbrega Ferreira e Caio José da Nóbrega Ferreira (meus irmãos).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me trazer conforto perante às dificuldades e pela oportunidade de crescimento e aprendizado em todos os momentos.

A minha avó, Mafalda e minha mãe Maria do Socorro, pelo amor incondicional e incentivo que me deram durante toda a vida.

Aos meus irmãos Caio e Izabella, pelo carinho, compreensão e amizade que me dedicam.

Ao orientador Prof. Dr. Vicente, pela dedicação, paciência, e confiança, sem as quais seria impossível o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que fazem a Destilaria Miriri, na pessoa do Dr. Carlos Henrique de Azevedo.

Aos Membros da Banca Examinadora, pelas pertinentes críticas e sugestões apresentadas.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia pela atenção e ensinamentos ministrados.

À Coordenação da Pós-Graduação em Meteorologia, na pessoa do Prof. Dr. Ênio Pereira de Souza.

A secretaria do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Divanete Cruz Rocha Farias, pela atenção e assistência prestada durante o curso.

A Cícera Josefa pelo carinho, atenção e colaboração prestados para realização desta dissertação.

Aos colegas paraenses pelos momentos de alegria e descontração durante o curso.

Às minhas amigas Grace, Kelaine Candido e sua família, pelo apoio e amizade de sempre.

Aos meus amigos, principalmente a Priscilla, Madson, Argemiro e todos os alunos do Curso de graduação e Pós-graduação em Meteorologia, pelos momentos de alegria que tanto me ajudaram e por fazerem parte da história de minha vida. Obrigado por estarem sempre ao meu lado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela bolsa de estudos.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

A análise de sensibilidade avalia a contribuição de cada variável de entrada do modelo no cálculo de outra variável. Neste estudo, essa técnica foi aplicada com dados obtidos experimento de campo conduzido na Destilaria Miriri localizada no município de Capim, PB. As análises de erros e de sensibilidade foram aplicadas aos dados de evapotranspiração de referência (ET_o) obtidos pela equação de Penman-Monteith (FAO/56) e na equação do balanço de energia com base na razão de Bowen para a estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c). Os dados de temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa e insolação entre os dias 01 de setembro de 2008 a 30 de setembro de 2009 foram usados para se obter a ET_o. O balanço de energia foi aplicado para os dias 19 de março, 9 de maio, 30 de agosto e 01 de setembro de 2009 para se obter a evapotranspiração da cana-de-açúcar da área de estudo. A análise de sensibilidade e de erros foi aplicada ao método da razão de Bowen para os intervalos de medição de 15, 30, 60 e 120 minutos. Os dados de ET_o passaram pela análise de sensibilidade em escala diária durante o período de um ano. A variável mais sensível à equação de Penman-Monteith (FAO/56) foi o saldo de radiação, com coeficiente de sensibilidade variando de 0,19 a 0,97 e a que apresentou a menor sensibilidade foi a temperatura do ar, com valores variando entre -1,4 e -0,04. Os resultados evidenciam, ainda que o saldo de radiação é a variável mais sensível no cálculo do balanço de energia, enquanto o fluxo de calor no solo oferece a menor contribuição. Já os erros relativos de todas as variáveis envolvidas do cálculo balanço de energia baseado na razão de Bowen aumentam significativamente com aumento do intervalo de amostragem. A variável mais sensível na determinação da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith é o saldo de radiação, seguida da umidade relativa, velocidade do vento a 2m de altura e a temperatura média do ar.

Palavras-Chave: Razão de Bowen, análise de sensibilidade, método de Penman-Monteith, análise de erros.

ABSTRACT

The sensitivity analysis technique assesses the contribution of each input variable of the model on other variable. This technique was applied to data obtained from field experiment carried out in the Distillery Miriri, Capim, PB. Both errors and sensitivity analysis were applied to the data of reference evapotranspiration (ET_o) obtained by the Penman-Monteith (FAO/56) approach and to energy balance equation based on Bowen ratio for estimating of crop evapotranspiration (ET_c). Air temperature, wind speed, relative humidity and sunshine data from September 1, 2008 to September 30, 2009 were used to obtain ET_o. The energy balance equation was applied to the following days: March 19; May 9, August 30 and September 01 during the 2009 year to obtain the evaporatranspiration in sugar cane at the study area. The sensitivity and error analysis were applied to Bowen ratio method in measurement intervals of 15, 30, 60 and 120 minutes. Also, the sensitivity analysis was applied to the ET_o data on daily basis over a period of one year. The most sensitive variable to the Penman-Monteith (FAO/56) equation was the net radiation, with sensitivity coefficient ranging from 0.19 to 0.97 and the lowest sensitivity was in air temperature, with values ranging between -1.4 and -0.04. The result shows that net radiation is the most sensitive variable in the calculation of energy balance, while the soil heat flux provides the lowest contribution. The relative errors for all variables in energy balance equation increase significantly with increase in sampling interval. The most sensitive variable in reference evapotranspiration by Penmam-Monteith method is net radiation, followed by relative humidity, wind speed at 2m and air temperature.

Keywords: Bowen ration, sensitivity analysis, Penman-Monteith method, error analysis

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Partição do saldo de radiação (R_n) em fluxos de calor latente (LE), fluxos de calor no Solo (G), fluxos de calor no dossel vegetativo (S) e fluxo de calor sensível, valores expressos em percentagem. 48
- Tabela 2. Valores médios dos coeficientes de sensibilidade das variáveis envolvidas no cálculo do fluxo de calor sensível sobre a cultura da cana-de-açúcar. 55
- Tabela 3. Valores da média e desvio padrão do gradiente de temperatura do bulbo seco T_{seco} , fluxo de calor no solo (G), gradiente de temperatura do bulbo úmido $T_{úmido}$ e do saldo de radiação (R_n) para o dia 19 de março de 2009. 56

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Localização do município da Capim no Estado da Paraíba e as mesorregiões do estado. 28
- Figura 2. Distribuição do solo do município da Capim, PB 29
- Figura 3. Vista da estação micrometeorológica instalada na área experimental com a exposição dos instrumentos utilizados na pesquisa. 31
- Figura 4. Valores médios diários da umidade relativa do ar (A), velocidade do vento a 2 m (B), radiação solar global (C) e temperatura do ar (D) para o período de 1/9/2008 a 30/9/2009. 41
- Figura 5. Evapotranspiração de referência diária determinada pelo método Penman-Monteith para o período de 1/9/2008 a 30/00/2009. 43
- Figura 6. Variabilidade dos coeficientes de sensibilidade das variáveis envolvidas no cálculo da evapotranspiração de referencia pelo método de Penman-Monteith. CSr é o coeficiente de sensibilidade do saldo de radiação, CSe é da umidade do ar, CSu da velocidade do vento e CSt o coeficiente de sensibilidade da temperatura media do ar 44
- Figura 7. Curso diário dos componentes do balanço de energia sobre a cultura da cana-de-açúcar em 01 de setembro 2009. 45
- Figura 8. Curso diário dos componentes do balanço de energia para a cultura de cana-de-açúcar irrigada no dia 09 de maio de 2009. 46
- Figura 9. Curso diário dos componentes do balanço de energia para a cultura de cana-de-açúcar irrigada realizada no dia 19 de março de 2009. 46
- Figura 10. Curso diário dos componentes do balanço de energia para a cultura irrigada de cana-de-açúcar realizada no dia 30 de agosto de 2009. 47
- Figura 11. Curso temporal dos coeficientes de sensibilidade da evapotranspiração da cultura pelo método do balanço de energia baseado na razão de Bowen em intervalos de mediação de 15 minutos nos dia 19 de março (A), 9 de maio (B), 30 de agosto (C) e 1 de setembro (D) do ano de 2009. 49
- Figura 12. Curso temporal dos coeficientes de sensibilidade da evapotranspiração da cultura pelo método do balanço de energia baseado na razão de Bowen no intervalo de mediação de 30 minutos nos dia 19 de março (A), 09 de maio (B), 30 de agosto (C) e 1 de setembro (D) do ano de 2009. 51
- Figura 13. Curso temporal dos coeficientes de sensibilidade da evapotranspiração da cultura pelo método do balanço de energia baseado na razão de Bowen no intervalo de mediação de 60 minutos nos dia 19 de março (A), 09 de maio (B), 30 de agosto (C) e 1 de setembro (D) do ano de 2009. 53

- Figura 14. Curso temporal dos coeficientes de sensibilidade da evapotranspiração da cultura pelo método do balanço de energia baseado na razão de Bowen no intervalo de mediação de 120 minutos nos dias 19 de março (A), 9 de maio (B), 30 de agosto (C) e 1 de setembro (D) do ano de 2009. 54
- Figura 15. Distribuição dos erros absolutos para cada intervalo de medição da temperatura do bulbo seco para os dias 19 de março (A) e 1 de setembro de 2009 (B). 57
- Figura 16. Distribuição dos erros absolutos do fluxo de calor no solo para os dias 19 de março (A) e 1 de setembro de 2009 (B). 58
- Figura 17. Distribuição dos erros absolutos da temperatura do bulbo úmido para os dias 19 de março (A) e 01 de setembro de 2009 (B). 59
- Figura 18. Distribuição dos erros absolutos do saldo de radiação para os dias 19 de março (A) e 1 de setembro de 2009 (B). 60

SUMÁRIO

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. A cultura da cana-de-açúcar	16
2.2. Evapotranspiração de referência	20
2.3. Evapotranspiração da cultura	22
2.4. Análise de sensibilidade	26
3. MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1. Área experimental e clima	28
3.2. Vegetação e solos	29
3.3. A cultura estudada	30
3.4. Instrumentação e coleta de dados	30
3.5. Evapotranspiração de referência	32
3.5.1. Evapotranspiração da cultura com base no método da razão de Bowen	35
3.5.2. Análise de erros	38
3.6. Análise de sensibilidade	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1. Variáveis meteorológicas durante o período de estudo	40
4.2. Evapotranspiração de referência	42
4.2.1. Método de Penman-Monteith	42
4.2.2. Análise de sensibilidade	43
4.3. Evapotranspiração da cultura	44
4.3.1. Componentes do balanço de energia	44
4.3.2. Análise de sensibilidade	46
4.4. Análise de erro	56
5. CONCLUSÕES	62
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

O método do balanço de energia é comumente utilizado para se estimar a evapotranspiração de superfícies vegetadas e se baseia nas análises do balanço energético dos ganhos e perdas de energia térmica radiativa, condutiva e convectiva por uma superfície evaporante. O conhecimento dos seus componentes energéticos sobre superfícies cultivadas é de grande importância para a estimativa das perdas de água por evapotranspiração e caracterização do microclima local. A razão de Bowen tem sido intensamente utilizada por diversos pesquisadores, com a finalidade de resolver a equação do balanço de energia sobre culturas e, assim, determinar a evapotranspiração (Azevedo et al., 2003, Silva et al., 2007).

Na escolha de um método para a determinação da evapotranspiração, devem ser levadas em consideração a praticidade e a precisão. Os métodos micro-meteorológicos de estimativa da evapotranspiração, apesar de serem baseados em princípios físicos, podem comprometer a precisão desejada do manejo da irrigação. Atualmente, utilizam-se estações meteorológicas automatizadas que auxiliam na determinação da evapotranspiração de referência, diminuindo, assim, erros na lâmina de água a ser aplicada na cultura. Esse procedimento pode conduzir a erros apreciáveis no estabelecimento da lâmina de irrigação elevando os custos de produção.

A estimativa adequada da evapotranspiração da cultura (ET_c) consiste no principal parâmetro a ser considerado no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação, uma vez que ela totaliza a quantidade de água utilizada nos processos de evaporação e transpiração pela cultura durante determinado período (Silva et al., 2009). Em muitas aplicações práticas, a ET_c é obtida através do valor da evapotranspiração de referência (ET_o) corrigida pelo coeficiente da cultura (K_c), que é dependente do tipo de cultura e de seu

estágio de desenvolvimento. De acordo com Wei & Sado (1994) para utilizar os recursos hídricos mais afetivamente, a estimativa precisa da evapotranspiração é muito importante. Para Medina et al. (1998), a estimativa da evapotranspiração é essencialmente importante para o planejamento de irrigação, perdas de água de reservatório, previsões de escoamento superficial e em estudos de meteorologia e climatologia.

A análise de sensibilidade desses métodos de estimativa de evapotranspiração pode ser uma ferramenta importante para se obter estimativas confiáveis dos coeficientes de irrigação e evitar erros no manejo de água em culturas agrícolas. Essa técnica visa quantificar a importância relativa de cada variável de entrada do modelo na determinação da variável de saída (Liqiao et al., 2008). Hupet & Vancloster (2001) utilizaram-se dessa técnica para quantificar o efeito temporal das variáveis meteorológicas (temperatura, radiação solar e velocidade do vento) na estimativa da evapotranspiração diária de referência no período de seis meses. Eles observaram que a radiação solar e a velocidade do vento são as variáveis mais sensíveis no cálculo da ETo. A técnica de análise de sensibilidade procura determinar o efeito de uma determinada variável no cálculo de outra. Ela pode ser um instrumento bastante útil em diferentes áreas do conhecimento para determinar a importância de uma variável sobre o resultado final do modelo aplicado.

As variáveis climáticas são submetidas a diferentes tipos de erros. A primeira fonte de erro é devida às propriedades dos sensores, calibração e manuseio dos instrumentos (Beven, 1979; Meyer et al., 1989; Ritchie et al., 1996). A segunda fonte de erros é devida à estimativa de certa variável climática em função de outra (Thompson, 1976; Lindsey & Farnsworth, 1997). E, finalmente, a terceira fonte de erros é relacionada com a frequência temporal de coleta dos dados climáticos, que segundo Hupet & Vancloster (2001) essa fonte de erros é muito pouco citada na literatura. A técnica de análise de sensibilidade tem sido aplicada em várias áreas do conhecimento, principalmente em ciências ambientais onde modelos computacionais são utilizados.

Rana & Katerji (1998) analisaram a sensibilidade da equação de Penman-Monteith aos fatores climáticos (energia disponível e déficit de pressão de vapor) e da cultura (resistência estomática e aerodinâmica) em um clima semi-árido no sul da Itália. Os resultados desse estudo esclareceram que a energia disponível e a resistência aerodinâmica são as maiores fontes de erros na estimativa da evapotranspiração de referência na região estudada. Hupet & Vancloster (2001) analisaram a sensibilidade da equação de Penman-Monteith aos dados climáticos e calcularam os efeitos da variação da frequência temporal

das variáveis sobre a estimativa da evapotranspiração de referência diária. Os autores evidenciaram que a radiação solar e a velocidade do vento são as variáveis atmosféricas que mais influenciam o cálculo da evapotranspiração na região de estudo.

Por outro lado, Xu et al. (2006) utilizaram a mesma técnica para analisar os impactos das variáveis meteorológicas no cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith na bacia hidrográfica de Changjian. O estudo mostra que a variável mais sensível, na equação de Penman-Monteith na área de estudo foi a umidade do ar seguida pela radiação de ondas curtas e temperatura do ar. Já a velocidade do vento apresentou os menores valores de coeficiente de sensibilidade que foram explicados pela sua grande variabilidade espacial na região durante o período de estudo. Ainda, sob o argumento de que a análise de sensibilidade é uma ferramenta importante para o entendimento das variações das variáveis no cálculo da evapotranspiração de referência, Gong et al. (2006) realizaram um estudo com a equação de Penman-Monteith utilizando dados de 150 estações meteorológicas no período de 1960 a 2000. Esse estudo esclareceu que, em geral, a umidade relativa do ar é a principal fonte de erros para o modelo, seguida pela radiação de ondas curtas, temperatura do ar e velocidade do vento.

Todos os estudos acima mencionados se referem ao modelo de Penman-Monteith. Entretanto, a análise de sensibilidade de modelos de estimativa de evapotranspiração de culturas se reveste de grande importância na área agrônoma, em especial no manejo da irrigação. Apesar da importância do estudo, a análise de sensibilidade aplicada à equação do balanço de energia é ainda incipiente. Nesse sentido, este trabalho tem os seguintes objetivos:

Geral: Efetuar as análises de erros e de sensibilidades dos métodos comumente utilizados na estimativa da evapotranspiração da cultura e da evapotranspiração referência.

Específicos: (i) Determinar os componentes do balanço de energia da cultura da cana-de-açúcar; (ii) calcular a evapotranspiração de referência para a região Capim, PB, durante o ano de 2009; (iii) elaborar a análise de erros e de sensibilidade na estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith; (iv) determinar os erros relativos, erros absolutos e efetuar uma análise de sensibilidade das variáveis atmosféricas utilizados no método do balanço de energia baseado na razão de Bowen.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A cultura da cana-de-açúcar

A segurança energética é um dos principais desafios deste século. O aumento da população mundial e do consumo per capita, associados ao problema de mudança do clima, ensejam a necessidade de ações mais coordenadas e sustentáveis, em seus aspectos ambientais, sociais e econômicos. Nesse sentido, o Brasil tem muito a contribuir, pois possui uma matriz energética com 46% de fontes renováveis, num mundo que só utiliza 15% (Brasil, 2009). Tal fato põe o país em posição de destaque no cenário global, principalmente por sua forte estratégia em agroenergia, que representa mais da metade dessa fonte renovável. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar no mundo, seguido de Índia, China, Tailândia e México. Atualmente, a cana-de-açúcar e seus derivados são a segunda principal fonte de energia primária da matriz energética nacional e o consumo de Etanol já é superior ao da gasolina. Essa experiência tem conquistado o mercado internacional e o país se torna referência nessa área (Brasil, 2009).

A cana-de-açúcar tem origem asiática e foi trazida para o Brasil pelos portugueses na primeira década do século XVI. Adaptou-se facilmente em regiões de clima tropical, pois necessita de chuvas e boa quantidade de luz solar, desenvolvendo-se com sucesso no litoral nordestino brasileiro. Entretanto a má distribuição e redução dos volumes de chuvas tem sido uma constante na região nos últimos anos, trazendo prejuízos à cultura, forçando uma renovação precoce do canavial e investimentos em novas tecnologias que propiciem o aumento do rendimento. Outra forma de aumentar a produtividade foi a migração para áreas da região sudeste, especificamente no interior de São Paulo, onde o período chuvoso é bem

determinado e as exigências climáticas e hídricas da cultura é atingida. Como ela é uma planta tropical, durante a fase de crescimento da planta a exigência hídrica varia de 1500 a 2500 mm de água, e o melhor crescimento é atingido com média diária de temperatura entre 22 °C a 30 °C (Doorenbos & Kassan, 1979). O pH ótimo varia em torno de 6,5; entretanto, a cana-de-açúcar pode se desenvolver com um pH entre 5 e 8,5; e ela apresenta alta demanda por nitrogênio, potássio e uma quantidade inferior de fósforo.

A cana-de-açúcar é uma planta que pertence ao gênero *Saccharum* L., da família Poaceae, cujas principais características são a forma da inflorescência (espiga), o crescimento do caule em colmos e as folhas com lâminas de sílica em suas bordas e bainha aberta. A grande importância da cana-de-açúcar no Brasil é devida às contribuições econômicas, socioambientais que desempenha no país. Ela se caracteriza como a segunda cultura mais importante para o agronegócio brasileiro, devido ao grande e consolidado mercado interno. Somam-se a isso, as novas forças de expansão da produção representadas pelos motores bi-combustíveis e pelo mercado internacional, hoje caracterizado pela ascensão dos preços do petróleo, pelos compromissos de redução das emissões de CO₂ assumidos pelos países desenvolvidos junto ao Protocolo de Quioto. Outro fato bastante significativo é que os Estados Unidos, o maior produtor do álcool de milho do mundo, não têm condições de atender à sua demanda interna por álcool e tampouco à demanda externa. Isso torna o Brasil como principal exportador de álcool à base de cana-de-açúcar.

A sua floração, em geral, começa no outono e a colheita se dá na estação seca, durante um período de 3 a 6 meses (Segato et al., 2006). A precipitação pluvial média anual superior a 1.000 mm, sendo bem distribuída, é suficiente para a obtenção de altas produções de cana-de-açúcar. O manejo hídrico dessa cultura deve ser realizado com eficiência, ou seja, com suprimentos hídricos adequados durante o desenvolvimento vegetativo, principalmente nas fases de germinação, perfilhamento e alongamento dos colmos, e alguma restrição no período de maturação, para forçar o repouso fisiológico e o enriquecimento em sacarose (Inman-Bamber et al., 2002). Alguns estudos têm evidenciado que a produtividade da cana-de-açúcar é aumentada substancialmente com a irrigação, principalmente quando os solos são bem drenados (Carter et al., 1988; Hurst et al., 2004). Entretanto, o manejo inadequado da irrigação pode causar problemas ambientais, como o aumento do grau de acidez dos solos e perdas de nutrientes via lixiviação (White et al., 1993).

A produção de cana-de-açúcar no Brasil em 2006 cresceu 8,1%, em relação ao ano de 2007, alcançando 457.245 516 ton (IBGE, 2007). Além disso, a crescente demanda por

álcool no mercado interno e externo influenciou no preço do produto, levando a um crescimento de R\$ 3,8 bilhões (29%) no valor da produção, que atingiu quase R\$ 17 bilhões em 2006. Ainda, segundo o IBGE (2007), a área também vem crescendo nos últimos anos, ultrapassando os 6,0 milhões de hectares em 2006. A safra 2008/2009 atingiu na região centro-sul quase 505.000.000 toneladas e a região norte-nordeste atingiram aproximadamente 64.000.000 de toneladas. Já as vendas de carros bi-combustíveis (denominados Flex-Fuel) aumentaram de 48.172, no ano de 2003, para 2.329.247, em 2008. O Estado da Paraíba produziu mais de 390 mil litros de etanol na safra de 2000/2001. Entretanto, a produção de açúcar foi de 74.321 toneladas na safra de 2001/2001 e na safra 2008/2009 a produção foi de 133.8 toneladas, uma aumento de mais de 55% na produção (UNICA, 2009).

Vários estudos e tecnologias foram empregados na produção da cana-de-açúcar analisando os impactos ambientais gerados por essa atividade econômica. Por exemplo, Neto et al. (2006) realizaram uma pesquisa na destilaria Miriri, o município de Capim, PB, com o objetivo de analisar o comportamento da cultura da cana-de-açúcar, primeira soca (segunda folha), diante de diferentes lâminas de irrigação e níveis de adubação de cobertura sobre os parâmetros de crescimento, qualidade e rendimento da cultura. As irrigações influenciaram na fase inicial de crescimento e no início do máximo desenvolvimento da primeira soca. A dose de adubação influenciou mais nos parâmetros analisados que a lâmina de irrigação. Por outro lado Farias (2006), também realizou estudos com a variedade SP 791011 que foi submetida a dois fatores: lâminas de água de irrigação e níveis de adubação com zinco, de tal maneira determinar as funções de resposta, em termos de crescimento e desenvolvimento fisiológico, bem como em termos econômicos, definindo-se, para tanto, os níveis de dois fatores que proporcionam os melhores resultados econômicos.

Já Coelho et al. (2008) procuraram contabilizar a quantidade de carbono dissolvido durante um período de 3 anos em Ribeirão Preto e Araraquara. Essas duas cidades se destacam pela grande quantidade de CO com a queima da cana-de-açúcar antes da colheita. O estudo mostrou que a massa de ar que passar por essas regiões provoca um acréscimo no nível de carbono da água e que tem uma correlação de 0,83 com a biomassa queimada.

A fenologia estuda as transformações que estão relacionadas ao ciclo da cultura, ou seja, representa o estudo de como a planta se desenvolve ao longo de suas diferentes fases. De posse de todas as informações disponíveis sobre o ciclo da planta, é possível identificar as relações e a influência dos fatores envolvidos no processo de produção, favorecendo a

previsão de problemas, o manejo e a tomada de decisão. Os estágios fenológicos da cana-de-açúcar são os seguintes: brotação e emergência; perfilhamento; crescimento dos colmos e a maturação dos colmos (Embrapa, 2009). O broto rompe as folhas da gema e se desenvolve em direção à superfície do solo e a emergência do broto ocorre de 20 a 30 dias após o plantio. O broto é um caule em miniatura que surge acima da superfície do solo (chamado de colmo primário). Essa fase depende da qualidade da muda, ambiente, época e manejo do plantio. Neste estágio ocorre, ainda, o enraizamento inicial (duas a três semanas após a emergência) e o aparecimento das primeiras folhas (Embrapa, 2009).

De acordo com Farias (2006), o perfilhamento da cana é o processo de emissão de colmos por uma mesma planta, chamados de perfilhos. O processo de perfilhamento é regulado por hormônios e resulta no crescimento de brotos, que aparecem de 20 a 30 dias após a emergência do colmo primário (Embrapa 2009). A partir do auge do perfilhamento, os colmos sobreviventes continuam o crescimento e desenvolvimento, ganhando altura e iniciando o acúmulo de açúcar na base, sendo o crescimento estimulado pela luz solar, umidade do ar e calor. Durante essa fase, as folhas mais velhas ficam amareladas e secas, enquanto o crescimento do sistema radicular torna-se mais intenso, tanto nas laterais quanto em profundidade. A maior parte das raízes está nos primeiros 40 centímetros de profundidade, sendo essa a principal zona no que concerne à absorção de água e nutrientes por parte da cultura (Embrapa, 2009).

A maturação inicia-se junto com o crescimento intenso dos colmos sobreviventes do perfilhamento das touceiras. Quando essas touceiras atingem uma altura igual ou superior a dois metros, nota-se o amarelecimento e a conseqüente seca das folhas que se encontram na altura mediana da planta, indicando que já está sendo depositado açúcar nessa região. Por outro lado, com a presença de chuvas e temperaturas mais baixas, existem maior atividade de maturação e menor atividade de crescimento, sendo que há intenso armazenamento de açúcar. (Embrapa, 2009). O momento de colheita é definido em função da variedade, época de plantio e conseqüente duração do ciclo manejo da maturação e condições climáticas no ambiente. Quanto ao tipo, pode-se encontrar a cana de ano e meio, cana de ano, cana de soca e cana de inverno. Em geral o ciclo da cana varia de 14 a 22 meses para a cana de ano e soca e de a 16 meses para a cana de inverno (Embrapa, 2009).

2.2. *Evapotranspiração de referência*

Dentre as várias definições da evapotranspiração de referência (ET_o) existentes na literatura, Doorenbos & Pruitt (1977) afirmam que essa variável tão importante no ciclo hidrológico consiste na perda de água de uma extensa superfície vegetada, rasteira (normalmente grama), em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo, com altura entre 8 e 15 cm (IAF~ 3), sem restrição hídrica e com ampla área de bordadura para evitar a advecção de calor sensível (H) de áreas adjacentes, nessa superfície são feitas as medições meteorológicas para obtenção de um conjunto consistente de dados de coeficientes de cultura, para serem utilizados na determinação da evapotranspiração (ET) de outras culturas agrícolas, esse processo físico de mudança de estado da água pode ser influenciado por alguns fatores climáticos e controlado pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica por vapor de água e pelo suprimento de água do solo às plantas. A espécie cultivada e seu estágio de desenvolvimento são fatores da própria planta que também podem influenciar na evapotranspiração (Allen et al., 1998.)

De acordo com Oliveira et al. (2001) a estimativa adequada da evapotranspiração da cultura (ET_c) consiste no principal índice a ser considerado no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação, uma vez que ela totaliza a quantidade de água utilizada nos processos de evaporação e transpiração pela cultura durante determinado período. Em muitas aplicações práticas, a (ET_c) é obtida através do valor da evapotranspiração potencial de uma cultura de referência (ET_o) corrigida pelo coeficiente da cultura (K_c); sendo, esse, dependente do tipo de cultura e seu estágio de desenvolvimento. Existe varias maneiras de se determinar essa variável, que pode ser dividido em medidas diretas ou indiretas. Para a de determinação direta da evapotranspiração estão os lisímetros ou evapotranspirômetros (de pesagem, drenagem, lençol freático constante), balanço hídrico e controle de umidade no solo. No segundo grupo, que correspondente à determinação indireta, a evapotranspiração é estimada por fórmulas empíricas, baseadas em dados meteorológicos. A escolha do método depende de sua área de aplicação e das necessidades de precisão e duração dos períodos de cálculo (Allen et al., 1998).

No manual 24 da FAO (1977) há quatro metodologias de cálculo da ET_o. A primeira é o Método de Blaney – Criddle, baseado apenas na temperatura do ar e no percentual médio diário anual de horas de brilho solar. Esse método é inadequado para regiões equatoriais e lugares de elevada altitude. O segundo método é o da radiação, que necessita dos dados

meteorológicos de insolação ou nebulosidade ou radiação e temperatura do ar. Por utilizar essas variáveis, tal método é mais confiável do que o anterior, inclusive nas regiões restritas ao outro método. Em regiões onde há a disponibilidade de dados de temperatura, umidade, vento, insolação ou radiação, o método de Penman modificado é sugerido. Por fim, o método do tanque classe A (ETA), que é baseado na proporcionalidade existente entre a evaporação de água do tanque (ECA) e a evapotranspiração de referência (ET_o), visto que ambas dependem exclusivamente das condições meteorológicas. A conversão de ECA em ET_o depende de um coeficiente de proporcionalidade, denominado coeficiente do tanque (K_p). Esse parâmetro pode ser tabelado ou calculado, sendo dependente de alguns fatores como tamanho da bordadura, umidade relativa e velocidade do vento. Todos esses métodos são estritamente climatológicos, representando o potencial atmosférico para o processo de evapotranspiração e, por conseqüência, de pouca precisão.

A comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), consideram o método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) como padrão de estimativas da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos, sendo também utilizado para avaliar outros métodos de estimativa (Smith, 1991). A evapotranspiração tem aplicações em diversas atividades científicas. Em aplicações agrícolas, o conhecimento da evapotranspiração é ainda mais necessário, pois como ela representa a quantidade total de água perdida pelo sistema, deve ser determinada com maior cuidado possível a fim de se obter sempre o sistema de cultivo em condições de máximo rendimento (Ometto, 1981). Desta forma, o conhecimento da evapotranspiração ou fluxo convectivo de calor latente contribuirá para uma utilização mais racional da água em uma determinada cultura em que as fases críticas de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo são limitadas pelo fator hídrico (Cunha et al., 2002). Silva et al. (2008) avaliaram a ET_o pelos métodos de Hargreaves, Jensen-Haise, Priestley & Taylor, Linacre e pelo tanque classe em estudo realizado para os perímetros irrigados do Estado de Sergipe. Eles concluíram que a utilização do coeficiente do tanque “Classe A” convencional (0,75) pode produzir erros apreciáveis no manejo da irrigação nesses perímetros irrigados, podendo ultrapassar o valor acumulado no ano a mais de 500 mm. Entretanto, a evapotranspiração de referência estimada pelos métodos do tanque “Classe A”, Hargreaves, Priestley & Taylor, Jensen-Haise e do Linacre, nessa ordem, perdem o nível de precisão quando comparados com o método padrão de Penman-Monteith.

Mendonça et al. (2003) desenvolveram um estudo na estação evapotranspirométrica da UENF, instalada na área da Estação Experimental da PESAGRO-Rio, em Campos dos Goytacazes, RJ. Esse estudo teve como objetivo propor coeficientes de ajuste regional entre o método lisimétrico e os métodos de Penman-Monteith-FAO, Makkink, Linacre, Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Radiação Solar, Tanque Classe “A” e Atmômetro SEEI modificado para os períodos de 1, 3, 7 e 10 dias. Eles obtiveram resultados que indicam, com exceção do Atmômetro, que todos os métodos avaliados atendem satisfatoriamente à estimativa da ETo na região Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro, apresentando bons ajustamentos para períodos maiores do que sete dias.

Radin et al. (2000) compararam a evapotranspiração estimada através do modelo de Penman-Monteith com medidas em lisímetro de pesagem, ao longo do ciclo da cultura do milho e em diferentes condições atmosféricas. Os resultados mostraram que a evapotranspiração do milho é baixa no início do ciclo, aumentando com o desenvolvimento da cultura, no início do ciclo quando grande parte do solo está descoberta. E, ainda, que a evapotranspiração estimada pelo modelo é inferior àquela medida. Porém, à medida que o índice de área foliar aumenta e cobre o solo, as diferenças entre os valores estimados e medidos se tornam menores, sendo eles semelhantes a partir do pendoamento, mesmo para diferentes condições atmosféricas. Syperreck et al. (2008) compararam a eficiência dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em relação ao método de FAO Penman-Monteith. Os dados meteorológicos utilizados foram coletados na estação meteorológica da rede do Iapar, instalada em Palotina, Estado do Paraná. Nesse estudo, a evapotranspiração de referência foi estimada pelos métodos de Thornthwaite, Camargo e Hargreaves-Samani, sendo seu desempenho comparado ao método de FAO Penman-Monteith. As médias diárias da evapotranspiração de referência variaram entre 2,58 e 3,62 mm d⁻¹. Os resultados indicaram que, para a escala diária, os métodos avaliados apresentaram bom ajuste, quando comparados ao método de FAO Penman-Monteith, com coeficientes de correlação variando entre 0,85 e 0,86. O coeficiente de exatidão ou de concordância apresentou valores que variaram entre 0,82 e 0,85.

2.3. Evapotranspiração da cultura

A determinação das necessidades hídricas de culturas, em seus diferentes estádios de desenvolvimento, é uma etapa importante para o manejo de irrigação. Nos últimos anos,

muitas pesquisas têm sido realizadas, visando determinar o consumo hídrico de culturas por meio do coeficiente de cultivo, em seus diferentes estádios de desenvolvimento (Silva et al., 2001; Silva et al., 2007; Silva et al. 2009; Azevedo et al., 2003; Azevedo et al., 2007; Farias et al. 2006). O método do balanço de energia se baseia nas análises do balanço energético dos ganhos e perdas de energia térmica radiativa, condutiva e convectiva por uma superfície evaporante. Esse método tem sido bastante utilizado por diversos pesquisadores, por se tratar de uma técnica prática de estimativa da evapotranspiração, quando se dispõe da instrumentação necessária às medições locais e em alta frequência do saldo de radiação e dos gradientes verticais de temperatura e pressão de vapor do ar (Trambouze et al., 1998; Azevedo et al., 2003; Silva et al., 2007; Borges et al., 2006). A evapotranspiração estimada pelo balanço de energia apresenta valores bastante satisfatórios desde que se tenham os devidos cuidados na instalação do equipamento para evitar a circulação de calor entre a área de estudo com a superfície seca adjacente (Kang et al., 2008).

O conhecimento do consumo hídrico das culturas, obtido com base na estimativa da evapotranspiração, constitui-se numa informação preciosa no manejo da água em qualquer região do planeta, principalmente neste momento em que ocorre forte conscientização popular do uso racional dos recursos hídricos. Na literatura especializada são encontradas diversas metodologias que propiciam a estimativa do consumo hídrico de culturas (Azevedo et al., 2003; Azevedo et al., 2007, Silva et al., 2007). As perdas de água pelas culturas são obtidas através da estimativa da evapotranspiração, por diversos métodos micrometeorológicos, ou medida diretamente através de evapotranspirômetros. Os métodos mais comuns que objetivam fazer essas estimativas são o método do balanço hídrico no solo, método das correlações turbulentas e o método do balanço de energia baseado na razão de Bowen. O método do balanço de energia, para a determinação indireta do transporte vertical turbulento de vapor d'água para a atmosfera, por evaporação ou transpiração, fundamenta-se, no princípio da conservação da energia aplicado aos diferentes fluxos energéticos que acontecem na superfície-fonte. Existem quatro tipos de fluxo de energia em uma superfície, conhecidos como o saldo de radiação (R_n), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor no solo (G) e de calor sensível (H). Há também as energias armazenadas na copa das plantas (S) e nos processos fotossintéticos (P), que são consideradas ter baixa representatividade quando comparadas com os demais fluxos de energia.

Uma forma de estudar a partição de energia disponível foi proposta por Bowen (1926), no qual é a razão entre os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE), que ficou

conhecido como razão de Bowen (β). O valor de β depende basicamente das condições hídricas da superfície evaporante. Por se tratar de um método prático de estimativa da evapotranspiração, a razão de Bowen tem sido utilizada por diversos pesquisadores (Trambouze et al., 1998; Azevedo et al., 2003; Silva et al., 2006), devido à facilidade e aos resultados satisfatórios obtidos na estimativa dos fluxos de energia. Sua eficiência é maior em culturas de pequeno porte como milho (Cunha et al., 1996, Mastrorilli et al., 1998;) e alfafa (Todd et al., 2000). Em culturas de grande porte, como no caso das fruteiras, o BERB tem sido pouco utilizado devido às algumas restrições, principalmente no que se refere à bordadura (fetch) adequada. Mesmo assim, alguns autores têm usado esse método em culturas de médio e grande porte com sucesso (Silva, 2000; Azevedo et al. 2003, Silva et al., 2009).

Embora o método da razão de Bowen seja mais prático, quando comparado com outros métodos de estimativa, algumas considerações devem ser feitas haja vista que a natureza turbulenta no processo da evapotranspiração não é computada (Steduto & Hsiao, 1998). Assim, para a determinação o fluxo de calor latente pelo método balanço de energia com base na razão de Bowen deve-se considerar o seguinte (Heilman & Brittin, 1989; Nie et al., 1992): i) igualdade entre os coeficientes de transferência turbulenta de calor sensível (K_h) e latente (K_w), ou seja, a razão entre esses coeficientes deve ser igual a unidade, o que é válido apenas para condições de estabilidade atmosférica próximo à neutralidade; ii) as medidas de temperatura do ar e pressão de vapor d'água devem ser efetuadas dentro da camada limite superficial (vegetação-atmosfera), com ausência de gradientes horizontais, implicando na necessidade de um “fetch” ou bordadura, com extensão mínima de 100 vezes a altura da cultura. Os pesquisadores perceberam que esse método funciona bem em condições úmidas, o que não ocorre em condições secas (β alto e positivo) e na presença de advecção de energia (β negativo) (Angus & Watts, 1984). Para Todd et al. (2000), as vantagens do método do BERB incluem o uso de medidas simples e contínuas; não necessita de informações sobre as características aerodinâmicas da superfície analisada; possibilita a integração do fluxo de calor latente sobre extensas áreas e fornece medidas em pequena escala de tempo (segundos e minutos). As desvantagens englobam a influência da sensibilidade dos instrumentos na determinação dos componentes do balanço de energia e a necessidade de um “fetch” adequado. Mesmo com essas restrições ao método do BERB em relação a climas quentes, muitos pesquisadores têm usado essa metodologia para a determinação da evapotranspiração de culturas em ambientes semi-áridos, obtendo,

inclusive, resultados satisfatórios (Todd et al., 2000; Silva, 2000; Azevedo et al.; 2003; Silva et al., 2007).

A razão de Bowen depende dos gradientes de temperatura (ΔT) e de pressão de vapor (Δe). Em climas áridos, ΔT apresenta-se muito alto e Δe relativamente baixo. Portanto, para se obter estimativas confiáveis da razão de Bowen é necessário que os instrumentos estejam bem calibrados. Quando são usados psicrômetros para obter as medições de temperaturas de bulbos seco e úmido eles devem ser devidamente calibrados, mantidos limpos com ventilação adequada. Essas condições garantem de que haja ascensão contínua de água ao bulbo úmido (Angus & Watts, 1984).

Segundo Borges (2006) o fluxo de calor armazenado no dossel (S) da mangueira é irrelevante no cálculo do balanço de energia quando comparado com aos demais componentes do balanço de energia. Por outro lado, o fluxo de calor no solo (G) tem que ser bem representando, pois ele varia mais na superfície do solo do que o saldo de radiação. De acordo com Kustas et al. (2000), a partição do saldo de radiação em G está relacionada à cobertura vegetal e a posição dos fluxímetros no solo. Se o solo estiver totalmente coberto, a porcentagem de G gira em torno de 5 a 10% do saldo de radiação (R_n); caso o solo esteja coberto parcialmente esse valor aumenta bastante, podendo variar de 20 a 40% de R_n .

Silva (2000), utilizando o balanço de energia num pomar de mangueira na região de Petrolina, PE, concluiu que o fluxo de calor sensível representou uma fração muito pequena do saldo de radiação (5%) e que a maior parte de R_n foi consumida na forma de LE (80%). Nessa mesma linha de pesquisa, Azevedo et al. (2003) aplicaram o método do balanço de energia com base na razão de Bowen e o método do balanço hídrico no solo em pomar de mangueiras irrigadas no Submedio rio São Francisco, para determinar a necessidade hídrica nas diversas fases fenológicas dessa fruteira. Eles encontraram que a evapotranspiração média do pomar foi de 4,4 mm/dia; comparando os dois métodos concluíram que o método do balanço hídrico no solo é mais eficiente na medida da evapotranspiração do que o método do balanço de energia.

Sakuratani et al. (2004) avaliaram a sazonalidade da evapotranspiração, conteúdo de água no solo e os coeficientes de cultura para a cana-de-açúcar, mandioca e milho utilizando o BERB no Nordeste da Tailândia. Eles concluíram que na estação chuvosa a ET_c varia entre 2 e 6 mm dia⁻¹ e na estação seca é de 1 mm dia⁻¹; K_c não superestimou os valores recomendados pela FAO para clima sub úmido; e, ainda, que a perda de água no solo na

estação seca nas culturas de cana e mandioca é bastante lenta, ou seja, é possível ter o mínimo ou nenhuma irrigação nessas culturas.

2.4. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade procura determinar o efeito de uma determinada variável no cômputo de outra variável. Em modelos hidrológicos a análise de sensibilidade é bastante utilizada para verificar a eficiência do modelo e qual variável mais influencia no resultado final do modelo. Kannan et al. (2006) utilizaram a técnica de análise de sensibilidade para determinar uma melhor combinação entre a evapotranspiração e escoamento superficial (vazão), avaliando os parâmetros mais sensíveis, principalmente comparados a ETo determinada pelo método de Hargreaves e Penman-Montheit. A mudança no cômputo da evaporação do solo é um fator que afeta todos os componentes do balanço hídrico, comprometendo a previsão da vazão. Assim, a melhor combinação das variáveis é um dos passos fundamentais para utilizar o modelo com mais precisão.

Hall et al. (2006) utilizaram o modelo (PHART) para determinar a temperatura e a transferência de energia em aquícultura nas lagoas em Louisiana, USA. Com base em análise de sensibilidade de vários parâmetros ambientais, eles identificaram os fatores que tiveram maior efeito sobre a temperatura do tanque. As variáveis ambientais escolhidas para análise foram a temperatura do ar, a radiação solar, a velocidade do vento e a vazão da água para controlar a temperatura do tanque. A sensibilidade do modelo para a temperatura do ar variou de 0,10 a 0,35 °C/°C, para a radiação solar variou de 0,04 a 0,14 °C/W, para a velocidade do vento variou de -0,003 a -1,64 °C/ms⁻¹, para o fluxo de água quente varia de 158,074 a 620,845 °C/m³/s/m³. Já para o fluxo de água fria, a sensibilidade variou de 46,375 a 844,873 °C/m³/s/m³. Outro estudo relacionado a aquífero foi realizado por Yeh & Huang (2006) para avaliar a distância do bombeamento até o poço e também para determinar qual a melhor hora para o bombeamento. Eles concluíram como base em análise de sensibilidade, que a esses parâmetros não influenciam significativamente o modelo.

Oyarzun et al. (2006) mostraram a importância da análise de sensibilidade num contexto ambiental, em pesquisa de estudo do desempenho do solo no transporte de nitrato para águas subterrâneas. Essa análise destacou a importância dos níveis iniciais de nitrato, porosidade do solo e as quantidades de nitrato na água tanto na lixiviação quanto no

escoamento de águas subterrâneas. Eles concluíram, ainda, que a taxa de desnitrificação e a aplicação de fertilizantes devem ter maior importância nas futuras utilizações do modelo.

Liebenthal et al. (2005) aplicaram a análise de sensibilidade para dois modelos de cálculos do fluxo de calor no solo. As variáveis analisadas foram a temperatura no solo, umidade volumétrica do solo, condutividade de calor no solo e o fluxo de calor nas placas. O estudo revelou que os dois modelos são mais sensíveis aos erros de em medições de temperatura e que os sensores instalados em profundidades mais rasas influenciam na qualidade nas medições do que em maiores profundidades. E, ainda, que a sensibilidade em ambos os métodos diminui com a profundidade de referência.

Muleta & Nicklow (2004) usaram a técnica de análise de sensibilidade no modelo hidrológico SWAT na parte sul da bacia de Illinois, para avaliar os parâmetros que contribuíram mais para a variabilidade da vazão e depósitos de sedimentos. Esse trabalho resultou numa melhora significativa sobre os modelos de calibração propostos anteriormente em outras pesquisas sobre a estimação da vazão e concentração de sedimentos usando o modelo SWAT.

Chen & Chen (2003) aplicaram o método de regressão não linear para calcular parâmetros hidráulicos de um aquífero usando o teste do bombeamento. Os parâmetros analisados foram a condutividade hidráulica horizontal (K_x), anisotropia aquífera (K_a), taxa de armazenamento do aquífero (S_s) e rendimento do aquífero (S_y). Os autores concluíram que a duração do bombeamento afeta tanto na magnitude dos coeficientes de sensibilidade; afetando, assim, as correlações e confiabilidade das estimativas do modelo. Foi observado, ainda, que um bombeamento com uma duração longa, geralmente, aumenta a magnitude dos coeficientes de sensibilidade. Esses resultados foram úteis para serem tomadas algumas medidas para o melhoramento das estimativas, tal como a determinação cuidadosa de locais para o bombeamento e poços de observações.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área experimental e clima

A pesquisa foi realizada no ano de 2009 no município de Capim, no Estado da Paraíba, localizado na microrregião do Litoral Norte (Figura 1). A população de município é estimada em 5.458 habitantes e sua área territorial de 78 k. Os experimentos de campo foram conduzidos na Destilaria Miriri do Grupo Cavalcanti de Moraes.

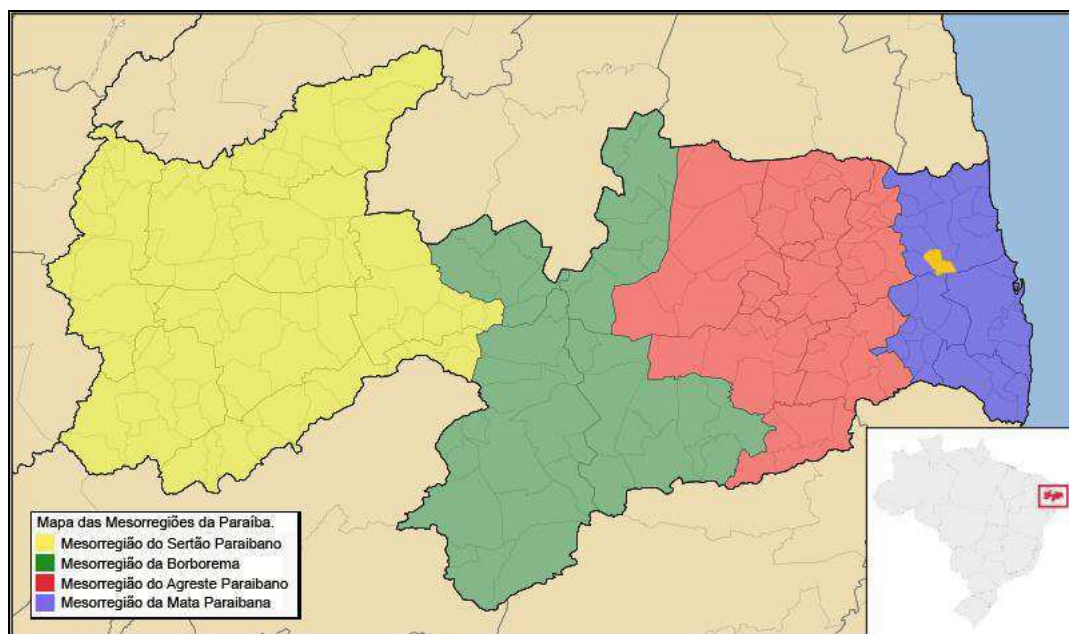


Figura 1. Localização do município da Capim no Estado da Paraíba e as mesorregiões do estado [Fonte: Wikipédia, 2009].

A usina está situada geograficamente na latitude 6°56', longitude 35°07', dentro de uma região propícia ao cultivo da cultura da cana-de-açúcar, com altitude de 100 m e temperatura média de 28°C. A precipitação média anual é de 1.000 mm, com seis meses secos; o clima é quente e úmido, com chuvas de outono a inverno. O clima da região é do tipo As', segundo a classificação de Koopen, e também classificado como Mediterrâneo ou Nordeste quente, de seca atenuada.

3.2. Vegetação e solos

O município de Capim está inserido na unidade Geoambiental dos tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba, com altitude média de 50 a 100 metros (PRODEEM, 2005). Essa região compreende platôs de origem sedimentar, que apresentam grau de entalhamento variável, ora com vales estreitos e encostas abruptas; ora abertos com encostas suaves e fundos com amplas várzeas. De modo geral, os solos são profundos e de baixa fertilidade natural (Figura 2).

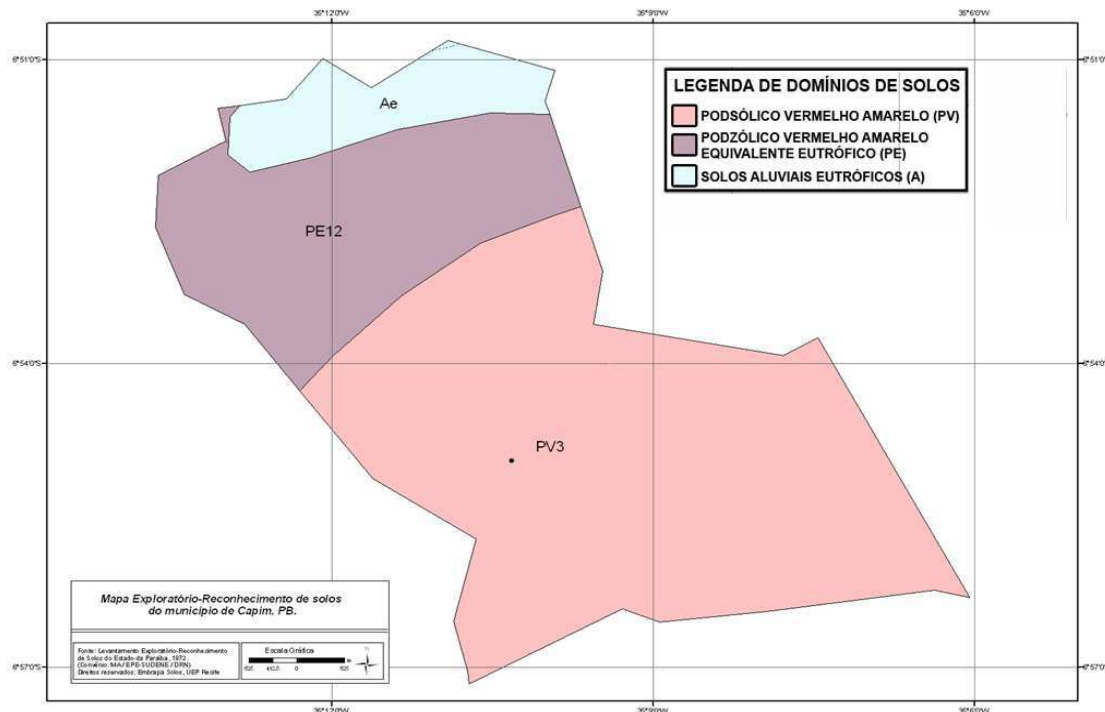


Figura 2. Distribuição do solo do município de Capim, PB. [Fonte: Embrapa, 2009].

A distribuição do solo do município de Capim é formada por solos Aluviais Eutróficos, Podzólico Vermelho Amarelo equivalente Eutrófico e Podzólico Vermelho Amarelo (Embrapa b, 2009). A vegetação é predominantemente do tipo Floresta Subperenifólia, com partes de Floresta Subcaducifólia e Cerrado/ Floresta.

3.3. A cultura estudada

A variedade de cana-de-açúcar RB 92579 cultivada na Destilaria Miriri vem sendo bastante explorada pelo setor sucroalcooleiro do Nordeste. Ela foi desenvolvida em 1992 na Serra do Ouro, em Murici, Estado de Alagoas, e é resultado do cruzamento de outras duas variedades de cana-de-açúcar, a RB 75126 e RB 72199. Após onze anos de ensaios chegou ao campo com um índice de produtividade bastante superior a qualquer outra, refletindo em aumentos de qualidade e lucratividade para o setor.

3.4. Instrumentação e coleta de dados

Na parcela experimental foi instalada uma torre micrometeorológica com os seguintes instrumentos sobre a cultura da cana-de-açúcar: dois anemômetros de conchas (modelo 03001, marca Young), em dois níveis, sendo um localizado a 0,50 m sobre a copa das plantas e o outro a 1,95 m acima da copa, para medição da velocidade vento; dois radiômetros (modelo CM3, marca Kipp & Zonen), a 1,95 m, para medições da radiação solar incidente (R_g) e refletida (R_r) acima do dossel vegetativo; um saldo radiômetro (modelo NR lite, marca Kipp & Zonen), posicionado sobre a copa das plantas para medição do saldo de radiação (R_n); dois psicrômetros não aspirados de cobre-constantan devidamente calibrados, para medição das temperaturas dos bulbos seco e úmido, situados a 0,6 e 2,9 m acima do dossel vegetativo; e um sensor para medição da temperatura e umidade relativa do ar (modelo HMP45C, marca Campbell Scientific, Inc.).

Também foram instalados dois fluxímetros (modelo HFT3, marca Campbell Scientific, Inc.) para medições do fluxo de calor no solo (G) posicionados a 2 cm de profundidade. Os dados da estação agrometeorologia do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), instalada a cerca de 4 km do local do experimento, foram coletados no site www.inpe.br para a determinação da evapotranspiração de referência. O método da razão de Bowen foi utilizado para determinar os componentes do balanço de energia sobre o canal em duas datas do período seco e duas no período chuvoso. As datas selecionadas

para as análises de erros e de sensibilidade dos componentes do balanço de energia foram 19 de março, 09 de maio, 30 de agosto e 01 de setembro de 2009. A vista estação micrometeorológica instalada no canal da Destilaria Miriri com a exposição dos instrumentos utilizados na pesquisa de campo é apresentada na Figura 3.

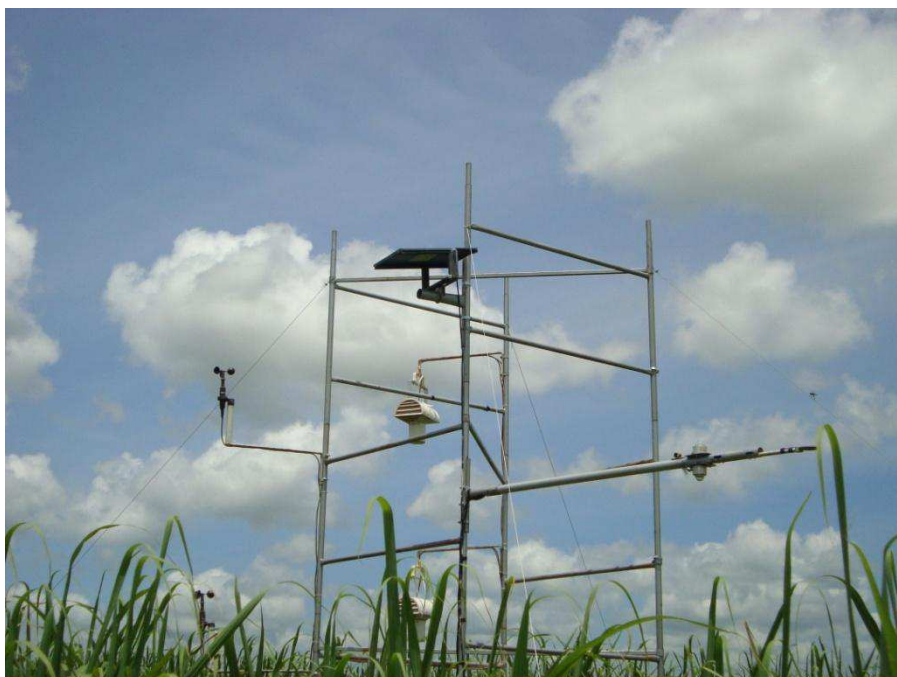


Figura 3. Vista da estação micrometeorológica instalada na área experimental com a exposição dos instrumentos utilizados na pesquisa.

O perfil de temperatura do ar foi medido no interior do dossel da planta selecionada, por meio de termopares de cobre-constantan instalados a 1,0; 2,0 e 3,0 metros de altura. Todos os sensores foram conectados a um sistema automático de aquisição e armazenamento de dados (Datalogger CR 23X, Campbell Scientific, Inc.), programado por meio de linguagem específica com varredura dos sensores a cada cinco segundos e médias armazenadas a cada 15 minutos. A transferência de dados entre o CR23X e o computador foi realizada por meio de um módulo de armazenamento de dados (Modelo SM4M). Posteriormente, os dados foram tratados em planilhas eletrônicas a fim de serem elaboradas as curvas diárias dos valores das variáveis micrometeorológicas observadas durante o período experimental. Esses dados foram utilizados para elaboração mais completa possível do balanço de energia baseado no método da razão de Bowen.

3.5. Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi obtida pelo método da FAO Penman-Monteith, considerando-se a resistência estomática de 70 sm⁻¹ e a altura da cultura hipotética fixada em 0,12m e albedo de 23% pela equação (Allen et al., 1998):

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

em que ET_o é expresso em mm dia⁻¹; já R_n (saldo de radiação) e G (densidade do fluxo de calor no solo) são expressos em MJ m⁻²dia⁻¹, Δ é a declinação da curva de saturação do vapor da água (kPa °C⁻¹) e U₂ é a velocidade do vento (média diária) a 2m acima da superfície do solo (ms⁻¹), T é a temperatura do ar (°C), e_s é a pressão de saturação do vapor (kPa), e_a é a pressão real do vapor (kPa) e γ é o fator psicométrico (MJ kg⁻¹). A seguir é apresentado o procedimento de cálculo de todas as variáveis da Eq. (1), de acordo com o Boletim 56/FAO (Allen et al., 1998), com base nos dados temperaturas máxima e mínima, insolação, umidade relativa e velocidade do vento.

(i) Δ (declinação da curva de saturação do vapor da água)

$$\Delta = \frac{2504 \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right)}{(T + 237,3)^2} \quad (2)$$

em que T é a temperatura média do ar em °C, obtida por:

$$T = \frac{T_x + T_i}{2} \quad (3)$$

em que T_x e T_i são as temperaturas máxima e mínima em °C e Δ em kPa°C⁻¹.

(ii) e⁰(T_x) (pressão de saturação do vapor com base na temperatura máxima)

$$e^0(T_x) = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T_x}{T_x + 237,3}\right) \quad (4)$$

em que e⁰(T_x) é expressa em kPa.

(iii) $e^0(T_i)$ (pressão de saturação do vapor com base na temperatura mínima)

$$e^0(T_i) = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T_i}{T_i + 237,3}\right) \quad (5)$$

em que $e^0(T_i)$ é expressa em kPa.

e_a (pressão real do vapor)

$$e_a = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T_d}{T_d + 237,3}\right) \quad (6)$$

em que T_d é a temperatura ponto de orvalho em °C e e_a é a pressão real do vapor expressa em kPa

(iv) e_s (pressão de saturação do vapor)

$$e_s = \frac{e^0(T_x) + e^0(T_i)}{2} \quad (7)$$

em que e_s é a pressão de saturação do vapor em kPa

(v) R_n (saldo de radiação)

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (8)$$

em que: R_{ns} é a radiação de onda curta e R_{nl} é a radiação de onda longa.

$$R_{ns} = 0,77 * R_s \quad (9)$$

em que R_s é a radiação global, dada por:

$$R_{nl} = 2,458 * 10^{-9} * (0,34 - 0,14 * \sqrt{e_a} * (T_x^4 - T_i^4)) * (1,35 * (\frac{R_s}{0,75206 * R_a})) - 0,35 \quad (10)$$

em que R_a é a radiação solar no topo da atmosfera, em $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$, e_a é a pressão real do vapor e T_x e T_i são as temperaturas máxima e mínima, em Kelvin.

(vi) R_a (radiação solar no topo da atmosfera)

$$R_a = 37,6d_r (\omega_s \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega_s) \quad (11)$$

em que d_r é a distância relativa Terra-Sol, Φ a latitude em graus, δ a declinação do sol em graus, ω_s é o ângulo horário correspondente ao nascer do Sol, em radianos e R_a é expresso em $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$.

(vii) γ (fator psicrométrico)

$$\gamma = 0,00163 \frac{P}{\lambda} \quad (12)$$

em que a pressão atmosférica (P) é expresso em kPa e λ é expresso em MJkg^{-1}

(viii) λ (calor latente de vaporização da água)

$$\lambda = 2,051 - (2,361 \cdot 10^{-3})T \quad (13)$$

Na ausência das medições de P (pressão atmosférica), a mesma foi estimada da seguinte forma:

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065Z}{293} \right)^{5,26} \quad (14)$$

em que Z é a altitude em metros e P é expressa em kPa

(ix) δ (declinação do sol)

$$\delta = \text{sen}^{-1} \left\{ 0,4 \text{sen} \left[\left(\frac{360}{365} \right) (J - 82) \right] \right\} \quad (15)$$

em que δ é expresso em graus e J é dia do ano (Juliano)

ω_s (horário correspondente ao movimento do sol)

$$\omega_s = \arccos(-\operatorname{tg}\phi\operatorname{tg}\delta) \quad (16)$$

em que ω_s é expresso em graus

(x) d_r (distância relativa Terra-Sol)

$$d_r = 1 + 0,033 \cos(0,0172J) \quad (17)$$

(xi) G (Fluxo de calor no solo)

De acordo com Allen et al. (1998) a magnitude do fluxo de calor no solo em períodos diários é relativamente baixa e pode ser desprezada ($G \cong 0$).

3.5.1. *Evapotranspiração da cultura com base no método da razão de Bowen*

O termo balanço de energia se refere ao estudo das proporções existentes entre a quantidade de radiação recebida por determinada superfície e a quantidade de radiação por ela refletida ou transmitida. A diferença entre a radiação que chega e a que se perde é chamada de "saldo de radiação", e representa a energia que mantém a biosfera em atividade. O balanço de energia é baseado no princípio de conservação de energia, dado pela seguinte expressão:

$$R_n + LE + H + G + S = 0 \quad (18)$$

em que R_n é o saldo de radiação (energia disponível), LE e H são os fluxos verticais de calor latente e sensível, respectivamente, G é o fluxo de calor no solo e S é a energia armazenada no dosse vegetativo. Todos os termos da Eq. (18) apresentam as unidades em $W\ m^{-2}$. Foram também consideradas que as densidades de fluxo vertical que chegam à camada vegetativa são positivas, enquanto as que saem são negativas. A seguir são apresentados os

procedimentos para a obtenção do fluxo de calor latente LE e a energia armazenada no dossel da cultura S.

Fluxo de calor latente

O fluxo de calor latente (LE) foi obtido substituindo-se a razão de Bowen na equação (18), portanto;

$$LE = \frac{R_n + G + S}{1 + \beta} \quad (19)$$

A equação acima permite a estimativa de LE com base em medições do fluxo de calor sensível. O termo β , que é o termo da razão de Bowen, corresponde a fração de energia entre os fluxos de calor sensível e calor latente, dado por:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (20)$$

A expressão (20) pode ser escrita na forma;

$$\beta = \frac{Pc_p}{L} \left(\frac{K_h}{K_w} \right) \frac{\partial T / \partial Z}{\partial e / \partial Z} = \gamma \frac{K_h}{K_w} \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (21)$$

em que γ é o fator psicrométrico (kPa/°C), ΔT é o gradiente da temperatura do ar (°C), Δe é o gradiente da pressão parcial do vapor d'água, K_h e K_w são os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível e de vapor d'água, respectivamente. Na ausência de advecção de calor sensível, regional ou local, e em condição de instabilidade atmosférica, $K_h = K_w$; então, o fluxo de calor latente foi obtido segundo a expressão;

$$LE = \frac{Rn + G + S}{1 + \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}}$$

A pressão parcial de vapor d'água em dois níveis acima da copa da planta foi calculada pela equação de Ferrel, expressa da seguinte forma:

$$e(t_a) = e(t_u) - 0,00066(1 + 0,00115t_u)(t_a - t_u)P_{med} \quad (22)$$

em que t_u e t_a são as temperatura dos bulbos úmido e seco, respectivamente, expressas em °C, P_{med} a pressão atmosférica média (hPa) e $e_s(t_u)$ é a pressão de saturação do vapor d'água (hPa), que foi calculada pela equação de Tetens, apresentada por Rosenberg et al. (1983), como:

$$e_s(t_u) = 6,1078 \exp\left(\frac{17,27t_u}{t_u + 237,3}\right) \quad (23)$$

Os valores de β passaram pela análise de consistência de dados conforme estabelecido por Unland et al. (1996). Tal procedimento ocorreu quando β aproximou-se de -1 o que resultaria em valores incorretos de LE.

Calor armazenado pelo dossel vegetativo

Em geral, o calor armazenado pelo dossel vegetativo da planta não é considerado no cômputo do balanço de energia, com o argumento de que esse termo representa menos do que 2% do saldo de radiação. Entretanto, em culturas com grande massa foliar, como no caso da cana-de-açúcar ou de outras culturas de grande porte, esse termo pode consumir uma quantidade considerável da energia disponível. Assim, caso ele seja ignorado, pode acarretar erros apreciáveis no balanço de energia. Logo, na presente pesquisa esse termo foi calculado com base em medidas do gradiente de temperatura do ar, em três níveis no interior do dossel da cultura. No cálculo dessa variável foi utilizada a seguinte equação (McCaughey, 1985):

$$S = \frac{\left(\sum \rho_a C_p \Delta h \left(\frac{T_i + T_{i+1}}{2} \right)_{j+1} - \sum \rho_a C_p \Delta h \left(\frac{T_i + T_{i+1}}{2} \right) \right)}{900} \quad (24)$$

em que ρ_{ar} é a densidade do ar ($1,3 \text{ kg m}^{-3}$), C_p é calor específico do ar a pressão constante ($1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), Δh é distância vertical entre os sensores de medidas (1 m), T_i é a temperatura do ar numa altura “i” e “j”, que representa cada instante em que se calculou a temperatura média da camada de ar. Assim, será obtida a energia térmica do ar nesse

instante em cada uma das camadas do dossel vegetativo. O calor armazenado no dossel do canalial foi obtido pela diferença entre as somas das energias térmica de cada uma das camadas, estimadas entre cada intervalo de 15 minutos, dividindo-se o resultado pelo tempo em segundos, ou seja, 900s.

3.5.2. Análise de erros

O erro relativo devido à variação temporal dos intervalos de medição foi calculado como (Hupet & Vanclooster, 2001):

$$\varepsilon_{\text{rel}} = \frac{\langle \text{var} \rangle_i - \langle \text{var} \rangle_{\text{med}}}{\langle \text{var} \rangle_{\text{med}}} 100\% \quad (25)$$

e o erro absoluto por

$$\varepsilon_{\text{abs}} = \langle \text{var} \rangle_i - \langle \text{var} \rangle_{\text{med}} \quad (26)$$

em que $\langle \text{var} \rangle_i$ é o valor da variável do intervalo de medição i e $\langle \text{var} \rangle_{\text{med}}$ é a média da variável usando o intervalo mínimo de medição.

3.6. Análise de sensibilidade

Nos modelos multivariados, como os de Penman-Monteith, balanço de energia, dentre outros, as variáveis têm dimensões e variam em intervalos diferentes. Isso torna difícil a comparação da sensibilidade das variáveis através de derivadas parciais. Assim, tais derivadas devem ser transformadas para a forma não-dimensional (Beven, 1979) para se avaliar os efeitos dos erros das variáveis sobre o modelo. As equações para a determinação da evapotranspiração da cultura pelos métodos do balanço de energia baseado na razão de Bowen e para a obtenção da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith podem ser expressas genericamente da seguinte forma:

$$ET = f(v_1, v_2, v_3, \dots, v_n) \quad (27)$$

em que $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ são as variáveis climáticas de qualquer um dos modelos. Considerando que Δv_i é a perturbação da variável climática, logo a perturbação de ΔET devida à perturbação das variáveis climáticas é obtida pela equação:

$$\Delta ET = f(v_1 + \Delta v_1, v_2 + \Delta v_2, v_3 + \Delta v_3, \dots, v_n + \Delta v_n) \quad (28)$$

A equação (28) quando expandida em série de Taylor e desprezados os termos de segunda ordem, obtêm-se:

$$\Delta ET = \frac{\partial ET}{\partial v_1} \Delta v_1 + \frac{\partial ET}{\partial v_2} \Delta v_2 + \frac{\partial ET}{\partial v_3} \Delta v_3 + \dots + \frac{\partial ET}{\partial v_n} \Delta v_n \quad (29)$$

As derivadas parciais da Eq. (29) definem a sensibilidade de estimativa de cada variável v_i . Logo, esses coeficientes de sensibilidade variam de acordo com as magnitudes de ET e v_i . O coeficiente de sensibilidade relativa não dimensional de cada variável pode ser obtido pela seguinte equação (McCuen, 1974):

$$S_i = \frac{\partial ET}{\partial v_i} \frac{v_i}{ET} \quad (30)$$

Os coeficientes de sensibilidade obtidos pela Eq. (30) representam a fração de variação de v_i transmitida à variação de ET. As derivadas parciais necessárias para a determinação dos coeficientes de sensibilidade foram calculadas analiticamente através do software Matlab. Os coeficientes de sensibilidade foram obtidos para os intervalos de tempo descritos nesta seção do trabalho. Os valores positivos/negativos do coeficiente de sensibilidade de uma variável indicam que ET aumenta/decrece quando o valor da variável aumenta. Na forma gráfica, o coeficiente de sensibilidade representa a inclinação da curva de sensibilidade, que é suficientemente preciso dentro de certo intervalo linear (Gong et al., 2006).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados da análise do comportamento diurno do saldo de radiação, dos fluxos convectivos de calor latente e sensível, do fluxo de calor no solo e o calor armazenado no dossel vegetativo, utilizando-se o método do balanço de energia baseado na razão de Bowen. Também são apresentadas as análises da evapotranspiração de referência determinada pelo método Penman-Monteith, bem como a análise de sensibilidade desses métodos utilizando os dados experimentais colhidos em canavial na destilaria Miriri S.A, em Capim, PB.

4.1. Variáveis meteorológicas durante o período de estudo

Na Figura 4 são apresentadas as variações diárias da temperatura média do ar máxima e mínima, umidade relativa, radiação global e velocidade do vento a 2 m de altura. A temperatura média do ar variou em torno de 25°C, a temperatura máxima em torno de 30°C; já a temperatura mínima variou entre 18°C a 20°C nos meses de maio a agosto (Figura 4D). O comportamento da umidade relativa é observado na Figura 4A, onde os maiores valores ocorreram em outubro e março com 90 e 96%, respectivamente; já os menores valores ocorreram nos meses de novembro, fevereiro e maio e foram 61, 63 e 62%, respectivamente. Na Figura 4C é apresentada a variação da radiação global no período estudado. Os maiores valores ocorreram durante o mês de novembro, atingindo o valor de 36 W m⁻², e nos meses de junho e julho ocorrem os valores máximos que variam de 45 a 52 W m⁻². Essa variação é devida à nebulosidade da região.

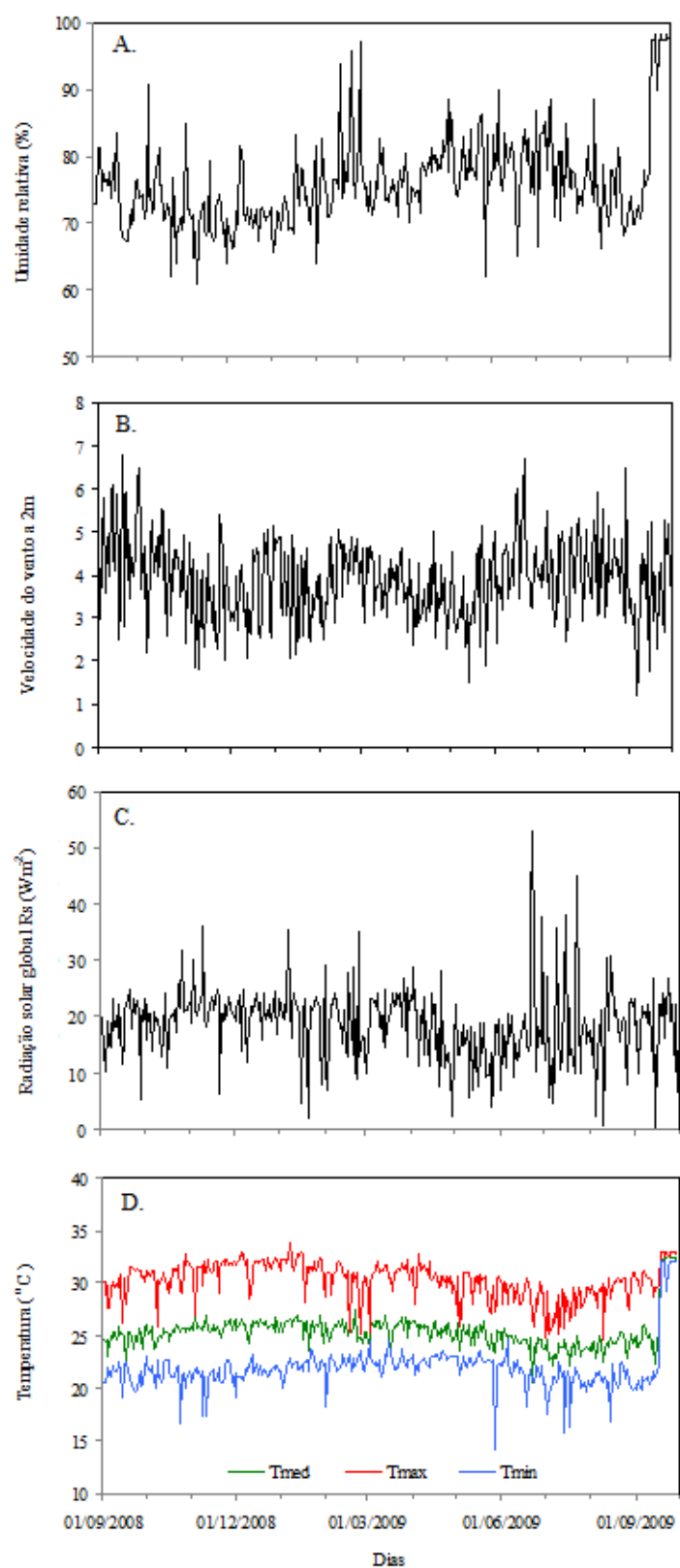


Figura 4. Valores médios diários da umidade relativa do ar (A), velocidade do vento a 2 m (B), radiação solar global (C) e temperatura do ar (D) para o período de 1/9/2008 a 30/9/2009

Na Figura 4B se encontra a variação da velocidade do vento a 2 m de altura, onde se observa que ele variou entre 2 a 9 m s⁻¹ ao longo do período estudado e que os maiores valores ocorreram no trimestre de setembro a novembro de 2008 e de junho a agosto de 2009. Essas variáveis meteorológicas afetam de forma significativa a determinação da evapotranspiração que é controlada pela a disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água para as plantas no solo. A radiação solar depende da latitude local, topografia da região e época do ano. A disponibilidade de energia é controlada pelo albedo superficial; superfícies mais claras refletem mais; portanto, tem menos energia disponível. A demanda atmosférica é controlada pelo poder evaporante do ar (Ea) que é relacionada à velocidade do vento e ao déficit de pressão de vapor; quando maior o valor de (Ea), maior será a evaporação.

4.2. Evapotranspiração de referência

4.2.1. Método de Penman-Monteith

A evapotranspiração de referência (ET_o), com base no método Penman-Monteith, foi determinada com base no banco de dados da estação automática do CPTEC/INPE no período de 01/09/2008 a 30/09/2009. O comportamento diário da ET_o nesse período é apresentado na Figura 5. Os menores valores de (ET_o) variaram entre 1,7 mm d⁻¹ em abril e 1,10 mm d⁻¹ e ocorreram em agosto de 2009. Isso foi devida a pouca disponibilidade de energia no período chuvoso. No período seco na região, com pouca umidade no solo, observou-se um aumento na ET_o.

Segundo Allen et al. (1998), a irrigação modifica as condições climáticas locais resfriando o ar, tornando-o mais úmido, além de reduzir a turbulência na massa de ar que avançam de áreas não irrigadas para as áreas irrigadas. Isso reduz o potencial das massas de ar e, conseqüentemente, a evapotranspiração. Os maiores valores da evapotranspiração são encontrados nos períodos de setembro de 2008, fevereiro, julho e setembro de 2009, com valores superiores a 7,0 mm d⁻¹. Esse período corresponde à época de alta demanda atmosférica e também de maior disponibilidade de água no solo através da precipitação ou irrigação.

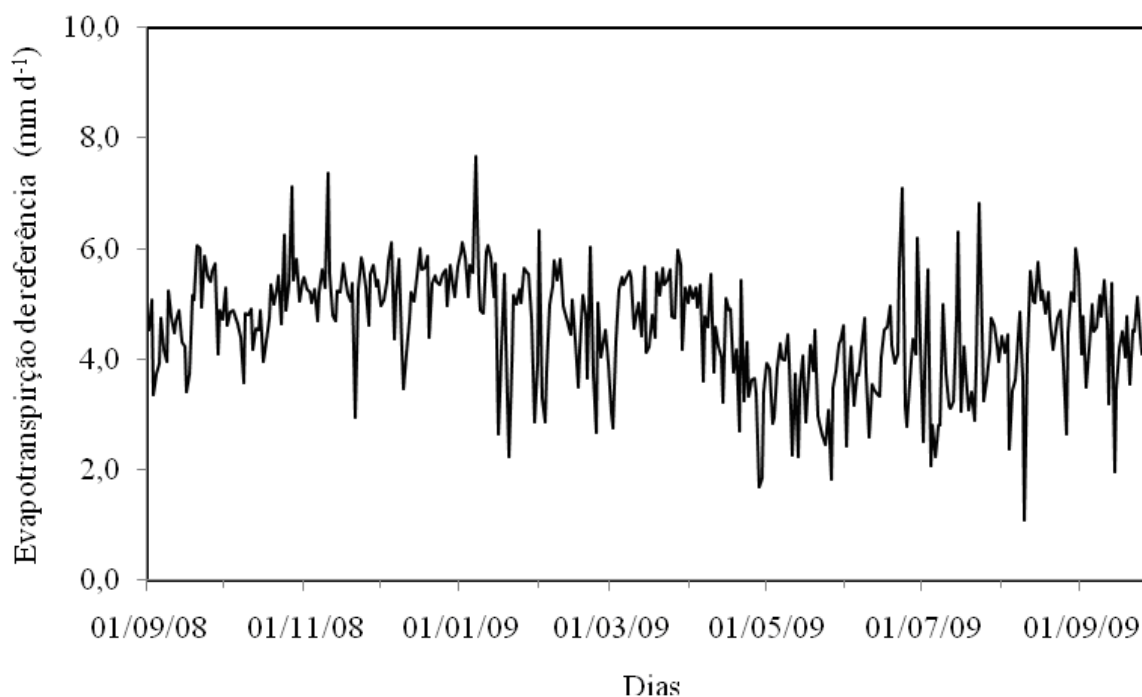


Figura 5. Evapotranspiração de referência diária determinada pelo método Penman-Monteith para o período de 1/9/2008 a 30/09/2009.

4.2.2. Análise de sensibilidade

Os valores dos coeficientes de sensibilidade das variáveis envolvidas no cálculo da evapotranspiração de referência variaram consideravelmente durante o período de estudo o curso anual dos valores dos coeficientes de sensibilidade do saldo de radiação (S_{Rn}), temperatura do ar (S_T), umidade relativa (S_E) e velocidade do vento (S_U) estão representados na (Figura 6). Observa-se que os valores maiores do coeficiente de sensibilidade são para o saldo de radiação, que variaram de 0,19 a 0,97. Por outro lado, os valores de S_E variam de 0,03 a 0,81 e de S_U entre -0,22 e 0,6, que ocorreu no final de setembro de 2009. O coeficiente S_T apresentou uma variação negativa, ou seja, ele foi o que menos contribuiu para o aumento da sensibilidade na estimativa de ETo no período estudado, com valores entre -1,4 e -0,04 ao longo do período estudado. Esses resultados aproximam-se dos resultados obtidos por Hupet & Vanclooster (2001), que evidenciaram que a radiação solar é a variável atmosférica que mais influencia o cálculo da evapotranspiração de referência.

Por outro lado, Xu et al. (2006) utilizaram a mesma técnica para analisar os impactos das variáveis meteorológicas no cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de

(P-M) na bacia hidrográfica de Changjian. Eles obtiveram que a variável mais sensível à equação de P-M na área de estudo foi a umidade relativa do ar, seguida pela radiação de ondas curtas e temperatura do ar. Já a velocidade do vento apresentou os menores valores de coeficiente de sensibilidade que foram explicados pela sua grande variabilidade espacial na região.

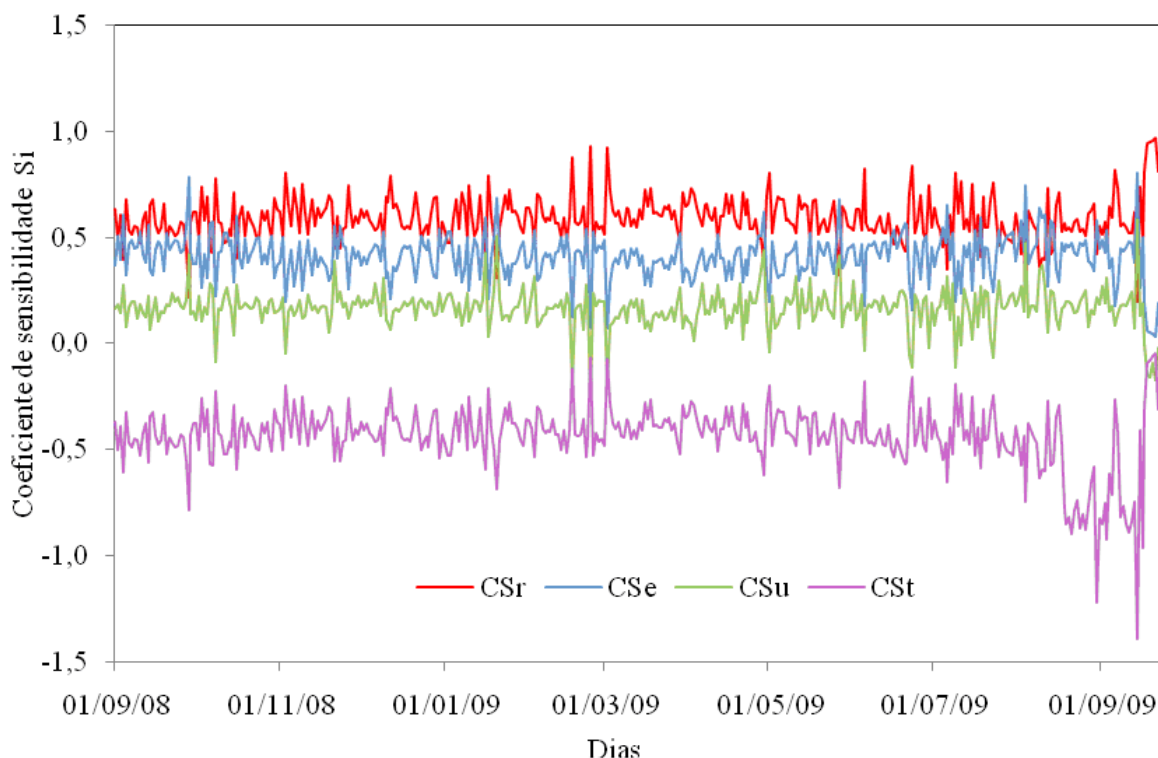


Figura 6. Variabilidade dos coeficientes de sensibilidade das variáveis envolvidas no cálculo da evapotranspiração de referencia pelo método de Penman-Monteith. CSr é o coeficiente de sensibilidade do saldo de radiação, CSe é da umidade do ar, CSu da velocidade do vento e CSt o coeficiente de sensibilidade da temperatura média do ar.

4.3. Evapotranspiração da cultura

4.3.1. Componentes do balanço de energia

Os fluxos de energia foram calculados para o período diurno onde o saldo de radiação foi positivo. Esse procedimento foi também adotado por Silva (2000), Azevedo et al., (2003), Borges (2006). Na Figura 7 é apresentado o balanço de energia para o dia 01 de setembro de 2009, onde verificou-se intensa variabilidade do saldo de radiação em face da

alta nebulosidade registrada nesse dia. Os pontos máximos das densidades de fluxo de calor latente (LE) e de Rn ocorrem próximos às 11 h, com valores de 519 e 576 W m⁻², respectivamente. Os fluxos de calor sensível (H) apresentaram uma variação até o meio dia bem menor, atingindo um valor médio de -23,5 W m⁻². Já os fluxos de calor no solo (G) e de calor armazenado no dossel vegetativo (S) permaneceram muito próximos de zero atingindo valores médios de 0,61 e 6,0 W m⁻², respectivamente.

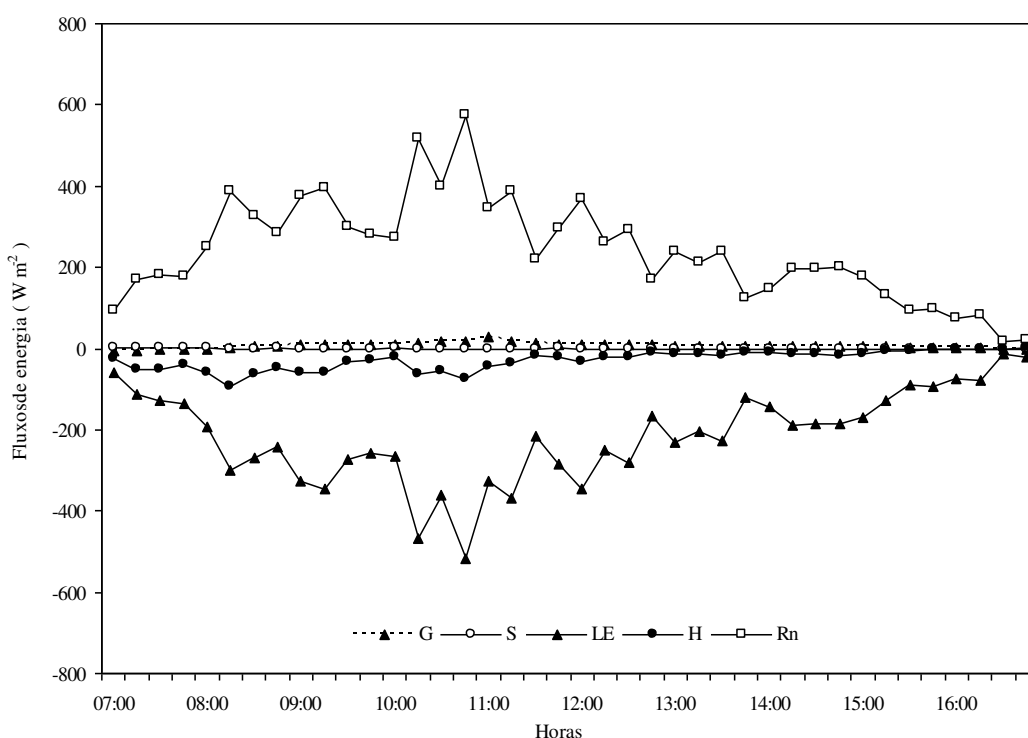


Figura 7. Curso diário dos componentes do balanço de energia sobre a cultura da cana-de-açúcar em 01 de setembro 2009.

Na Figura 8 são apresentados os fluxos de energia sobre a cultura da cana-de-açúcar para o dia 09 de maio de 2009. Verifica-se que ocorreu uma variação moderada dos componentes do balanço de energia ao longo do período diurno. O valor de Rn atingiu o máximo de 685 W m⁻², próximo ao meio dia. Já o fluxo de calor sensível foi maior quando comparado à análise do dia 1 de setembro, com valor médio de -93 W m⁻². As densidades de fluxos S e G não variam intensamente, com valores entre 0,62 e -1,6 W m⁻², respectivamente. Observa-se, ainda, que a variabilidade dos fluxos foi mais intensa a partir das 09 h onde a atmosfera começa a se aquecer mais rapidamente, favorecendo formação de nuvens. O valor máximo de Rn aconteceu próximo às 13 h, atingindo o valor de 730 W m⁻²,

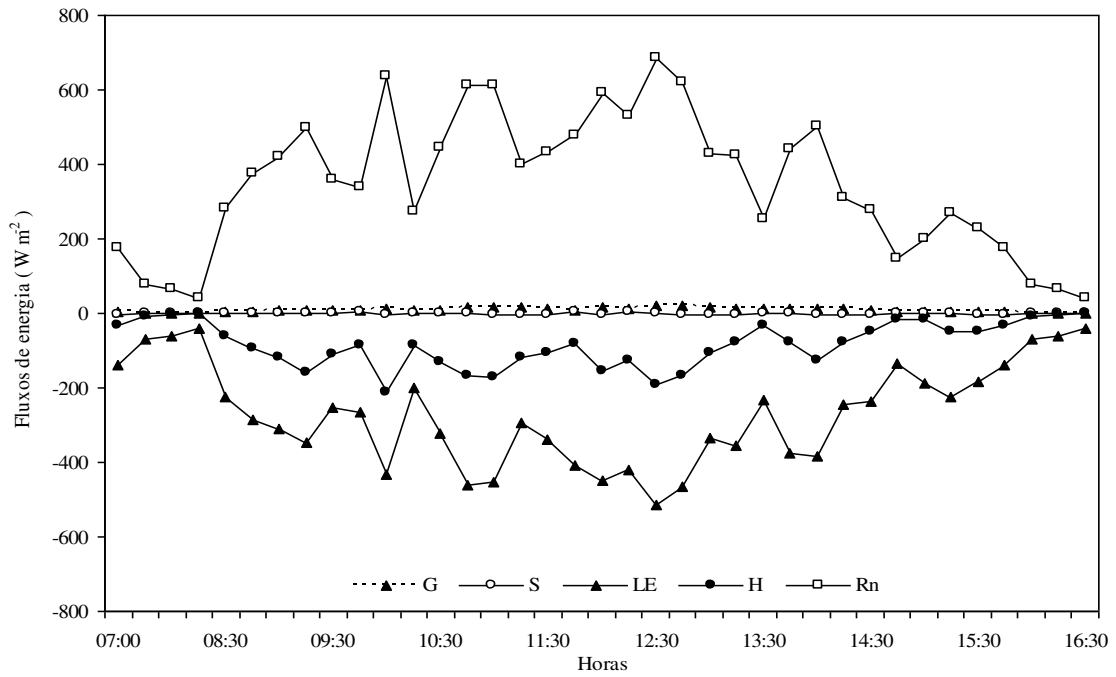


Figura 8. Curso diário dos componentes do balanço de energia para a cultura de cana-de-açúcar irrigada no dia 09 de maio de 2009.

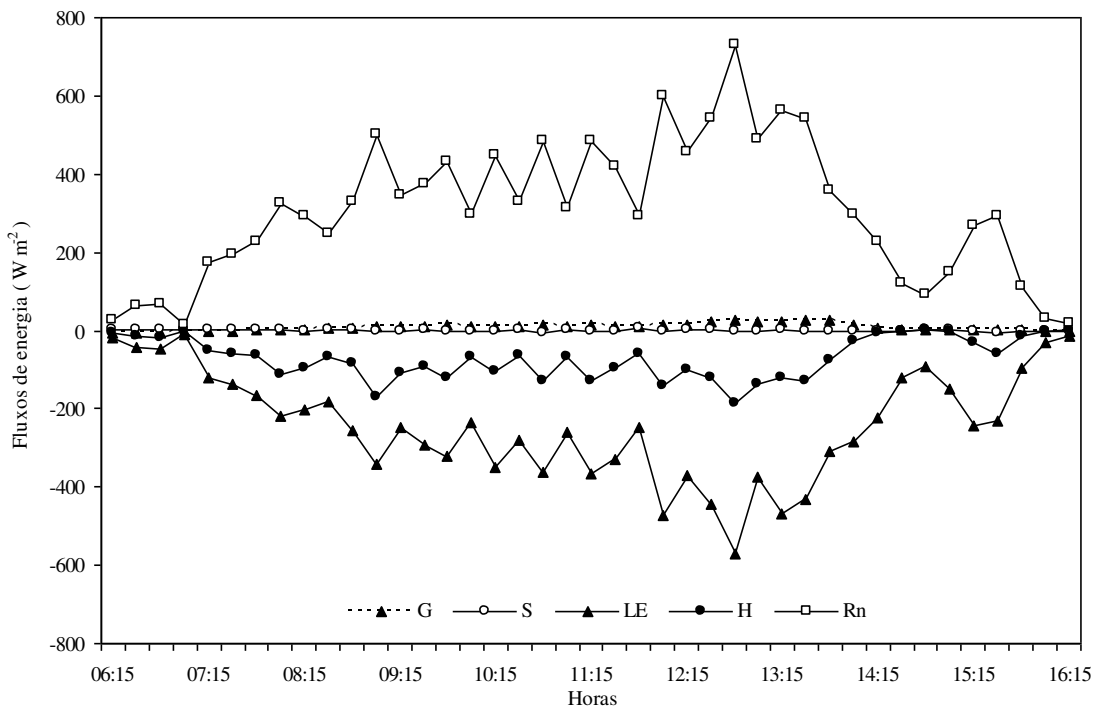


Figura 9. Curso diário dos componentes do balanço de energia para a cultura de cana-de-açúcar irrigada realizada no dia 19 de março de 2009.

com valor médio para o dia analisado de 306 W m^{-2} . Nesse dia a variabilidade de H também foi maior, com valor médio de 71 W m^{-2} . Os valores médios das densidades de fluxo de G e S foram 8 e $0,3 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente. De acordo com as Figuras 8 e 9, os fluxos de Rn apresentaram valores máximos por volta das 15h 30 min nos dias 9 de março e 19 de maio, respectivamente. Na Figura 10 é apresentado o balanço de energia para o dia 30 de agosto de 2009. Para esse dia se observa um comportamento semelhante daquele dos demais dias analisados do período chuvoso. A maior variabilidade de Rn ocorreu a partir das 9 h até às 15h 30 min, provocada pela variabilidade da nebulosidade. O valor máximo de Rn nesse dia foi de 718 W m^{-2} , às 12h30 min. Observa-se, também, uma diminuição na variação do fluxo de calor sensível, cujo valor médio foi de -36 W m^{-2} . Os fluxos de S e G apresentaram a mesma variação ao longo do período diurno atingindo valores médios de $0,13$ e $6,8 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente. Borges (2006), que também aplicou a técnica BERB na cultura da mangueira, encontrou valores médios de Rn e LE de 400 e 300 W m^{-2} , respectivamente, inferiores àqueles encontrados nesta pesquisa.

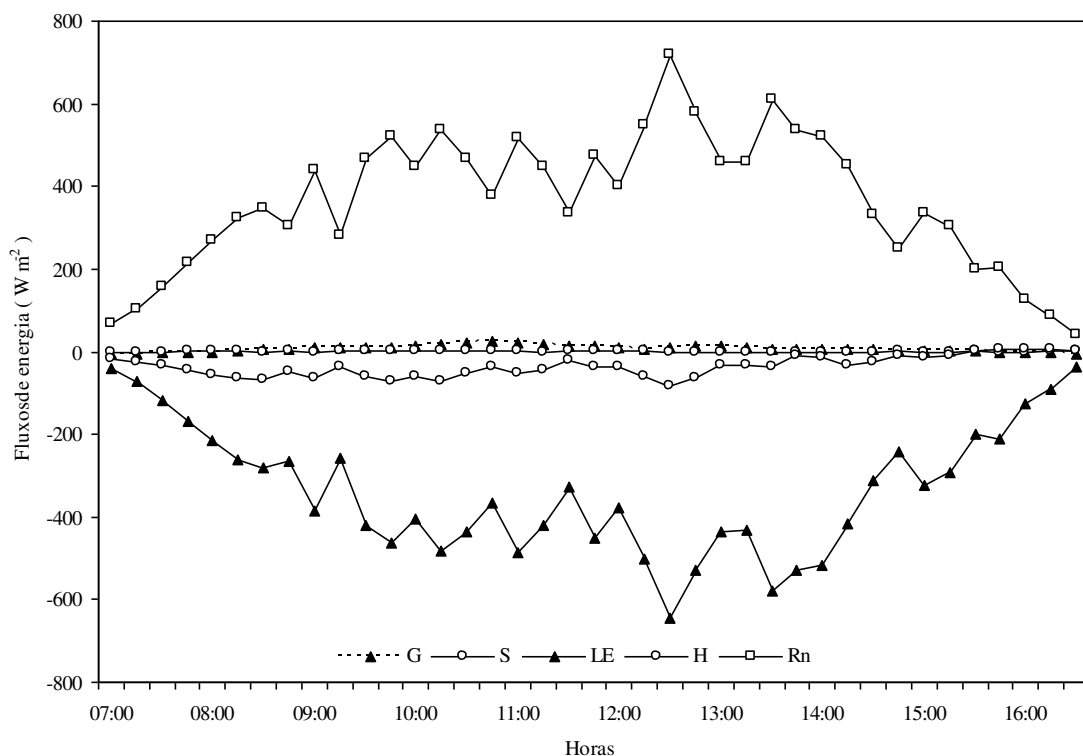


Figura 10. Curso diário dos componentes do balanço de energia para a cultura irrigada de cana-de-açúcar realizada no dia 30 de agosto de 2009.

As partições do saldo de radiação (Rn) em fluxos de calor latente (LE), fluxos de calor no Solo (G), fluxos de calor armazenado no dossel vegetativo (S) e em fluxo de calor sensível (H), expressos em percentagem, constam na Tabela 1. A análise dessa tabela revela que o dia 19 de abril apresentou as maiores valores da partição de Rn em G e em S nos dias analisados. Já a maior partição em LE foi em 9 de maio e H no dia 1 de setembro. Outro fato que pode ser observado nesta tabela é que o balanço de energia não está fechando, ou seja, somando as partições de energia ultrapassa o 100%, isso pode estar ocorrendo devido alguma fonte de advectiva.

Tabela 1. Partição do saldo de radiação (Rn) em fluxos de calor latente (LE), fluxos de calor no Solo (G), fluxos de calor no dossel vegetativo (S) e fluxo de calor sensível. Os valores são expressos em percentagem.

Data	LE/Rn (%)	G/Rn (%)	S/Rn (%)	H/Rn(%)
19/mar	79,85	4,25	1,23	20,73
9/mai	80,10	2,50	0,85	22,01
30/ago	76,84	2,88	0,17	21,40
1/set	75,20	2,44	0,64	23,90

4.3.2. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi aplicada para o balanço de energia nos intervalos de 15, 30, 60, e 120 minutos para os dias 19 de março, 09 de maio, 30 de agosto e de 01 de setembro do ano de 2009. Os coeficientes de sensibilidade do fluxo de calor no solo (Sg), do saldo de radiação (Sr), da temperatura do bulbo seco (St) e da temperatura do bulbo úmida (Se) são apresentados na Figura 11. No intervalo de medição de 15 minutos, o coeficiente de sensibilidade da temperatura do bulbo seco foi maior quando comparado com os das outras variáveis para os dias analisados, com máximo de 0,34 no dia 19 de março e mínimo de -0,01 no dia 09 de maio. Para o dia 09 de maio (Figura 11 B), (St) variou de -0,01 a 0,34, com média e desvio padrão de $0,22 \pm 0,08$. Já o coeficiente de sensibilidade do fluxo de calor no solo (Sg) variou de -0,04 a 0, com media e desvio padrão de -0,02 e 0,01, respectivamente. Por outro lado, (Se) variou de -0,33 a 0,01, com média e desvio padrão de $-0,22 \pm 0,08$, respectivamente. Finalmente, (Sr) que apresentou média e desvio padrão de $-0,98 \pm 0,02$. Assim, os valores de (St) são consistentemente menores do que a sensibilidade das outras variáveis em todos os dias analisados. Ela tende a assumir os menores valores nas primeiras horas da manhã e no final do período diurno. Já os coeficientes de sensibilidade do

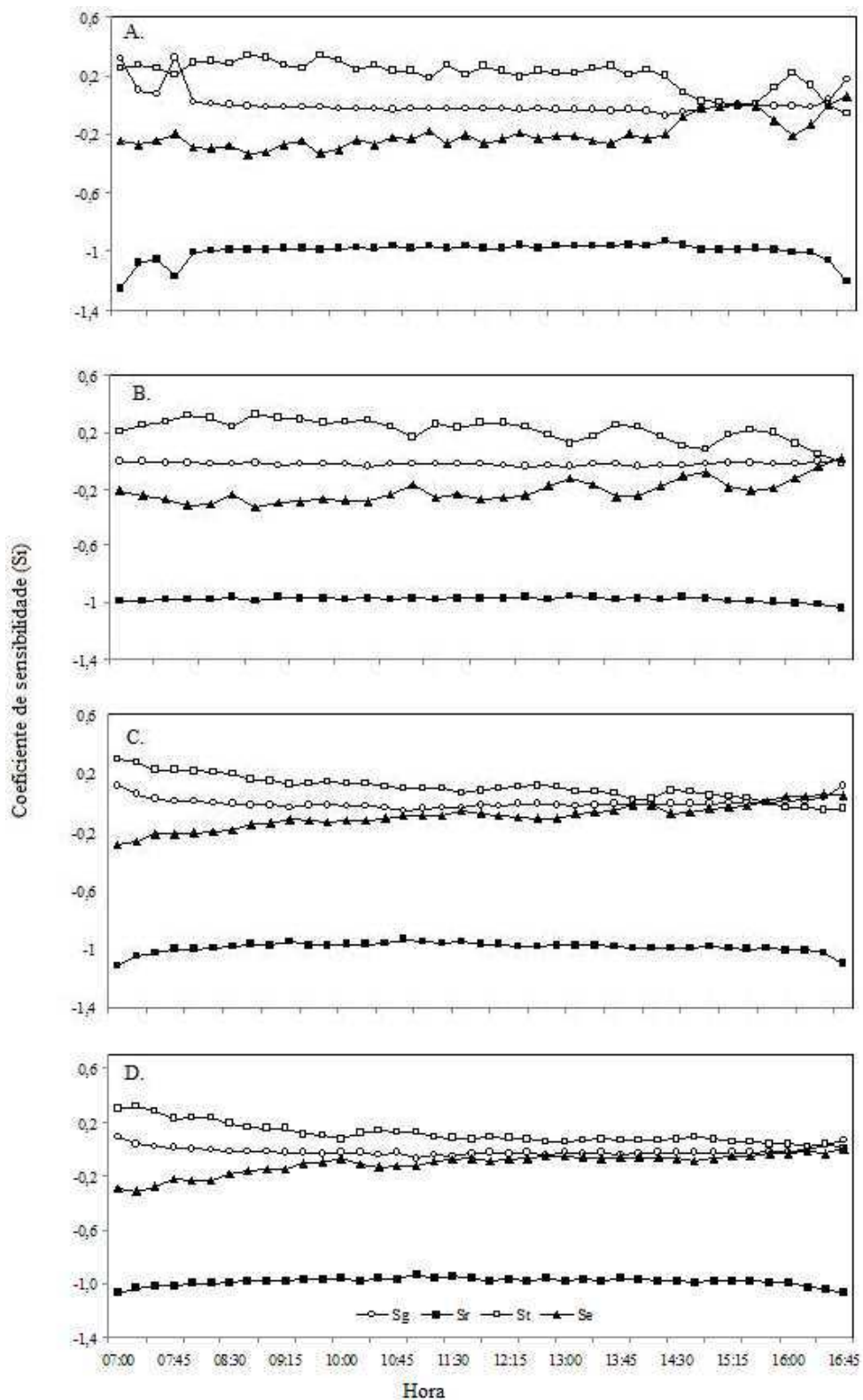


Figura 11. Curso temporal dos coeficientes de sensibilidade da evapotranspiração da cultura pelo método do balanço de energia baseado na razão de Bowen em intervalos de mediação de 15 minutos nos dia 19 de março (A), 9 de maio (B), 30 de agosto (C) e 1 de setembro (D) do ano de 2009.

saldo de radiação, temperatura do bulbo úmida e do fluxo de calor no solo têm comportamentos semelhantes e oscilam dentro da mesma ordem de magnitude. No dia 30 de agosto, os coeficientes (Sg), (Sr), (St) e Se apresentam valores médios de -0,01; -0,99; 0,1 e -0,1 respectivamente (Figura 11C). Similarmente, no dia 1 de setembro, os valores de (Sg), (Sr), (St) e (Se) foram -0,02; -0,98; 0,11 e -0,11, respectivamente (Figura 11D). Nesse dia, o maior valor foi para o coeficiente de sensibilidade da temperatura do bulbo seco, com o valor de 0,34 e o menor foi para o saldo de radiação com valor de -1,1. Observa-se, ainda, que a variabilidade dos coeficientes de todas variáveis é muito pequena ao longo do período diurno no intervalo de medições de 15 minutos. Os resultados obtidos por Gong et al. (2006) indicam que em algumas regiões da bacia de Changjian, a variável que apresentou maior sensibilidade foi a temperatura média do ar seguida pela umidade relativa. Assim, esses resultados são conflitantes com aqueles obtidos neste trabalho para o intervalo de tempo de medição de 15 minutos. Isso correu possivelmente em face da variabilidade espacial dessa variável na bacia de Changjian, China.

Na Figura 12 é apresentada a variabilidade dos coeficientes de sensibilidade das variáveis analisadas para o intervalo de medição de 30 minutos. Observa-se que (St) continua a ser a variável que apresentou maior sensibilidade no cálculo do fluxo de calor latente, seguida por (Sr), (Sg) e (Se). Também nesse caso, (St) tende a aumentar nas primeiras horas do período diurno e diminui ao entardecer para todos os dias analisados. Nesse intervalo de medição, (St) variou de 0 a 0,31, -0,01 a 0,32, -0,05 a 0,30 e de -0,01 a 0,29 nos dias 19 de março, 9 de maio, 30 de agosto e 1 de setembro, respectivamente. Já (Sg) apresentou valores médios de -0,01; -0,02; 0,0; -0,01, para os dias 19 de março, 9 de maio, 30 de agosto e 1 de setembro, respectivamente. A sensibilidade de (Sr) apresentou médias para os dias 19 de março, 9 de maio, 30 de agosto e 1 de setembro, respectivamente, de 0,08; 0,04; 0,04 e 0,05. Por outro lado, as médias de (Se) foram de -0,21; -0,21; -0,10 e -0,11 nos dias 19 de março, 9 de maio, 30 de agosto e 1 de setembro, respectivamente. Os coeficientes de sensibilidades positivos ou negativos de uma variável indicam que variável analisada (ET_o ou ET_c, no caso deste estudo) aumenta ou decresce com a variável climática (Liqiao et al., 2008). No presente trabalho, a temperatura do ar é a principal variável controladora no processo de evapotranspiração da cultura no intervalo de medição de 30 minutos. Por outro lado, o fluxo de calor no solo oferece a menor contribuição, principalmente no dia 30 de agosto onde foi encontrado zero para o seu coeficiente de sensibilidade.

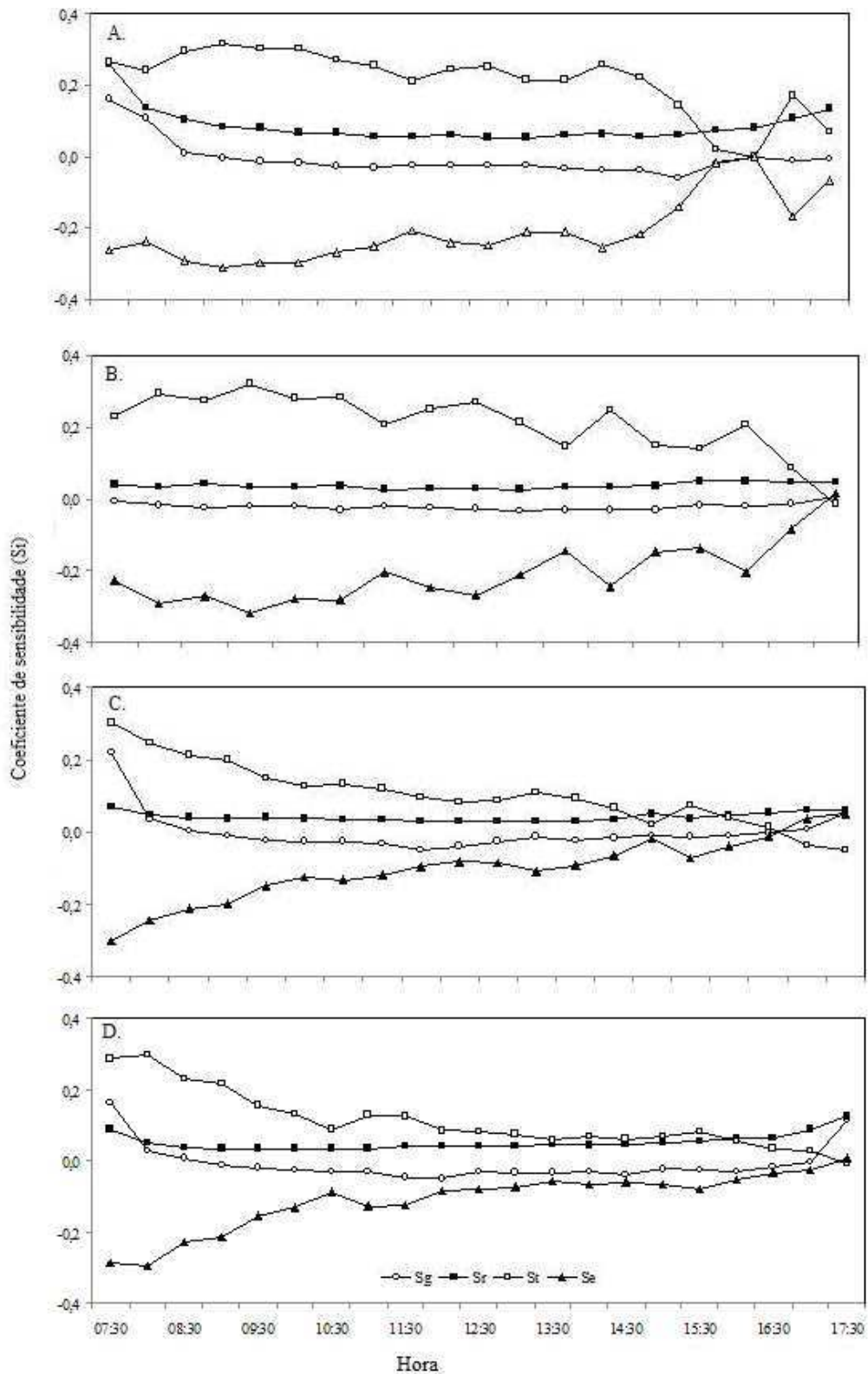


Figura 12. Curso temporal dos coeficientes de sensibilidade da evapotranspiração da cultura pelo método do balanço de energia baseado na razão de Bowen no intervalo de mediação de 30 minutos nos dias 19 de março (A), 09 de maio (B), 30 de agosto (C) e 1 de setembro (D) do ano de 2009.

Já os valores da média e desvio padrão correspondentes a (Sr), que foi a segunda variável a apresentar maior sensibilidade, foram: $0,08 \pm 0,04$; $0,04 \pm 0,01$; $0,04 \pm 0,01$ e $0,05 \pm 0,02$, respectivamente, para os dias 19 de março, 9 de maio, 30 de agosto e 1 de setembro de 2009 (Figura 12). Por outro lado, o (Sg) nesse intervalo de medição apresentou também pouca variabilidade, cujos valores médios foram -0,01; -0,02; 0 e -0,01 para os dias 19 de março, 9 de maio, 30 de agosto e 1 de setembro de 2009. Os valores médios de (Se) para os dias 19 de março, 09 de maio, 30 de agosto e 1 de setembro foram -0,21; -0,21; -0,10 e -0,11; respectivamente. O valor mínimo atingido por (St) de -0,05 ocorreram no dia 30 de agosto; valor o máximo de 0,32 ocorreu no dia 09 de maio. Por outro lado, os valores de (Sr) máximos e mínimos ocorreram em 09 de maio e 19 de março, com os respectivos valores de 0,02 e 0,25. A sensibilidade do fluxo de calor no solo (Sg) atingiu o mínimo valor em 19 de março (-0,06) e máximo em 30 de agosto (0,21). Nessa mesma ordem de grandeza, Se atingiu valores mínimos e máximos em 9 de maio (0,31) e 30 de agosto (0,05). A variabilidade dos coeficientes de sensibilidade para o intervalo de medição de 60 minutos para as variáveis analisadas é exibida na Figura 13. Observa-se que houve uma redução acentuada na variabilidade dos coeficientes das variáveis nesse intervalo de medição.

A maior parte dessa variabilidade se concentra nas primeiras horas do período diurno, principalmente nos dias 30 de agosto (Figura 13C) e 1 de setembro (Figura 13D). Também, nesse intervalo de medição, (St) apresentou os menores valores dentre as variáveis analisadas. Comportamento semelhante é observado no intervalo de 120 minutos, porém de forma mais acentuada (Figura 14). Nesse caso, também, St é variável com maior sensibilidade na determinação do fluxo de calor latente pelo BERB, seguida de (Sg), (Se) e (Sr). Notas-se, ainda, que os valores de (St), (Se) e (Sg) decrescem de forma acentuada em direção ao final do período diurno. Isso se deve principalmente a estabilização dos fluxos de energia e da temperatura. De acordo com Todd et al. (2000), a sensibilidade do instrumento influencia no computo da evapotranspiração, assim como o estágio fenológico da cultura (Allen et al., 1998; Pereira et al., 2002).

No intervalo de medição de 120 minutos (Figura 14), os valores médios e os desvios padrão do coeficiente de sensibilidade (St) para os dias 19 de março, 9 de maio, 30 de agosto e 1 de setembro de 2009 foram $0,21 \pm 0,09$; $0,20 \pm 0,07$; $0,10 \pm 0,09$ e $0,12 \pm 0,08$, respectivamente. Já o (Sg) apresentou valores médios e desvios padrão de $-0,02 \pm 0,02$; $-0,01 \pm 0,03$; $-0,01 \pm 0,02$ e $-0,02 \pm 0,02$ para os dias 30 de agosto e 01 de setembro.

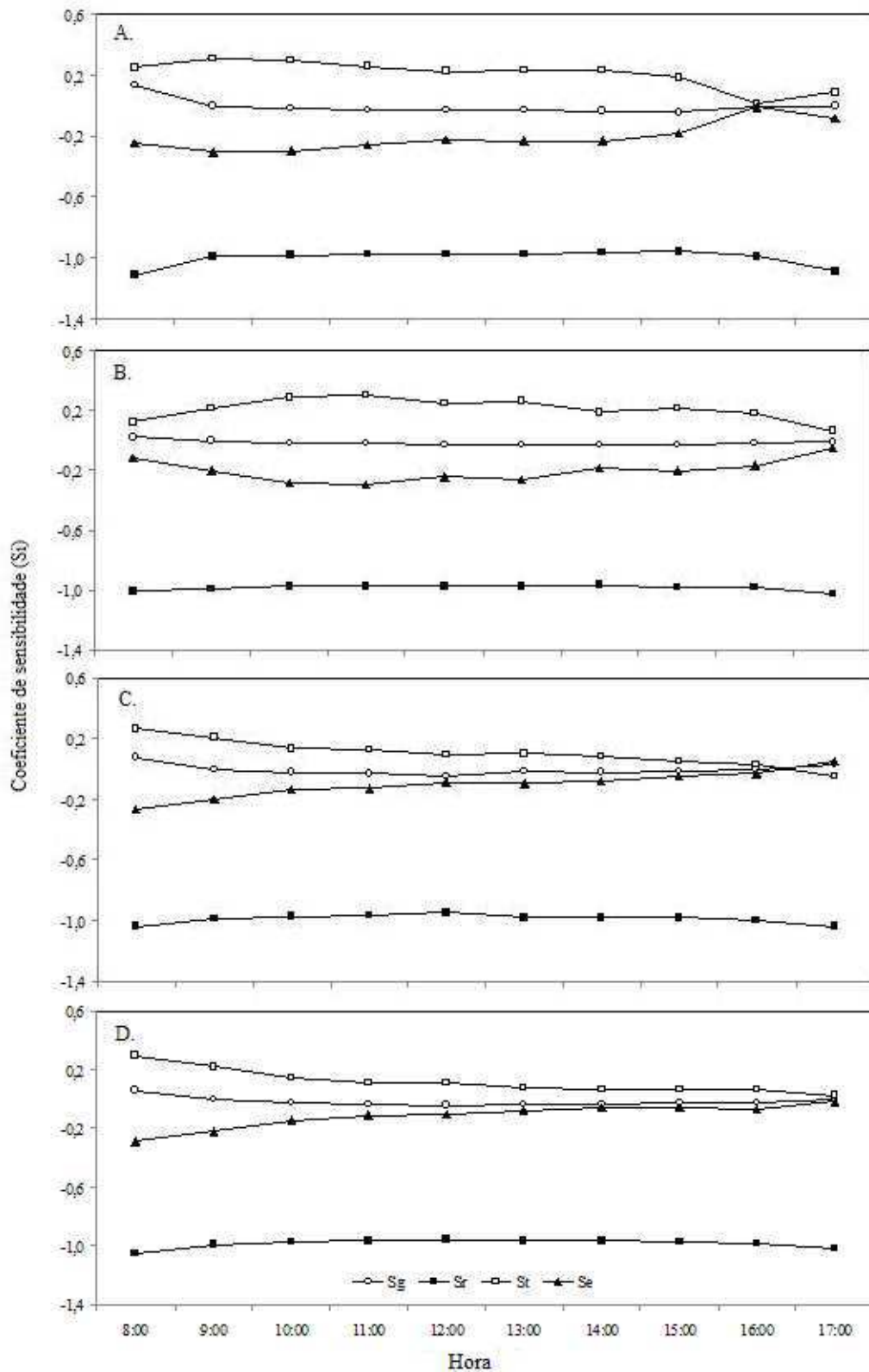


Figura 13. Curso temporal dos coeficientes de sensibilidade da evapotranspiração da cultura pelo método do balanço de energia baseado na razão de Bowen no intervalo de mediação de 60 minutos nos dia 19 de março (A), 09 de maio (B), 30 de agosto (C) e 1 de setembro (D) do ano de 2009.

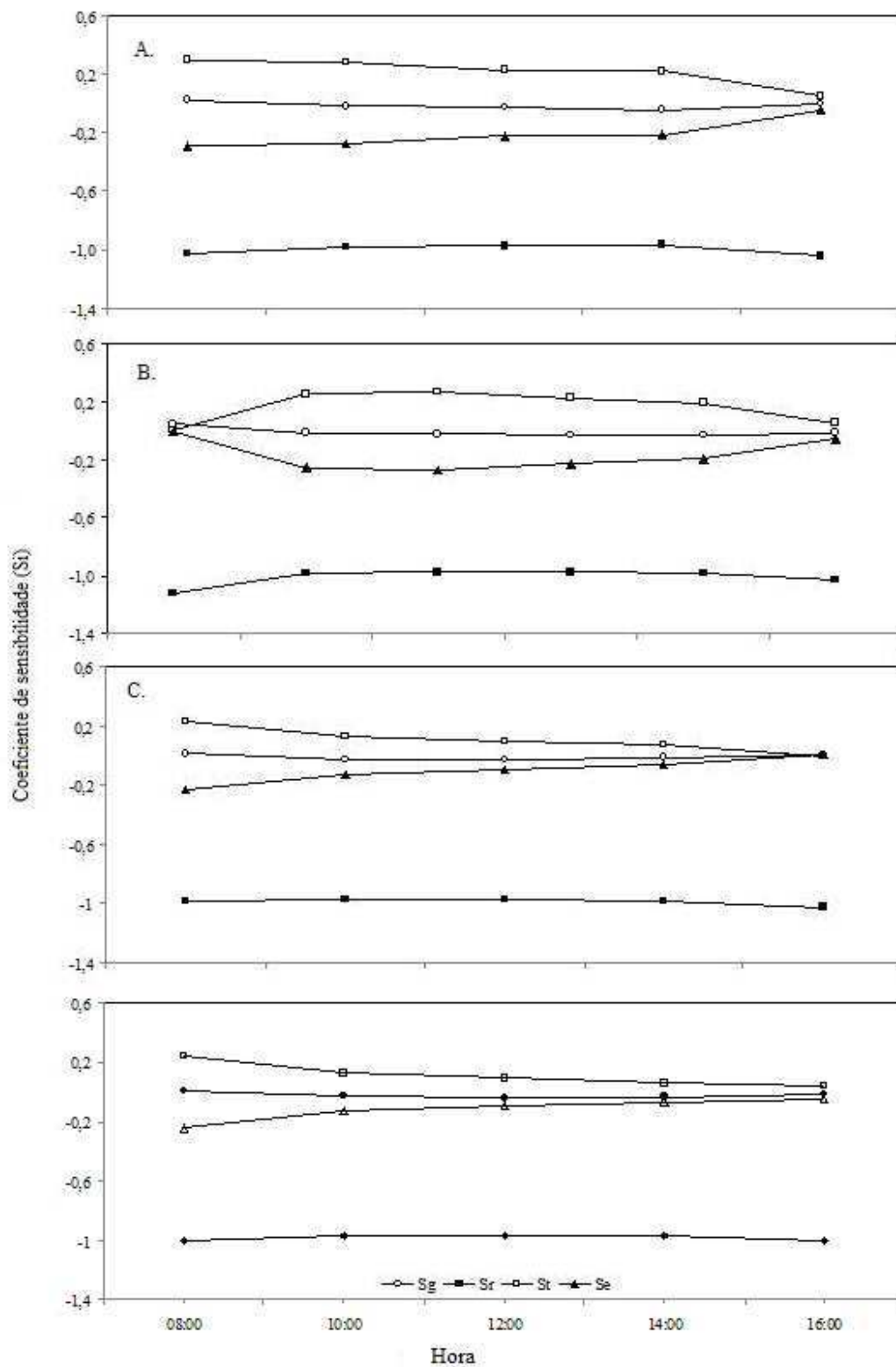


Figura 14. Curso temporal dos coeficientes de sensibilidade da evapotranspiração da cultura pelo método do balanço de energia baseado na razão de Bowen no intervalo de mediação de 120 minutos nos dia 19 de março (A), 9 de maio (B), 30 de agosto (C) e 1 de setembro (D) do ano de 2009.

Por outro lado, os valores das médias e dos desvios padrão de Se foram $-0,21 \pm 0,09$; $-0,20 \pm 0,04$; $-0,10 \pm 0,08$ e $-0,11 \pm 0,08$, respectivamente, para os dias 19 de março, 9 de maio, 30 de agosto e 1 de setembro de 2009. Finalmente, Sr apresentou os valores médios e desvios padrão de $-1,00 \pm 0,05$; $-0,98 \pm 0,02$; $-0,99 \pm 0,03$ e $-0,98 \pm 0,03$, para os dias 19 de março, 9 de maio, 30 de agosto e 1 de setembro, respectivamente.

Quanto maior o valor absoluto do coeficiente de sensibilidade, maior será o efeito de um determinado variável sobre o fluxo de calor latente (Liqiao et al., 2008). Assim, nesse intervalo de medição, em termos de valor absoluto, os menores valores do coeficiente de sensibilidade foram para o fluxo de calor no solo e os maiores foram para o saldo de radiação. A justificativa para isso é que a variabilidade de Rn é muito maior do que de G em face, principalmente, da variação da cobertura de nuvens. A temperatura do bulbo seco e a temperatura do bulbo úmido apresentaram graus de sensibilidades semelhantes no cálculo do fluxo de calor latentes, variando entre $-0,21$ e $0,21$. A Tabela 2 descreve as médias dos valores absolutos dos coeficientes de sensibilidade das variáveis envolvidas no cálculo do balanço de energia baseado na razão de Bowen dos quatro dias analisados no estudo, para cada intervalo de medição.

Tabela 2. Valores médios dos coeficientes de sensibilidade das variáveis envolvidas no cálculo do fluxo de calor sensível sobre a cultura da cana-de-açúcar.

Coeficiente de Sensibilidade	15 minutos	30 minutos	60 minutos	120 minutos
Fluxo de calor no solo (Sg)	0,013	0,010	0,015	0,015
Saldo de radiação (Sr)	0,988	0,853	0,993	0,993
Temperatura do bulbo seco (St)	0,158	0,158	0,158	0,148
Temperatura do bulbo úmido (Se)	0,158	0,158	0,158	0,148

Essa tabela, que sumariza as discussões anteriores em termos das médias dos períodos, combinada com a citação anterior de Liqiao et al., (2008), indica que o saldo de radiação tem o maior efeito no cálculo da evapotranspiração dentre as variáveis envolvidas no cálculo do balanço de energia. Por outro lado, o fluxo de calor no solo oferece a menor contribuição, sendo que a temperatura do bulbo seco e a temperatura do bulbo úmido desempenham efeitos semelhantes, rigorosamente na mesma magnitude em valor absoluto.

Observa-se, ainda, que (Sg) e (Sr) tendem a oferecer uma contribuição maior no cálculo de LE com o aumento do intervalo de medição. Inversamente, essa contribuição diminui para as temperaturas dos bulbos seco e úmido. Chen & Chen (2003) verificaram que a sensibilidade das variáveis aumenta com o aumento do tempo. A constatação no presente estudo em que o saldo de radiação é a variável mais sensível no cômputo do fluxo de calor sensível está relacionada com a variabilidade da cobertura de nuvens.

4.4. Análise de erro

A Tabela 3 exibe o valor absoluto da média dos erros relativos e o desvio padrão para cada variável envolvida no cálculo do balanço de energia para um dia do período de estudo (19 de março). Observa-se que houve um aumento do valor médio do erro relativo com o aumento do intervalo de medição para todas as variáveis nesse dia.

Tabela 3. Valores absolutos da média do erro relativo, em percentagem (%) e desvio padrão da temperatura do bulbo seco T_{seco} , fluxo de calor no solo (G), temperatura do bulbo úmido $T_{úmido}$ e do saldo de radiação (Rn) para o dia 19 de março de 2000.

	T_{seco}			
Tempo (min)	15	30	60	120
Média (°C)	0,002	0,014	0,012	0,085
Desvio padrão (°C)	7,60	7,48	7,35	7,12
	G			
Média (Wm^{-2})	0,055	3,080	2,940	8,189
Desvio padrão (Wm^{-2})	115,1	113,6	109,9	109,4
	$T_{úmido}$			
Média (°C)	0,022	0,047	0,046	0,087
Desvio padrão (°C)	4,37	4,33	4,24	4,03
	Rn			
Média (Wm^{-2})	0,008	2,24	2,14	5,88
Desvio padrão (Wm^{-2})	58,58	57,02	51,570	50,64

Apesar da média dos erros relativos serem pequenas e crescentes, os seus desvios padrão no período analisado praticamente não variam dentro dos intervalos de medição. Por exemplo, para esse dia, a média do erro relativo da T_{seco} variou de 0,002 a 0,085 dentro dos intervalos analisados. Já a média do erro de G variou de 0,055 a 8,189; da temperatura do bulbo úmido variou de 0,022 a 0,087 e, finalmente, a média do erro relativo de Rn variou

de 0,008 a 5,88. Os erros relativos das temperaturas dos bulbos seco e úmido são muito pequenos quando comparados com aqueles de R_n e G . As maiores médias dos erros relativos ocorrem no intervalo de 120 minutos, justamente no maior intervalo de medição de todas as variáveis medidas da equação do balanço de energia.

Na Figura 15 é apresentada a distribuição dos erros absolutos com os seus desvios padrão para cada intervalo de medição da temperatura do bulbo seco para os dias 19 de março e 1 de setembro de 2009. Observa-se pequena oscilação dos valores do erro absoluto em torno da media com baixo desvio padrão no dia 19 de março (Figura 15A).

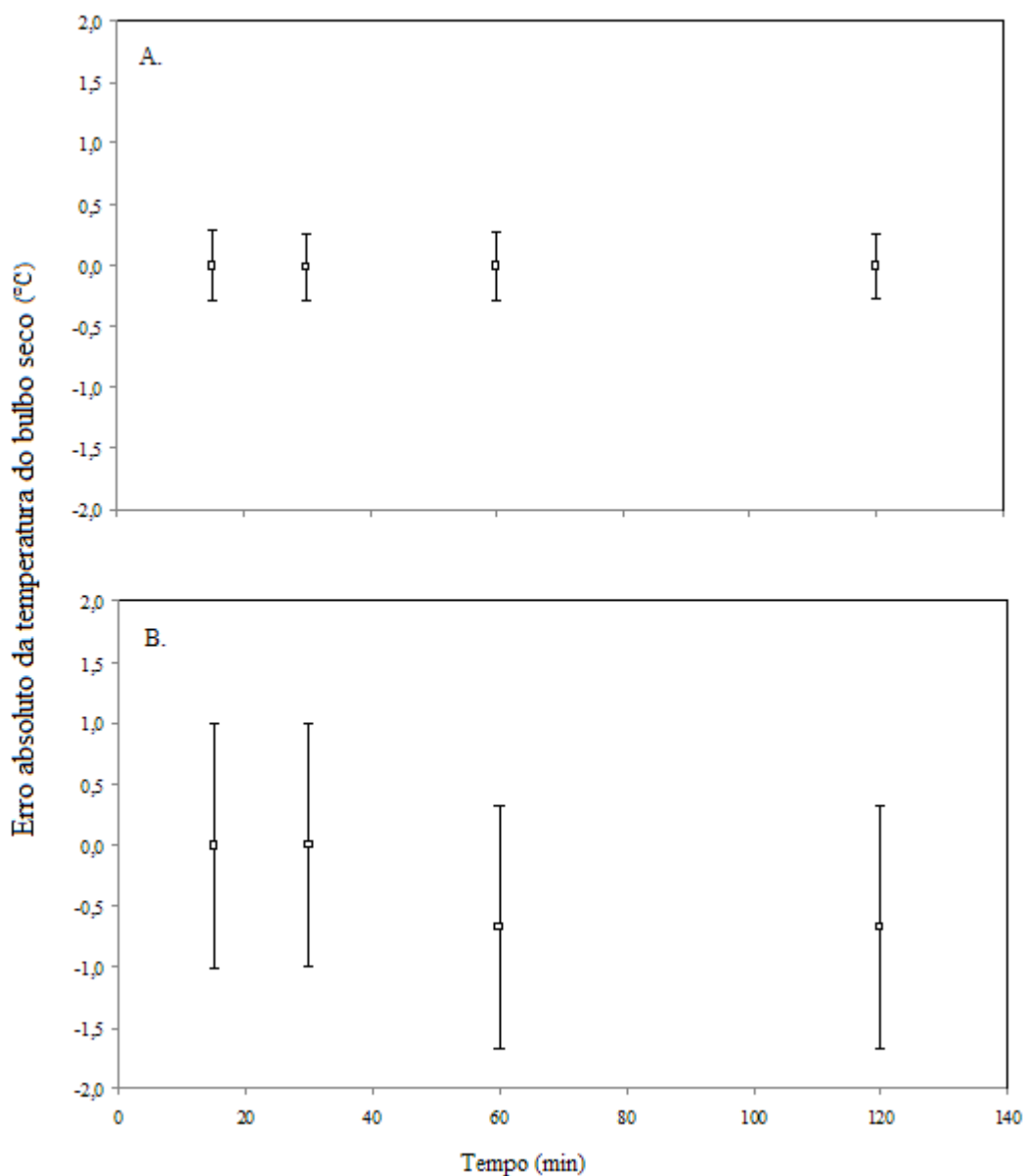


Figura 15. Distribuição dos erros absolutos para cada intervalo de medição da temperatura do bulbo seco para os dias 19 de março (A) e 1 de setembro de 2009 (B).

Por outro lado, a variabilidade desse erro no dia 01 de setembro é bem maior quando comparada com a data anterior (Figura 15B). Isso ocorreu possivelmente em face da alta variabilidade da temperatura do ar durante o período seco na região decorrente do efeito da irrigação do canal. Na Figura 16 é apresentada a distribuição do erro absoluto de fluxo de calor no solo para cada intervalo de medição. Nota-se que a variação dos valores em torno da média no dia 01 de setembro (Figura 16B) foi ligeiramente menor do que aquela do dia 19 de março (Figura 16A).

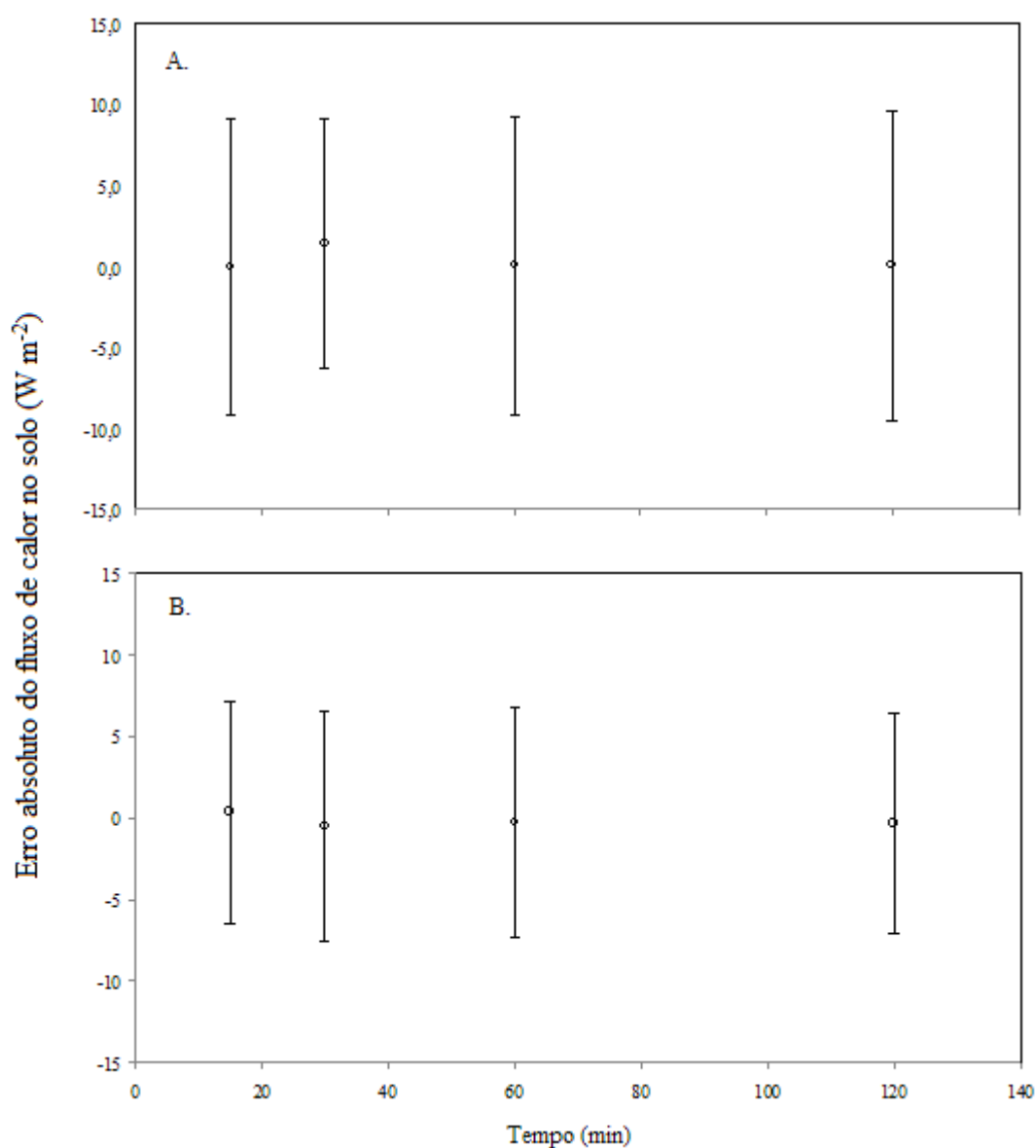


Figura 16. Distribuição dos erros absolutos do fluxo de calor no solo para os dias 19 de março (A) e 1 de setembro de 2009 (B).

Para o intervalo de mediação de 15 minutos o valor desse erro absoluto, no dia 01 de setembro, é de 0,38 enquanto a do dia 19 de março ele é nulo. Por outro lado, o desvio padrão do dia 19 de março foi maior do que o de 01 de setembro, com valores de 9,16 e 6,8 $W m^{-2}$, respectivamente. A Figura 17 exhibe a distribuição do erro absoluto da temperatura do bulbo úmido ($T_{\text{úmido}}$). Nota-se que esse erro permanece quase constante ao longo dos intervalos de medição no dia 19 de março (Figura 17A).

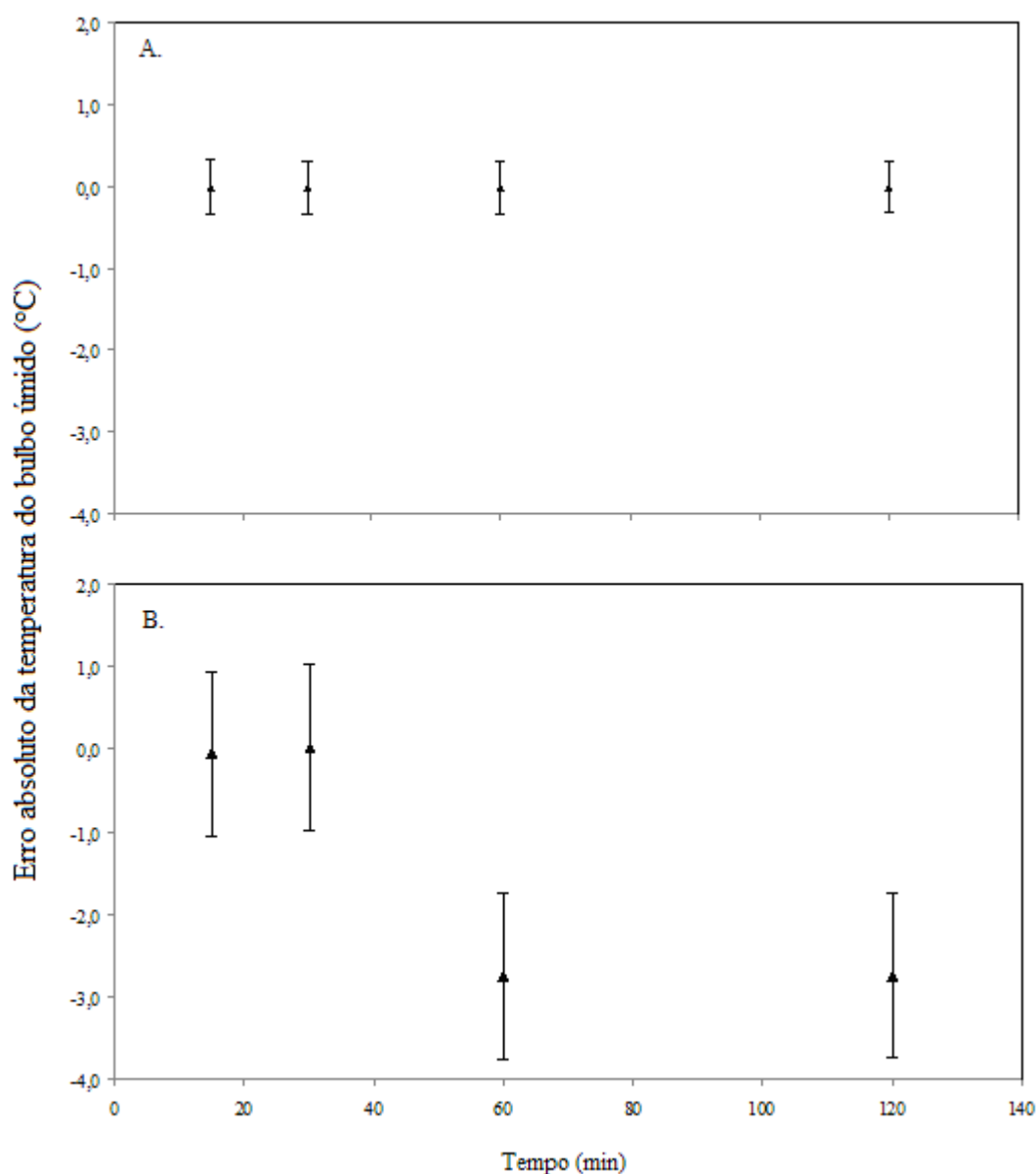


Figura 17. Distribuição dos erros absolutos da temperatura do bulbo úmido para os dias 19 de março (A) e 01 de setembro de 2009 (B).

Entretanto, isso não ocorre no dia 1 de setembro (Figura 17B). No dia 19 de março e para o intervalo de medição de 15 minutos, a média e o desvio padrão do erro absoluto foi de $0 \pm 0,33$ ($^{\circ}\text{C}$); enquanto no dia 01 de setembro esses valores forma de $0,03 \pm 0,37$ $^{\circ}\text{C}$. Na Figura 18 se encontra a distribuição do erro absoluto do saldo de radiação para o dia 19 de março (Figura 18A) e 01 de setembro (Figura 18B). A variabilidade dos valores médios dos erros absolutos, para o dia 19 de março em cada intervalo de medição, é superior a àquela do dia 01 de setembro. Isso foi devido, possivelmente, a maior variabilidade do déficit de pressão de vapor de água durante o período chuvoso.

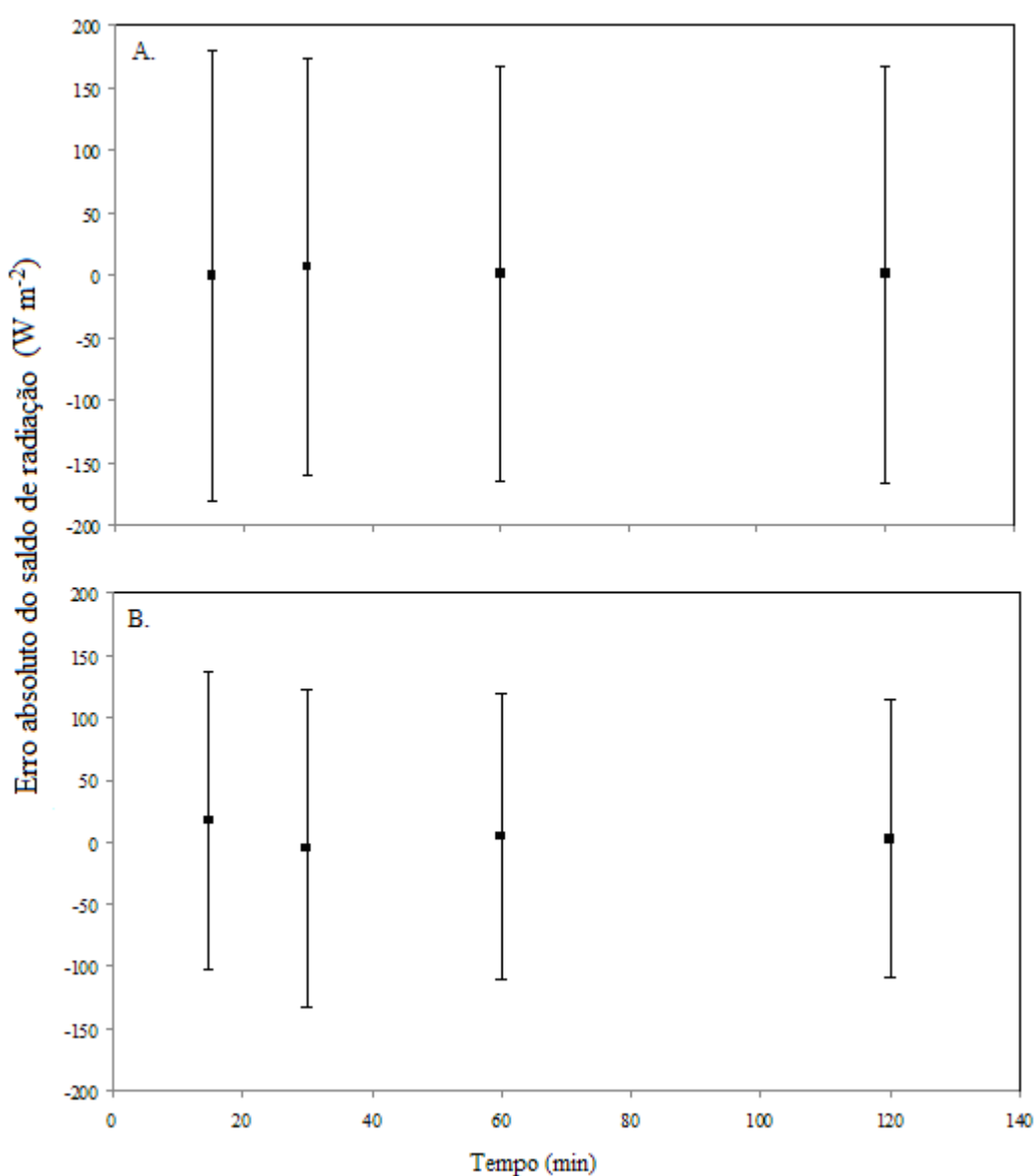


Figura 18. Distribuição dos erros absolutos do saldo de radiação para os dias 19 de março (A) e 1 de setembro de 2009 (B).

Outro fato relevante é que nesse dia, no intervalo de medição de 30 minutos, o valor da média dos erros é negativo e com alto desvio padrão ($-4,9 \pm 127,65 \text{ W m}^{-2}$). Já no período seco (Figura 18B), erro absoluto máximo para esse intervalo de medição apresentou valores médios e desvio padrão de $7,23 \pm 166,7 \text{ (W m}^{-2}\text{)}$, respectivamente. Por outro lado, o maior erro dentre todos os intervalos de medição aconteceu no intervalo de medição de 15 minutos com média e desvio padrão de $17,4 \pm 119,3 \text{ W m}^{-2}$ no dia 01 de setembro.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com base no experimento de campo realizado na fazenda Miriri no município de Capim, PB com a cultura da cana-de-açúcar permitem concluir o seguinte:

1. O saldo de radiação é a variável mais sensível no cálculo do balanço de energia, enquanto o fluxo de calor no solo oferece a menor contribuição. Os erros absolutos das variáveis envolvidas no cálculo do balanço de energia aumentam levemente em função do aumento do intervalo de medição;
2. Os erros relativos de todas as variáveis envolvidas do cálculo balanço de energia baseado na razão de Bowen aumentam significativamente com o aumento do intervalo de amostragem;
3. A variável mais sensível na determinação da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith é o saldo de radiação, seguida da umidade relativa, velocidade do vento a 2m de altura e a temperatura média do ar (bulbos seco e úmido).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angus, D.E.; Watts, P.J. Evapotranspiration: how good is the Bowen ratio method. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 8, p. 133-150. 1984.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. United Nations Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy, 300 pp.
- Azevedo, P. V.; Silva, B. B.; Silva, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchard in northeast Brazil. *Agricultural Water management*, v.58, n.1, p.241-254, 2003.
- Azevedo, P.V.; Sousa, C. B.; Silva, B. B.; Silva, V. P. R. Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment, Brazil. *Agricultural water management*. V.88, n.1, p.201-208, 2007.
- Bowen, I.S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, New York, v. 27, p. 779-787. 1926.
- Beven, K. A sensitivity analysis of the Penman–Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology*, v.44, p.169–190. 1979
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Anuário estatístico da agroenergia*. Brasília: Mapa/ACS, 160 p. 2009.
- Borges. C. J. R. Efeitos do calor armazenado no dossel e no solo no cálculo do balanço de energia em pomar de mangueiras irrigadas. Campina Grande: UACA/CTRN/UFCG, 2006. 69p. (Dissertação de Mestrado).
- Carter, C. E., Fouss, J. L., McDaniel, V. Water management increases sugarcane yields. *ASAE Pap.* 31 (2), 503–507, 1988.

- Cunha, G.R.; Bergamaschi, H.; Berlato, M.A. Balanço de energia em cultura de milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-14, 1996.
- Cunha, A. R. da.; Escobedo, J. F.; Kiosowski, E.S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia e, cultivo protegido de pimentão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília. V. 37, n.6 p.735-743. 2002.
- Chen, X.; Chen, X. Sensitivity analysis and determination of streambed leakage and aquifer hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, v. 384, p. 270-284. 2003.
- Coelho, C. H.; Francisco, J.G.; Nogueira, R.F.P.; Campos M.L.A.M. Dissolved organic carbon in rainwater from areas heavily impacted by sugar cane burning. *Atmospheric Environment* v.42, p.7115–7121, 2008.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. In: *Irrigation and Drainage*. Rome, FAO, p.144-198, Paper n.24, 1977.
- Doorenbos, J.; Kassam, A. H. Yield response to water. Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO. *Irrigation and Drainage Paper* n.33, p.193, 1979. Rome
- EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Fenologia da cana-de-açúcar. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_68_22122006154840.html. Acessado em: 22 Ago. 2009.
- EMBRAPA b - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Solos do Nordeste - levantamento exploratório de solos do município de Capim - PB, Embrapa Solos, UEP, Recife, 2009. Disponível em: <http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index.php?link=pb>. Acesso em: 10 dez. 2009.
- Farias, C. H. A. Otimização do uso da água e do zinco na cana-de-açúcar em tabuleiro costeiro paraibano. Campina Grande, 2006. 142p. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
- Gong, L., Xu, C-yu., Chen, D., Halldin, S., C, Y.D. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 329, p.620-629.
- Kang, S.; Zhang. B.; 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 Journal*. V. 148, p.1629-1640. 2008.
- Heilman, J.L.; Brittin, C.L. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.4, n.1, p.261-273. 1989.

- Hupet, F., Vanclooster, M., 2001. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 243, 192–204.
- Hurst, C. A.; Thorburn, P. J., Lockington, D.; Bristow, K. L. Sugarcane water use from shallow water tables: implications for improving irrigation water use efficiency. *Agric. Water Manage.* 65 (1), 1–19, 2004.
- Hall, S. G.; Lamourex, J.; Tiersch, T. R. Sensitivity analysis of the pond heating and temperature regulation (PHATR) model. *Aquacultural engineering* v. 34, p. 117-130. 2006.
- IBGE (2007). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Produção Agrícola 2007: culturas perenes. Disponível na web site: www.ibge.gov.br. Acesso em 17/06/2009.
- 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.
- Lindsey, D., Farnsworth, R., 1997. Sources of solar radiation estimates and their effect on daily potential evaporation for use in stream flow modeling. *Journal of Hydrology* 201, 348±366
- Liebenthal, C.; Foken, T.; Huwe, B. Sensitivity analysis for two ground heat flux calculation approaches. *Agricultural and Forest Meteorology* V. 132, p. 253-22. 2005.
- Liqiao, L.; Bin, L.; Jiuyi, L.; Lijuan, L.; Li, Z. Sensitivity of the Penman-Monteith reference crop evapotranspiration in Tao'er river basin of northeastern China. *Chinese Geographical Science*. V. 18, n. 4, p.340-347. 2008.
- Yeh, H. D.; Huang, Y.C. The use of sensitivity analyses in on-line aquifer parameter estimation. *Journal of hidrology* V. 335, p. 406-418. 2006.
- Kustas, W.P.; Prueger, J.H.; Hatfield, J.L.; Ramalingam, H; Hipps, L.E. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.103, n.1, p.249-264. 2000.
- Kannan, N.; White, S. M.; Worrall, F.; Whelan, M.J. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modeling in SWAT-200. *Journal of hydrology* v. 332, p. 456-466. 2007.
- McCuen, R.H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation. *Water Resource Bulletin*. V.10, n.3, p.486–498. 1974.
- McCaughey, J.H. Energy balance storage terms in a nature mixed forest at Petawawa, Ontario-a case study. *Boundary Layer Meteorological*. v.31, n.1, p.89-101. 1985.

- Medina, J. L.; Camargo, E.; Reza, J.; López, R.; Roldán, J. Determination and analysis of regional evapotranspiration in southern Spain using remote sensing and GIS. *Physics and Chemistry of the Earth*. V. 23, n. 4, p.427-432. 1998.
- Meyer, S., Hubbard, K., Wilhite, D., 1989. Estimating potential evapotranspiration: the effect of random and systematic errors. *Agricultural and Forest Meteorology* 46, 285-296.
- Mastrorilli, M.; Katerji, N.; Rana, G.; Nouna, B.B. Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.90, n.1, p. 81-89, 1998.
- Mendonça, J. C.; Sousa, E. F.; Bernardo, S.; Dias, G. P.; Grippa, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande-PB, v.7, n.2, p.275-279, 2003.
- Muleta, M. K.; Nicklow, J. W.; Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. *Journal of Hydrology*, v.306, p. 127-145. 2004
- Nie, D.; Flitcroft, I.D.; Kanemasu, E.T. Performance of Bowen ratio system on a slope. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.59, n.1, p.165-181. 1992.
- Neto, D. J.; Figueredo, J. L. da C.; Farias, C. H. de A., Azevedo, M.; Azevedo, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.10, n.2, p.283-288, 2006
- Ometto, J. C. *Bioclimatologia Vegetal*. São Paulo: Ed Agronomica Ceres, 1981. cap.12, p.255. cap.13, p.319.
- Oliveira, L. F. C. de; Carvalho, D. F. de; Romão, P. A.; Cortês, F. C. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para algumas localidades no estado de Goiás e Distrito Federal. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiana, v.31, n.2, p.121-126, 2001.
- Oyarzun, R.; Arumí, J.; Salgado, L.; Mariño, M. Sensitivity analysis and field testing of the RISK-N model in central Valley of Chile. *Agricultural Water Management*, V. 87, p. 251-260. 2006.
- Rosenberg, N.J.; Blad, B.L.; Verma, S.B. *Microclimate. The biological environment*. 2^o Edition, Lincoln, Nebraska: John Wiley & Sons, 1983, 495p.

- Ritchie, J.T., Howell, T.A., Meyer, W.S., Wright, J.L., 1996. Sources of biased errors in evaluating evapotranspiration equations. Proceedings of the International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, San Antonio, USA, pp. 147±157.
- Rana, G., Katerji, N., 1998. A measurement based sensitivity analysis of the Penman–Monteith actual evapotranspiration model for crops of different height and in contrasting water status. Theoretical and Applied Climatology 60, 141–149.
- Radin, B.; Santos, A. O.; Bergamaschi, H.; Rosa, L. M. G.; Bergonci, J. I. Estimativa da evapotranspiração da cultura do milho pelo método Penman-Monteith modificado. Revista Brasileira Agrometeorologia, Santa Maria, v.8, n.2, p.185-191, 2000.
- Smith, M. Report on the expert consultation on produces for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO. Rome, p.54, 1991.
- Steduto, P.; Hsiao, T.C. Maize canopies under two soil water regimes IV. 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, n. 1, p. 215-228. 1998.
- Silva, V. P. R. Estimativa das necessidades hídricas da mangueira. Campina Grande:DCA/CCT/UFPB, 2000. 129p. (Tese de Doutorado).
- Silva, V. P. R.; Azevedo, P. V.; Silva, B. B.; Bassoi, L. H; Teixeira, A. H. C.; Soares, J. M.; Silva, J. A. M. Estimativa da evapotranspiração da mangueira com base no balanço hídrico do solo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 5, n.3, p.456-462, 2001.
- Sakuratani, T.; Watanabe, K.; Higuchi, H.; Nawata, E.; Yamamoto, T; Yamada, T.; Noichana, C.; Sributta, A. Chances 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.
- Segato, S. V.; Pinto, A. S.; Jendiroba, E.; Nóbrega, J. C. M. Atualização da produção de Cana-de-Açúcar, Piracicaba: CP2: 2006, 415p.
- Silva, V. P. R.; Azevedo, P. V.; Silva, B. B. Seasonal patterns of the energy balance components in a mango (*Mangifera indica* L.) orchard grown in northeast Brazil. Agricultural Journal, v.1, n.1, p.18-23, 2006.

- Silva, V. P. R.; Azevedo, P. V.; Silva, B. B. Surface energy fluxes and evapotranspiration of mango orchard grown in a semiarid environment. *Agronomy Journal*, v. 99, p.1391-1396, 2007.
- Silva, B. K. N.; Silva, V. P. R.; Sousa, I. F.; Azevedo, P. V. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência em áreas irrigadas no estado de Sergipe. *Trabalho de Graduação, Campina Grande*, p. 44, 2008.
- Silva, V. P. R.; Campos, J. H. B. C.; Azevedo, P. V. Water-use efficiency and evapotranspiration of mango orchard grown in northeastern region of Brazil. *Scientia Horticulturae*, v. 102, p. 467-472, 2009.
- Syperreck, V. L. G.; Klosowski, E. S.; Greco, M.; Furlanetto, C. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Pelotina, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum Agronomy, Maringá*, v. 30, s, p. 603-609, 2008.
- Thompson, E.S., 1976. Computation of solar radiation from sky cover. *Water Resources Research* 12, 859±865.
- Trambouze, W.; Bertuzzi, P.; Voltz, M. Comparison of methods for estimating actual vapotranspiration in a row-cropped vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam*, v. 91, p. 193-208, 1998.
- 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.
- Unland, H.E.; Houser, P.R.; Shuttleworth, W.J.; Yang, Z.L. Surface flux measurements and modelling at a semi-arid sonoran desert site. *Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam*, v. 82, p.119 –153, 1996.
- UNICA- União da Indústria de cana-de-açúcar, Dados e cotações-Estatísticas, São Paulo, 2009. Disponível em:<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica>. Acesso em: 13 Ago.2009.
- Xu, C. Y.; Halldin, S.; Gong, L.; Chen, D.; Chen, Y. D. Sensitivity of the Penman-Monteih reference avapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hidrology*, V. 329. p.620-629. 2006.
- White, I.; Melville, M. D.; Wilson, B. Understanding acid sulfate soils in canelands. In: *Proceedings of National Conference on Acid Sulfate Soils, Coolangatta, NSW, June 24–25. CSIRO, NSW Agriculture, Tweed Shire Council*, pp. 130–148, 1993.

Wei, Y.; Sado, K. Estimation of areal evapotranspiration using Landsat TM data alone. In: 5th Asian Conference on remote Sensing, 1994, Bangalore, India.

Wikipédia- A enciclopédia livre, Município de Capim-PB. Disponível em: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Capim_\(Para%C3%ADba](http://pt.wikipedia.org/wiki/Capim_(Para%C3%ADba). Acessado em: 15 Set. 2009.