



XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros



Erros associados à aplicação do método da razão de Bowen na determinação da evapotranspiração da cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros do Estado da Paraíba

Pedro Vieira Azevedo¹; Luciano Marcelo Falle Saboya²

¹Agrônomo, Prof. Titular, UACA/CTRN/UFCG, Campina Grande-PB, Fone : (83) 2101-1199, pvieira@dca.ufcg.edu.br

²Agrônomo, Prof. Adjunto (UAEA/CTRN/UFCG), Campina Grande-PB

RESUMO: A produtividade da cana-de-açúcar pode ser aumentada quando da utilização racional da irrigação suplementar que poderá ser mais facilmente determinada quando se conhecem os valores da evapotranspiração de referência (E_{To} , mm d^{-1}) e do coeficiente de cultivo (K_c) ao longo do ciclo da cultura, utilizados na determinação da evapotranspiração da cultura (E_{Tc} , mm d^{-1}), correspondente à lâmina de irrigação a ser aplicada. O método do balanço de energia baseado na razão de Bowen proporciona a determinação indireta da E_{Tc} . Entretanto, erros associados ao método da razão de Bowen aplicado ao cálculo dos fluxos de calor latente (LE) e sensível (H), devem ser considerados. Esta pesquisa utilizou dados de experimento de campo conduzido no período de novembro/2011 a setembro/2012, objetivando a determinação da magnitude dos erros na estimativa da evapotranspiração pelo método da razão de Bowen, ao longo do ciclo de produção da cana-de-açúcar em condições comerciais nos Tabuleiros Costeiros do estado da Paraíba. A análise de consistência dos dados do balanço de energia observou que, para todo o ciclo, em 60,6% dos casos os dados coletados permitiram a determinação dos fluxos de energia. Os erros que ocorreram foram divididos entre os Tipos: A, com 6,71%, e B com 30,60%.

PALAVRAS-CHAVE: balanço de energia, fluxos de calor latente e sensível, erros associados

Errors due to the application of Bowen ratio method for determining the sugarcane evapotranspiration in the Coastal Plains of the Paraíba State

ABSTRACT: The productivity of the sugarcane may be increased by the rational use of supplemental irrigation that can be more easily determined when the reference evapotranspiration (E_{To} , mm d^{-1}) and crop coefficient (K_c) throughout the crop cycle are known, corresponding to the water depth to be applied. The method of energy balance based on the Bowen ratio provides indirect determination of E_{Tc} . However, errors associated with the Bowen ratio method applied to the calculation of latent (LE) and sensitive (H) heat fluxes, should be considered. This research used data of field experiment conducted from November 2011 to September 2012 in sugarcane commercial cultivation area, aiming to determine the magnitude of the errors in estimating evapotranspiration by the Bowen ratio method, throughout the production cycle of sugarcane on commercial terms in the Coastal Plains of Paraíba state. The consistency analysis of the energy balance data noted that, for the entire cycle, in 60.6% of cases, the data collected allowed the determination of energy fluxes. The errors that occurred were divided into two types: A, with 6.71%, and B with 30.60%.

Keywords: energy balance, latent and sensible heat fluxes, associated errors.

INTRODUÇÃO

O balanço de energia baseado na razão de Bowen (β) é um método indireto, prático, bastante utilizado e aceito para a determinação da evapotranspiração das culturas (E_{Tc}), possibilitando a quantificação do

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

fluxo de calor latente (LE) ao longo do ciclo fenológico da cultura, seja em escala diária ou até mesmo horária, tornando-se ferramenta indispensável ao manejo racional da irrigação (Moura et al., 2007). Vários trabalhos com o uso desta metodologia têm sido realizados na cana-de-açúcar (Toledo Filho, 2001; Inman-Bamber&Mcglinchey, 2003; Watanabe et al., 2004; André et al., 2010; Borges et al, 2010; Silva et. al., 2011; Silva et. al., 2012).

Estimativas confiáveis do coeficiente de cultivo, ao longo da estação de cultivo, permitem que se conheçam as necessidades hídricas de determinada cultura, além de facilitar o estabelecimento da frequência e a quantificação da irrigação, sem que seja preciso a medição da umidade do solo carecendo tão somente, a determinação da evapotranspiração de referência. Entretanto, os erros associados ao método da razão de Bowen aplicado às estimativas da razão de Bowen (β) e, conseqüentemente, ao cálculo dos fluxos de calor latente (LE) e sensível (H), devem ser considerados (Perez et al., 1999; Silva et al., 2011).

A presente pesquisa objetivou a determinação da magnitude dos erros na estimativa da evapotranspiração pelo método da razão de Bowen, ao longo do ciclo de produção da cana-de-açúcar em condições comerciais nos Tabuleiros Costeiros do estado da Paraíba.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área experimental

O experimento de campo foi realizado no período de novembro/2011 a setembro/2012, na Usina Miriri, na Zona da Mata Norte do estado da Paraíba, localizado no município de Capim-PB (100,3 km²), em área de cultivo comercial de cana-de-açúcar, com coordenadas geográficas: 6°54'59,88" S; 35°09'17,86" O e altitude de 100 m acima do nível do mar.

Observações meteorológicas

Uma torre micrometeorológica na área experimental, com os seguintes sensores: um saldo radiômetro para medição do saldo de radiação (Sr); dois psicrômetros aspirados, para medir as temperaturas dos bulbos seco e úmido; dois anemômetros na mesma altura dos psicrômetros; dois fluxímetros a 0,02 m de profundidade, para medir o fluxo de calor no solo; dois piranômetros instalados a 0,5 m de altura do dossel da cultura, um com o sensor voltado para cima (Rg) e o outro para baixo (Rr). Todos os sensores foram acoplados a um sistema de aquisição eletrônica de dados (Datalogger), programados para efetuar leituras a cada segundo e armazenar valores médios a cada 20 minutos.

Fluxos sobre a superfície vegetada

O fluxo de calor latente foi determinado pelo método do balanço de energia baseado na razão de Bowen, com base na seguinte equação:

$$\lambda E = \frac{Sr-G}{1+\beta} \quad (1)$$

Desprezando-se os efeitos de advecção e as variações no calor armazenado no dossel vegetativo e assumindo a igualdade entre os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível (K_h) e latente (K_w) e $(\partial T/\partial z)/(\partial e/\partial z) \approx \Delta T/\Delta e$, a razão de Bowen(β) foi obtida como:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (2)$$

Combinando a equação (1) com a equação (2), o fluxo de calor latente foi obtido como:

$$\lambda E = \frac{Sr-G}{1+\beta} \quad (3)$$

O fluxo de calor sensível foi obtido por diferença entre o saldo de radiação, o calor latente e fluxo de calor no solo, pela equação:

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

Neste trabalho foi adotada a representação dos fluxos de energia entre o ar e a superfície vegetal, segundo Perez et al., 1999 (Figura 1).

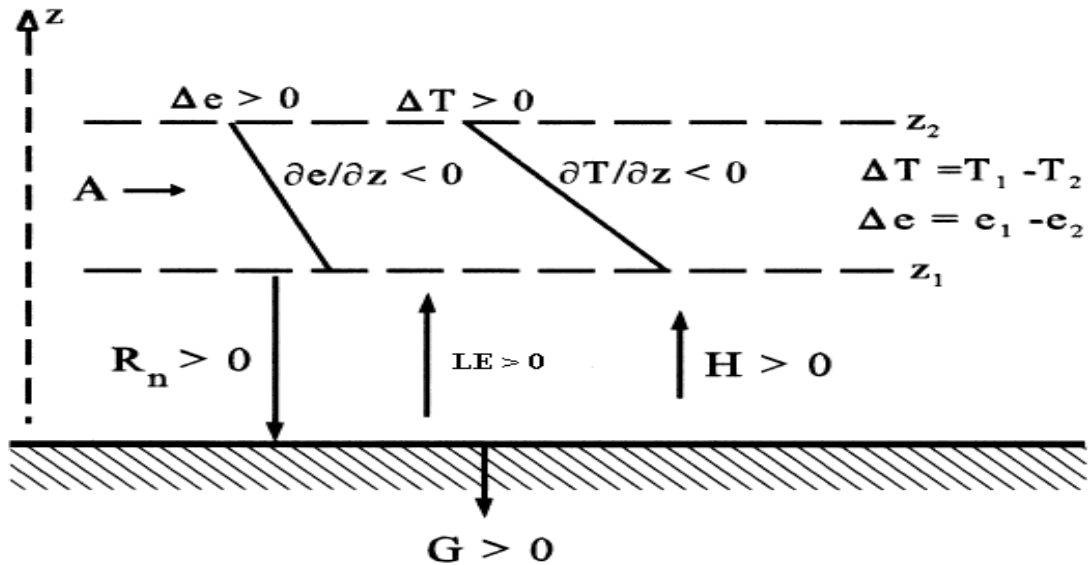


Figura 1 - Representação das convenções dos sinais adotados para determinação dos fluxos de energia entre o ar e a superfície vegetal, sugeridas por Perez et al.(1999).

Na Figura 1, **A** representa qualquer fluxo de energia advectiva que entre sobre a superfície, ΔT e Δe representam a variação de temperatura e pressão de vapor em dois níveis de medição, $\delta T/\delta z$ e $\delta e/\delta z$ representam os gradientes de temperatura e pressão de vapor entre os referidos níveis (Z_1 e Z_2). As variações médias horárias e totais diárias dos componentes do balanço de energia durante o período de coleta de dados, para o período diurno, foram determinadas para valores de $S_r \geq 20 \text{ W m}^{-2}$ (Payero et al., 2003).

Visando eliminar alguns erros associados ao método da razão de Bowen aplicado às estimativas dos valores de β e, conseqüentemente, ao cálculo dos fluxos LE e H , foram consideradas as situações que satisfazem a aplicação do método, de acordo com Perez et al. (1999) (Tabela 1), em conjunto com a classificação dos tipos de erros ocorridos levando o dado a ser considerado inconsistente (Tabela 2).

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

Tabela 1 - Condições para satisfazer o método da Razão de Bowen sob condições não advectivas, para que o dado possa ser considerado consistente, possibilitando determinação de LE e H.

Energia disponível	Gradiente de pressão de vapor	Razão de Bowen	Fluxo de calor
$Sr - G > 0$	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	$LE > 0$ e $H \leq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H > 0$ para $\beta > 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	$LE < 0$ e $H > 0$
$Sr - G < 0$	$\Delta e > 0$	$\beta < -1$	$LE > 0$ e $H < 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta > -1$	$LE < 0$ e $H \leq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H < 0$ para $\beta > 0$

Tabela 2 - Tipos de erro em que o método da Razão de Bowen é considerado inconsistente.

Tipo de erro	Condição
A	$Sr - G > 0, \Delta e > 0$ e $\beta < -1 + \varepsilon $
B	$Sr - G > 0, \Delta e < 0$ e $\beta > -1 - \varepsilon $
C	$Sr - G < 0, \Delta e > 0$ e $\beta > -1 - \varepsilon $
D	$Sr - G < 0, \Delta e < 0$ e $\beta < -1 - \varepsilon $
E	Mudança rápida de temperatura e pressão de vapor

O erro tipo (E), para leituras integralizadas de 20 minutos foi determinado por (Perez et al., 1999):

$$E = \frac{\delta\Delta e - \gamma\delta\Delta T}{\Delta e} \quad (5)$$

Assumindo $\delta\Delta e = 0,02$ kPa e $\delta\Delta T = 0,05$ °C.

Adicionalmente, considerou-se que valores de $\beta < -0,75$ resultariam em valores de LE e H fisicamente inconsistentes (Ortega-Farias et al., 1996).

A evapotranspiração da cultura pelo método do balanço de energia (ET_{CBERB}), expressa em unidades de lâmina de água em um intervalo de tempo ($mm\ d^{-1}$), foi obtida para o período do dia em que houver energia disponível for positivo: $Sr - G > 0$ (Bezerra, 2007; Bezerra et al., 2010):

$$ET_{CBERB} = \frac{\lambda E}{\lambda} P_p \quad (6)$$

Onde: P_p é o período do dia em que $Sr - G > 0$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fases fenológicas da cana-de-açúcar

Na presente pesquisa foi adotada a divisão do ciclo fenológico apresentado na Tabela 3 para a cana-de-açúcar cultivada em regiões tropicais (Allen et al., 1998). No estabelecimento de um canavial a brotação das soqueiras (Fase I) e o perfilhamento (Fase II) são essenciais na determinação da população de plantas na área (Tabela 3).

Tabela 3 - Fases fenológicas utilizadas para cana-de-açúcar cultivar RB92579 cultivada em Tabuleiro Costeiro do estado da Paraíba, 2011/2012

Fase Fenológica	Dias após o Corte (DAC)		
	Início	Término	Duração
I. Brotação e emergência dos colmos	0	30	30
II. Perfilhamento e estabelecimento da cultura	31	51	20
III. Crescimento dos colmos	52	232	180
IV. Maturação dos colmos	233	320	87
Ciclo total			317

Consistência dos dados

A análise de consistência dos dados do balanço de energia consta na Tabela 4. Verificou-se, para todo o ciclo que, em 60,6% dos casos os dados coletados permitiram a realização do balanço de radiação e energia. Comportamento similar foi observado por Silva et al. (2011b) com 62,7% dos dados considerados consistentes. Os erros que ocorreram foram divididos entre os Tipos: A, com 6,71%, e B com 30,60%. Os erros tipo B ocorrem quando $\Delta e < 0$, comportamento que deve ter ocorrido em razão da irrigação e da precipitação em combinação com a estrutura foliar da cana-de-açúcar, que proporciona concentração de vapor de água maior entre as folhas do que na atmosfera, mesmo quando $S_r - G > 0$. Os referidos autores observaram erros dos Tipos: A, em 0,2%; B, em 4,9%; C, em 32,2% e D, em 0,1% dos casos e destacaram que os erros tipo A estão relacionados à precipitação ou irrigação devido a valores de $H < 0$. Não foram constatados valores de β dentro da faixa de rejeição nem valores de β menores que -0,75. Perez et al. (1999) observaram que 30 a 44% dos dados apresentavam erros distribuídos nos diferentes tipos.

Tabela 4 - Resultados da análise de consistência física dos dados coletados para realização do cálculo do balanço de radiação e energia pela razão de Bowen, 2011/2012

Ano	Mês	PDC	Tipos de Erro (%)				$(-1- \varepsilon) < \beta < (-1+ \varepsilon)$	B < -0,75	Dados
			A	B	C	D			
2011	11	21,4	4,6	6,5				481	
	12	81,3	3,8	12,4				1147	
	1	65,1	8,0	27,9				1147	
	2	81,1	3,8	12,1				1073	
	3	63,6	8,1	28,5				1147	
	4	65,4	5,8	21,6				1110	
2012	5	63,5	6,5	21,8				1147	
	6	60,6	8,3	23,9				999	
	7	42,4	7,4	44,8				911	
	8	24,3	5,4	66,5				1144	
Média do ciclo		60,6	6,7	30,6				1031	

PDC= Percentual médio de dados consistentes

CONCLUSÕES

A análise dos dados obtidos em experimento de campo ao longo do ciclo de produção da cana-de-açúcar em condições comerciais dos Tabuleiros Costeiros do estado da Paraíba, no período novembro/2011 a setembro/2012, permite concluir que os dados analisados apresentaram consistência física superior a 60%, possibilitando a realização do balanço de energia pela razão de Bowen;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRÉ, R. G. B., MENDONÇA, J. C., PINHEIRO, F. M. A., MARQUES, V. da S.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 2: Balanço de energia e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.4, 535 - 542, 2010.



XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:



O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

BEZERRA, J. R. C. **Crescimento, desenvolvimento e rentabilidade do algodoeiro BRS 200 – marrom, irrigado**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2007.

BEZERRA, J. R. C., AZEVEDO, P. V., SILVA, B. B. da, DIAS, J. M. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do algodoeiro BR-200 marrom, irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.6, p. 625-632, 2010.

BORGES, C. J. R., SILVA, V. de P. R., FARIAS, C. H. de, AZEVEDO, P. V. de, ALBUQUERQUE, W. G. **Evapotranspiração da cana-de-açúcar em Tabuleiro costeiro paraibano usando a Razão de Bowen**: Estudo preliminar. XVI Congresso brasileiro de meteorologia, Belém-PA, 2010.

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

MOURA, M. S. B.; SOARES, J. M.; GURGEL, M. T.; SILVA, T. G. F. **Balço de energia na cana-de-açúcar irrigada no Submédio São Francisco**. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 27, 2007, Mossoró-RN. **Agricultura irrigada no semi-árido: anais. Mossoró: ABID: Governo do Estado do Rio Grande do Norte, 2007**.

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

PAYERO, J. O.; NEALE, C. M. U.; WRIGHT, J. L.; ALLEN, R. G. Guidelines for validating Bowen ration data. **Transactions of the ASAE**. Vol. 46(4): 1051–1060, 2003.

PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.97, n.3, p.141-50, 1999.

SILVA, B. K. N; SILVA, V.P.R; AZEVEDO, P.V; FARIAS, C. H. A. Análise de sensibilidade dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e razão de Bowen em cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.10, p.1046–1053, 2011.

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

TOLEDO FILHO, M. da R. **Estado micrometeorológico de um cultivo de cana-de-açúcar em Alagoas**, Tese (Doutorado em Fitotecnia – agrometeorologia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS. 2001.

WATANABE, K., YAMAMOTO, T., YAMADA, T., SAKURATANI, T., NAWATA, E., NOICHANA, C., SRIBUTTA, A. & HIGUCHI, H. Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand. **Agricultural Water Management**, v. 67, p.133-143, 2004.