



DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p411-417>

Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em condições de sequeiro

Vicente de P. R. da Silva¹, Silvia L. A. Garcêz¹, Bernardo B. da Silva²,
Monik F. de Albuquerque¹ & Rafaela S. R. Almeida³

¹ Unidade Acadêmica Ciências Atmosféricas/Centro de Tecnologia e Recursos Naturais/Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. E-mail: vicente@dca.ufcg.edu.br (Autor correspondente); silviagarcez@gmail.com; monik-albuquerque@hotmail.com

² Programas de Pós-graduação em Geografia e Recursos Hídricos/Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. E-mail: bbdasilva.ufpe@gmail.com

³ Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais/Centro de Tecnologia e Recursos Naturais/Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. E-mail: rafasilver@gmail.com

Palavras-chave:

balanço de energia
razão de Bowen
balanço hídrico do solo

RESUMO

O principal objetivo neste trabalho foi encontrar um método eficiente na determinação da evapotranspiração da cana-de-açúcar com pouca exigência de medições ambientais. Os experimentos de campo foram realizados na Fazenda Capim II (UNIAGRO), localizada no município de Capim, PB, no período de outubro de 2009 a agosto de 2010. Os dados para determinação da evapotranspiração da cultura foram obtidos na parcela de sequeiro e os dados para a determinação da evapotranspiração de referência foram obtidos na Plataforma de Coleta de Dados do INPE. Os resultados da pesquisa permitem concluir que o método de Priestley-Taylor apresentou valores muito próximos daqueles da evapotranspiração de referência em todo o ciclo da cultura; além disto, o método de Priestley-Taylor com o coeficiente ajustado foi o que apresentou o melhor desempenho na estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar quando comparado com as medições obtidas pelo método do balanço hídrico do solo; os resultados também indicam que o coeficiente α de Priestley-Taylor varia consideravelmente em função do estágio fenológico da cultura.

Key words:

energy balance
Bowen ratio
soil water balance

Methods for estimating the sugarcane evapotranspiration under rainfed conditions

ABSTRACT

The main objective of this study was to find an efficient method in determining the evapotranspiration of sugarcane with little requirement for environmental measurements. Field experiments were conducted in the Distillery Miriri S.A (UNIAGRO), located in the municipality of Capim, Paraíba state, Brazil, from October 2009 to August 2010. The data for determining evapotranspiration were obtained in the rainfed and the data to determine the reference evapotranspiration were obtained in PCD (Data Collection Platform), INPE. The survey results allow to conclude that the method of Priestley-Taylor showed values very close to those of the reference evapotranspiration throughout the crop cycle. Moreover, the method of Priestley-Taylor with the adjusted coefficient showed the best performance in the evapotranspiration of sugarcane when compared with measurements obtained by the method of soil water balance. The results also indicate that the coefficient α of Priestley-Taylor varies considerably depending on the growth stage of the crop.

INTRODUÇÃO

Os métodos comumente utilizados nas estimativas da evapotranspiração de culturas são os baseados no balanço hídrico no solo, nas correlações de vórtices turbulentos e o método do balanço de energia razão de Bowen. O método do balanço de energia se baseia nas análises das trocas de energia térmica radiativa, condutiva e convectiva por uma superfície. Este método apresenta estimativas satisfatórias desde que se tenham os devidos cuidados na instalação dos instrumentos para evitar a influência da advecção de calor entre as superfícies adjacentes e a área de estudo (Kang et al., 2008). A equação do método da razão de Bowen tem sido intensamente utilizada por diversos pesquisadores com a finalidade de resolver o balanço de energia sobre superfícies vegetadas e, assim, determinar a evapotranspiração, quando se dispõe da instrumentação necessária para as medições locais do saldo de radiação e dos gradientes verticais de temperatura e pressão de vapor do ar (Azevedo et al., 2003; Silva et al., 2007; Borges et al., 2008; Souza et al., 2008). O método de Priestley & Taylor também é utilizado na estimativa da evapotranspiração porém com menor exigência de variáveis ambientais e necessita de medidas em um único nível.

O método de Priestley & Taylor é comumente empregado na estimativa da evapotranspiração; para sua aplicação é imprescindível o coeficiente de Priestley-Taylor (α) que, em resumo, representa o controle evaporativo efetuado pela vegetação e é definido como $\alpha = E/E_{eq}$, em que E é a taxa de evaporação e E_{eq} é a taxa de evaporação em equilíbrio (Priestley & Taylor, 1972). Alguns métodos modificados estimam α em função de variáveis ambientais mas nenhum é considerado um método único e funcional para determinação de α , que deve ser determinado empiricamente.

O método de Priestley-Taylor despreza a influência do déficit de pressão de vapor na evapotranspiração de referência assumindo que ET_0 depende apenas da radiação solar e da temperatura do ar. A estimativa da evapotranspiração pelo método de Priestley-Taylor tem sido objeto de discussão devido aos diferentes tipos de cobertura vegetal. A vantagem do método do Priestley-Taylor é o uso de poucas variáveis para estimar a ET (saldo de radiação, fluxo de calor no solo e temperatura do ar) em relação a outros métodos. Por outro lado, o balanço hídrico no solo considera também os processos de perda de água do solo para a atmosfera; comumente, este método tem sido utilizado na estimativa da evapotranspiração de diversas culturas inclusive naquelas de grande porte (Azevedo et al., 2008; Campos et al., 2008; Souza et al., 2008; Silva et al., 2009; Sousa et al., 2010).

Na escolha de um método para determinação da evapotranspiração devem ser consideradas a praticidade e a precisão visto que, apesar dos métodos teóricos e micrometeorológicos serem baseados em princípios físicos eles também apresentam limitações, sobretudo quanto à precisão instrumental, o que pode restringir a sua utilização. Diversos pesquisadores propuseram modelos indiretos para a estimativa da ET_0 , com as diferentes concepções e número de variáveis envolvidas; entretanto, não existe nenhum método padrão para a estimativa da evapotranspiração de culturas, o

que torna importante sua avaliação precisa de acordo com as disponibilidades de dados e tipo de cultura.

Desta forma, o presente trabalho tem o objetivo de comparar os valores da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar obtidos com base em quatro diferentes métodos de estimativa com o intuito de definir um método eficiente e com pouca exigência de medições ambientais.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos de campo foram realizados na Destilaria Miriri S/A com a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). A variedade de cana-de-açúcar estudada foi a RB 92579, cultivada na região Nordeste do Brasil. A precipitação anual média (período 1940-2006) na região é superior a 1.500 mm, com seis meses secos; o clima é quente e úmido, com chuvas de outono a inverno (As' segundo Köppen), com período seco atenuado e bioclima classificado como Mediterrâneo ou Nordeste quente e a temperatura do ar média de 28 °C (Silva et al., 2006).

Os dados para determinação da evapotranspiração pelos diferentes métodos de estimativa foram obtidos na parcela cultivada com cana-de-açúcar em regime de sequeiro e os dados para a determinação da evapotranspiração de referência foram obtidos na PCD (Plataforma de Coleta de Dados) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), localizada na Destilaria Miriri, no estado da Paraíba.

A evapotranspiração de referência foi calculada pelo método de Penman-Monteith parametrizado no boletim FAO-56 considerando-se a resistência da cultura de 70 s m⁻¹, albedo de 23% e a altura da cultura hipotética fixada em 0,12m (Allen et al., 1998). Já a evapotranspiração da cana-de-açúcar foi obtida pelo método do balanço de energia - razão de Bowen, balanço hídrico no solo e pelo método de Priestley-Taylor, abaixo descritos. O método do balanço de energia é baseado no princípio de conservação de energia dado pela seguinte expressão (Silva et al., 2011):

$$R_n + LE + H + G + S_d + F = 0 \quad (1)$$

em que:

- R_n - saldo de radiação
- LE e H - fluxos verticais de calor latente e sensível, respectivamente
- G - fluxo de calor no solo
- S_d - energia armazenada no sistema solo-dossel vegetativo
- F - energia utilizada no processo fotossintético

Os termos S_d e F não serão considerados haja vista que eles representam menos de 1% de R_n (Azevedo et al., 2006). Portanto, a Eq. 1 torna-se:

$$LE = \frac{(R_n - G)}{(1 - \beta)} \quad (2)$$

em que β é a razão de Bowen, dada pela razão entre os gradientes verticais de temperatura do ar e pressão real de vapor. Todos os termos das Eqs. 2 e 3 são expressos em W m⁻².

No interior da parcela experimental foi montada uma torre micrometeorológica para a instalação dos seguintes instrumentos: dois anemômetros de caneca (modelo 03001, Young), nos níveis de 0,5 e 2,0 m acima da copa das plantas, para medição da velocidade vento; dois radiômetros (modelo CM3, marca Kipp & Zonen), a 1,95 m, para medições da radiação solar incidente e refletida 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 localizado a 0,5 acima do dossel da planta; dois psicrômetros aspirados à base de cobre-constantan devidamente calibrados para medição das temperaturas dos bulbos seco e úmido, situados a 0,5 e 2,0 m acima do dossel vegetativo e um sensor para medição da temperatura e umidade relativa do ar (modelo HMP45C, Campbell Scientific Inc.). O perfil vertical da temperatura do ar foi medido no interior do dossel da cultura, por meio de termopares de cobre-constantan instalados a 1,0; 2,0 e 3,0 m acima da superfície do solo. Todos os sensores foram conectados a um sistema automático de aquisição e armazenamento de dados (Data logger CR 10X, Campbell Scientific Inc.), com uma placa multiplexadora de canais, programado para efetuar leitura dos sensores a cada 5 s e determinar as médias a cada 15 min. Foram instalados, no solo, dois fluxímetros (modelo HFT3, marca Campbell Scientific, Inc.) para medir o fluxo de calor no solo (G), posicionados a 0,02 m de profundidade, no meio das linhas e entre plantas.

Obteve-se o fluxo de calor latente (LE), pelo método de Priestley-Taylor (1972), pela equação:

$$LE = \alpha \left(\frac{s}{s + \gamma} \right) (R_n - G) \quad (3)$$

em que:

- α - coeficiente do Priestley-Taylor (usualmente usado como 1,26)
- s - inclinação da curva da pressão do vapor de saturação "versus" temperatura
- γ - constante psicrométrica
- R_n - saldo de radiação medido pelos sensores micrometeorológicos
- G - fluxo de calor no solo medido pelos sensores micrometeorológicos

A vantagem do método de Priestley-Taylor é a necessidade de poucos dados (R_n , G e temperatura do ar) para se estimar LE (Priestley & Taylor, 1972). Por outro lado, a base teórica de α não é bem esclarecida de vez que pode variar substancialmente em função da rugosidade do dossel e da umidade da superfície do solo (Xu & Singh, 2000).

Os valores de LE expressos em densidades de fluxo ($W m^{-2}$) foram convertidos em $mm d^{-1}$ com vistas à comparação com os valores da ET pelos demais métodos analisados neste estudo. Assim, o coeficiente α de Priestley-Taylor foi estimado após rearranjo da Eq. 3 utilizando-se os valores da evapotranspiração pelos métodos do balanço de energia - razão de Bowen (BERB), balanço hídrico e do coeficiente de cultivo ($ET = K_c ET_0$). Os valores das variáveis meteorológicas medidas na torre micrometeorológica instalada no interior do canal

na destilaria Miriri, localizada no município de Capim, PB, também foram utilizados para se obter o fluxo de calor latente da cana-de-açúcar pelo método de Priestley-Taylor.

Os valores da evapotranspiração da cana-de-açúcar pelo método do coeficiente de cultivo foram obtidos pelo produto entre a evapotranspiração de referência e o coeficiente de cultivo (K_c) obtidos por Silva et al. (2013) para o mesmo site experimental. Esses valores do K_c constam na Tabela 1; assim, a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelo método do coeficiente de cultivo foi obtida por:

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (4)$$

Tabela 1. Faixa de variação do coeficiente da cultura (K_c) da cana-de-açúcar em função dos estádios de desenvolvimento da cultura*

| Estádio de desenvolvimento | Dias | K_c |
|----------------------------|------|-------|
| Inicial | 30 | 0,15 |
| Desenvolvimento | 90 | 0,79 |
| Médio | 150 | 0,96 |
| Final | 90 | 0,79 |

* Fonte: Silva et al. (2013)

Os valores da ET_c da cana-de-açúcar pelos métodos do coeficiente da cultura e Priestley-Taylor foram corridos pelo coeficiente de estresse hídrico (k_s) para condições não padrões de cultivo, seguindo os procedimentos apresentados no Boletim 56 da FAO (Allen et al., 1998).

A evapotranspiração da cana-de-açúcar (ET_c) também foi determinada pelo método do balanço hídrico no solo, expresso por (Campos et al., 2008):

$$ET_c = P + I + A - D \pm \Delta W \pm R \quad (5)$$

em que:

- P - precipitação pluviométrica
- I - lâmina de irrigação
- A - ascensão capilar
- D - drenagem profunda
- ΔW - variação da lâmina de água disponível no solo
- R - escoamento superficial

Todos os componentes da Eq. 5 são expressos em $mm d^{-1}$. O escoamento superficial foi considerado nulo visto que a topografia do terreno era plana, P foi monitorada com um pluviômetro instalado na área experimental e ΔW determinado com base no perfil de umidade do solo. Como o lençol freático na área de estudo é superior a 1 m de profundidade, o termo ascensão capilar foi considerado nulo e também, como não foram instalados tensiômetros para monitorar a tensão de água no solo, a drenagem foi obtida de acordo com os procedimentos apresentados em Silva et al. (2013).

O volume de controle considerado para elaboração do balanço hídrico corresponde à camada de solo compreendida entre a superfície e a profundidade efetiva do sistema radicular. A partir da trincheira aberta no interior da parcela foi determinada a profundidade média do sistema radicular da cultura, que foi de 0,6 m. A umidade do solo foi monitorada utilizando-se sondas TDR (Frequency Domain Reflectometry),

modelo PR2/6, Delta-T (Devices Ltd., Burwell, Cambridge, UK), com três tubos de acesso, instalados a 0,20 m de cada ponto de observação, nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60, 70, 80, 90 e 100 cm. As medições da umidade do solo foram realizadas a cada 2-3 dias durante o ciclo da cultura.

Os dados diários da evapotranspiração da cana-de-açúcar obtidos com base no balanço hídrico no solo (dados observados) foram comparados com aqueles obtidos com base no método da razão de Bowen e de Priestley-Taylor utilizando-se o coeficiente de determinação, erro médio dos desvios (EMD) e a raiz quadrada do quadrado médio do erro normalizado (RQMDN), conforme utilizados por Silva et al. (2010):

$$EMD = \sum_{i=1}^n \left(\frac{ET_{est} - ET_{obs}}{n} \right) \quad (6)$$

$$RQMDN = \frac{\left[\sum_{i=1}^n \frac{(ET_{est} - ET_{obs})^2}{n} \right]^{1/2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ET_{obs}} \quad (7)$$

em que:

ET_{est} - evapotranspiração da cana-de-açúcar estimada como base nos métodos do balanço de energia, pelo método de Priestley-Taylor e coeficiente de cultivo

ET_{obs} - evapotranspiração da cultura obtida com base no método do balanço hídrico no solo

n - número de dados da série temporal

Os valores de RQMDN (%) são sempre positivos e próximos de zero no caso do ajuste ideal. Quanto menor o valor absoluto de EMD, melhor a estimativa; no entanto, valores positivos indicam a quantidade média de superestimativa dos modelos e negativos, ou seja, o contrário.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O maior valor da ET da cana-de-açúcar foi obtido pelo método do balanço hídrico do solo (ET_{BH}), com valor máximo de 282,6 mm durante dezembro de 2009 e mínimo de 26,5 mm em outubro do mesmo ano (Tabela 2). Os métodos do balanço de energia (ET_{BE}), Priestley & Taylor (ET_{PT}) e aquele derivado do coeficiente de cultivo (ET_{Kc}) também apresentaram os maiores valores no mês de dezembro e mínimos em outubro de 2009 devido à alta demanda atmosférica da região nessa época do ano; por outro lado, a menor média do período da evapotranspiração foi obtida pelo método de Priestley-Taylor, representando 77,2% dos valores obtidos pelo método do balanço hídrico do solo (BH) enquanto que os métodos ET_{BE} e ET_{Kc} representaram, respectivamente, 85,5 e 97,2% da ET_{BH} .

Os quatro métodos de estimativa da evapotranspiração apresentaram valores mínimos no início e no final do ciclo da cultura e máximos no meio do ciclo justamente no período de maior demanda evapotranspiratória na região (Tabela 4). Esta figura indicou que os valores da evapotranspiração obtidos pelos métodos ET_{BE} , ET_{PT} , ET_{Kc} e ET_{BH} ainda são

Tabela 2. Evapotranspiração mensal da cana-de-açúcar (mm/mês) pelos métodos do balanço de energia (ET_{BE}), Priestley & Taylor (ET_{PT}), método do coeficiente de cultivo (ET_{Kc}) e pelo método do balanço hídrico no solo (ET_{BH})

| Mês/Ano | ET_{BE} | ET_{PT} | ET_{Kc} | ET_{BH} |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Out/2009 | 31,8 | 31,8 | 37,0 | 26,5 |
| Nov/2009 | 110,9 | 95,6 | 117,2 | 64,9 |
| Dez/2009 | 274,5 | 195,8 | 250,1 | 282,6 |
| Jan/2010 | 124,2 | 95,6 | 117,2 | 135,7 |
| Fev/2010 | 114,3 | 103,1 | 142,6 | 133,3 |
| Mar/2010 | 147,1 | 136,7 | 162,8 | 166,7 |
| Abr/2010 | 157,0 | 151,0 | 184,5 | 181,6 |
| Mai/2010 | 133,4 | 131,1 | 204,9 | 186,6 |
| Jun/2010 | 122,3 | 121,4 | 161,0 | 172,4 |
| Jul/2010 | 102,9 | 100,4 | 103,4 | 144,3 |
| Ago/2010 | 81,9 | 72,8 | 74,3 | 105,4 |
| Total | 1400,3 | 1235,3 | 1555 | 1600 |
| Média | 127,3 | 112,3 | 141,4 | 145,5 |

inferiores aos valores da ET_o na maior parte do ciclo da cultura principalmente no período de 1 a 27 do dia após o corte (DAC). Em alguns dias do ciclo da cultura observou-se que os valores de ET_{Kc} e ET_{BH} apresentam valores superiores aos de ET_o , enquanto os valores de ET_{BE} e ET_{PT} continuaram inferiores aos valores da ET_o . A diferença entre os valores de ET_o e ET_c pelos métodos utilizados no estudo é decorrente da variação das características de crescimento e de desenvolvimento da cana-de-açúcar ao longo do ciclo da cultura e pela disponibilidade de água no solo nos períodos avaliados.

A evapotranspiração média diária da cana-de-açúcar variou do valor mínimo de 3,7 mm d⁻¹ pelo método ET_{PT} ao máximo de 4,8 mm d⁻¹ pelo método ET_{BH} . Silva et al. (2012) encontraram consumo hídrico da cana-de-açúcar cultivada no semiárido do Nordeste do Brasil, na região do Vale do Rio São Francisco, de 1710 mm, bastante superior àquele encontrado neste estudo para a região dos tabuleiros costeiros do estado da Paraíba que, dependendo do método de estimativa, variou de 1235,3 a 1600 mm. Esses autores encontraram valores médios diários da evapotranspiração da cana-de-açúcar de 4,7 mm d⁻¹; portanto, muito próximos daqueles encontrados neste estudo também se utilizando o método da razão de Bowen.

Neste estudo o coeficiente de Priestley & Taylor (α) foi calculado pelo método do balanço de energia $\alpha(BE)$,

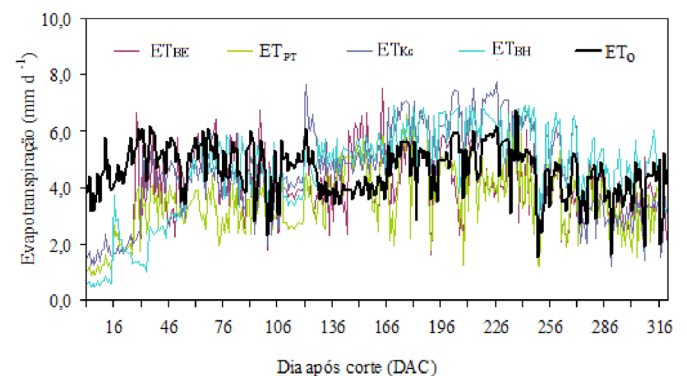


Figura 1. Comportamento temporal dos valores diários de ET_o estimados pelos métodos de Penman-Monteith FAO (ET_o), balanço de energia ET_{BE} , Priestley-Taylor ET_{PT} , coeficiente de cultura ET_{Kc} e balanço hídrico no solo ET_{BH} em Capim, PB

coeficiente de cultivo $\alpha(Kc)$ e balanço hídrico do solo $\alpha(BH)$ e apresentadas suas tendências em função do dia após o corte (DAC) como apresentado na Figura 2. Observa-se pouca dispersão dos coeficientes α no decorrer do período de estudo sendo, contudo, o coeficiente determinado pelo método do K_c o que apresentou maior dispersão (Figura 2B); por outro lado, todos os coeficientes apresentaram comportamento semelhante durante o período em estudo, com mínimos no início e no final do período e máximo na metade do ciclo da cultura. A comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do balanço de energia e de Priestley-Taylor com coeficiente determinado com base no balanço de energia $ET(PT)_{BE}$, coeficiente de cultivo e o de Priestley-Taylor com o coeficiente determinado com base no coeficiente de cultivo $ET(PT)_{Kc}$ e balanço hídrico e de Priestley-Taylor com o coeficiente determinado com base no balanço hídrico no solo $ET(PT)_{BH}$ é apresentada na Figura 3.

A comparação entre os valores da evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do balanço hídrico ET_{BH} e de Priestley-Taylor com coeficiente α determinado com base no coeficiente de cultivo apresentou a melhor relação entre as variáveis, ou seja $r^2 = 0,98$ (Figura 3B); já a correlação entre ET_{BH} e $ET(PT)_{BH}$ resultou no coeficiente de determinação de 0,91 que também, como nos casos anteriores, é estatisticamente significativo a nível de 5% pelo teste de t-Student (Figura 3C).

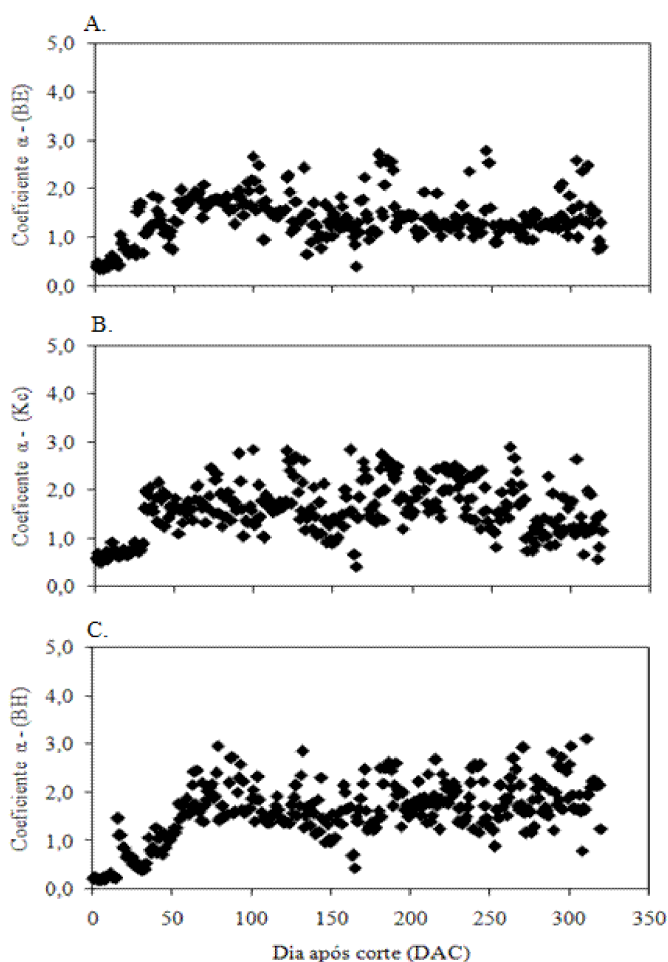


Figura 2. Tendência temporal do coeficiente de Priestley & Taylor pelos métodos do balanço de energia [$\alpha(BE)$ -A], coeficiente de cultivo [$\alpha(Kc)$ -B] e balanço hídrico no solo [$\alpha(BH)$ -C]

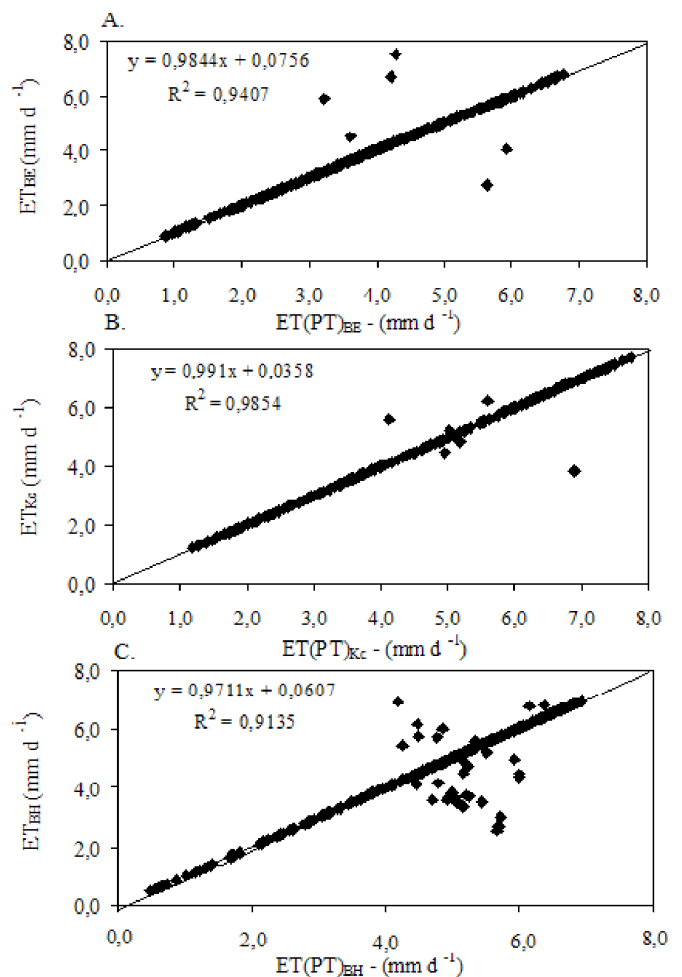


Figura 3. Comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do (A) balanço de energia e de Priestley-Taylor com coeficiente determinado com base no balanço de energia $ET(PT)_{BE}$, (B) coeficiente de cultivo e o de Priestley-Taylor com o coeficiente determinado com base no coeficiente de cultivo $ET(PT)_{Kc}$ e (C) balanço hídrico e de Priestley-Taylor com o coeficiente definido com base no balanço hídrico no solo $ET(PT)_{BH}$

A relação 1:1 indica que os valores de $ET(PT)_{BH}$ superestimam os valores da evapotranspiração pelo método ET_{BH} resultados que indicam que o método de Priestley-Taylor com coeficiente α bem ajustado à cultura pode oferecer estimativas confiáveis da evapotranspiração.

Moura et al. (2010) também constataram, avaliando a precisão e a exatidão de métodos de estimativa de valores horários de evapotranspiração para alface cultivada em sistema hidropônico sob ambiente protegido, que o método de Penman-Monteith possibilita estimativas adequadas da ET_c , tanto no período da manhã como no da tarde.

Todos os métodos apresentaram os menores valores do coeficiente alfa de Priestley-Taylor no estágio inicial; já os maiores valores se apresentaram no estágio médio da cultura nos métodos do balanço de energia e do coeficiente de cultivo, sendo este último o que apresentou o maior valor (Tabela 3); por sua vez, o método do balanço hídrico do solo mostrou o maior valor no estágio final, ao contrário dos métodos do balanço de energia e do coeficiente de cultivo que apresentaram máximos no estágio médio.

Tabela 3. Estimativa do coeficiente de Priestley-Taylor pelos métodos do balanço de energia (α_{BE}), coeficiente de cultivo (α_{Kc}) e balanço do solo (α_{BH})

| Estádios | α_{BE} | α_{Kc} | α_{BH} |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| Inicial | 0,7 | 0,7 | 0,5 |
| Desenvolvimento | 1,7 | 1,7 | 1,5 |
| Médio | 2,1 | 2,4 | 1,8 |
| Final | 1,5 | 1,5 | 2,1 |
| Média | 1,5 | 1,6 | 1,5 |

Efetivamente, os valores médios dos coeficientes de Priestley-Taylor para a cana-de-açúcar variaram pouco em termos do método de estimativa (1,5-1,6); entretanto, α varia consideravelmente ao longo dos estádios fenológicos da cultura, de 0,5 a 2,1 no caso de α obtido pelo BH. Em estudo realizado para a floresta amazônica Viswanadham et al. (1991) observaram uma variação diurna pronunciada em α , com valores mínimos em torno do meio-dia e os valores máximos de manhã e à noite. Os conjuntos de dados diários de três expedições deram uma média para a floresta de $\alpha = 1,03 \pm 0,13$; portanto, bastante inferior aos valores médios de α para a cana-de-açúcar. Por outro lado, Sanches et al. (2010) observaram que α variou durante o ano com valores máximos e mínimos nas estações seca e úmida, respectivamente, com média anual de $0,65 \pm 0,18$ para floresta monodominante no Pantanal, Brasil. Esses valores de α ainda são menores do que aqueles obtidos neste estudo, bem como para a floresta amazônica, porém a variabilidade anual é semelhante àquela encontrada para as condições de cultivo da cana-de-açúcar.

De acordo com a análise estatística observou-se que tanto o método do balanço de energia quanto o de Priestley-Taylor apresentaram valores de erro médio dos desvios (EMD) negativos, sendo Priestley-Taylor o de menor valor (0,8) (Tabela 4). Os valores negativos indicam que esses métodos subestimam os valores da evapotranspiração pelo método do balanço hídrico; já o valor positivo mostra que o método do coeficiente de cultivo superestima tais valores; por outro lado, a raiz quadrada do quadrado médio do erro normalizado (RQMDN) indica que os três métodos apresentaram valores positivos e próximos de zero, entre 0,04 e 0,1 e, portanto, com ajuste muito bom.

Tabela 4. Valores do erro médio dos desvios (EMD) e raiz quadrada do quadrado médio do erro normalizado (RQMDN) dos métodos de estimativa da evapotranspiração com balanço de energia ET_{BE} , Priestley-Taylor ET_{PT} e coeficiente de cultivo ET_{Kc}

| | ET_{BE} | ET_{PT} | ET_{Kc} |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| EMD | -0,4 | -0,8 | 0,16 |
| RQMDN | 0,1 | 0,2 | 0,04 |

CONCLUSÕES

1. O coeficiente de Priestley-Taylor pelo método do balanço de energia é o mais apropriado para determinação da evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar nas condições de cultivo dos tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba.

2. O método de Priestley-Taylor com o coeficiente ajustado para a região foi o que apresentou o melhor desempenho na estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar quando

comparado com as medições obtidas pelo método do balanço hídrico do solo.

3. O coeficiente α de Priestley-Taylor varia consideravelmente em função do estágio fenológico da cultura sendo significativamente maior do que aqueles adotados por Priestley-Taylor.

LITERATURA CITADA

- Allen, G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration. Rome: FAO, 1998. 297p. Irrigation and Drainage Paper, 56
- Azevedo, P. V. de; Silva, B. B. da; Silva, V. de P. R. da. Water requirements of irrigated mango orchards in Northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, v.58, p.241-254, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00083-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00083-5)
- Azevedo, P. V. de; Soares, J. M.; Silva, V. de P. R. da; Silva, B. B. da; Nascimento, T. Evapotranspiration of "Superior" grapevines under intermittent irrigation. *Agricultural Water Management*, v.95, p.301-308, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2007.10.011>
- Azevedo, P. V. de; Souza, I. F.; Silva, B. B. da; Silva, V. de P. R. da. Water-use efficiency of dwarf-green coconut (*Cocos nucifera* L.) orchards in northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, v.84, p.259-264, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.001>
- Borges, C. J. R.; Silva, V. de P. R. da; Campos, J. H. B. C.; Azevedo, P. V. de; Moura, M. S. B.; Soares, J. M.; Silva, B. B. da. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.393-399, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662008000400010>
- Campos, J. H. B. C.; Silva, V. de P. R. da; Azevedo, P. V. de; Borges, C. J. R.; Soares, J. M.; Moura, M. S. B.; Silva, B. B. da. Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.150-156, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662008000200007>
- 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.
- Moura, C. R. W.; Zolnier, S.; Ribeiro, A.; Oliveira, R. A. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração horária para alface cultivada em sistema hidropônico em ambiente protegido. *Engenharia Agrícola*, v.30, p.646-656, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162010000400009>
- Priestley, C. H. B.; Taylor, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, v.100, p.81-92, 1972. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2)
- Sanches, L.; Alves, M. C.; Campelo Júnior, J. H.; Nogueira, J. S.; Dalmagro, H. J. Estimativa do coeficiente priestley-taylor em floresta monodominante cambarazal no pantanal. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, p.448-454, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862010000400004>
- Silva, A. B.; Dantas Neto, J.; Farias, C. H. de A.; Azevedo, C. A. V. de. Rendimento e qualidade da cana-de-açúcar irrigada sob adubações de nitrogênio e potássio em cobertura. *Revista Caatinga*. v.22, p.236-241, 2009.

- Silva, B. K. N.; Silva, V. de P. R. da; Azevedo, P. V. de; Farias, C. H. de A. Análise de sensibilidade dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e razão de Bowen em cultura da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental*, v.15, p.1046-1053, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011001000008>
- Silva, T. G. F.; Moura, M. S. B.; Zolnier, S.; Soares, J. M.; Vieira, V. J. S.; Fernandes Júnior, W. G. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.64-71, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000100009>
- Silva, V. de P. R. da; Azevedo, P. V. de; Silva, B. B. da. Surface energy fluxes and evapotranspiration of a mango orchard grown in a semiarid environment. *Agronomy Journal*, v.99, p.1391-1396, 2007. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2006.0232>
- Silva, V. de P. R. da; Campos, J. H. B. C.; Azevedo, P. V. de. Water-use efficiency and evapo-transpiration of mango orchard grown in northeastern region of Brazil. *Scientia Horticulturae*, v.120, p.467-472, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2008.12.005>
- Silva, V. de P. R. da; Silva, B. B. da; Albuquerque, W. G.; Borges, C. J. R.; Sousa, I. F.; Dantas Neto. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. *Agricultural Water Management*, v.128, p.102-109, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.06.007>
- Silva, V. P. R. da; Silva, R. A.; Cavalcanti, E. P.; Braga, C. C.; Azevedo, P. V.; Singh, V. P.; Pereira, E. R. R. Trends in solar radiation in NCEP/NCAR database and measurements in northeastern Brazil. *Solar Energy*, v.84, p.1852-1862, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.07.011>
- Silva, V. de P. R. da; Sousa, F. S. S.; Cavalcanti, E. P.; Souza, E. P.; Silva, B. B. da. Teleconnections between sea-surface temperature anomalies and air temperature in northeast Brazil. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.68, p.781-792, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2005.12.002>
- Sousa, I. F.; Silva, V. P. R.; Sabino, F. G. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do Estado de Sergipe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.14, p.633-644, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000600010>
- Souza, C. B.; Silva, B. B. da; Azevedo, P. V. de; Silva, V. de P. R. da. Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.400-407, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662008000400011>
- Viswanadham, Y.; Silva Filho, V.P.; André, R.G.B. The Priestley-Taylor parameter a for the Amazon forest. *Forest Ecology Management Journal*, v.38, p.211-225, 1991. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90143-J](http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127(91)90143-J)
- Xu, C. Y.; Singh, V. P. Evolution and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrology Processes*, v.14, p.339-349, 2000. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(20000215\)14:2%3C339::AID-HYP928%3E3.0.CO;2-O](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(20000215)14:2%3C339::AID-HYP928%3E3.0.CO;2-O)