



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Sazonalidade do Controle de Evapotranspiração pela Cana-de-Açúcar Irrigada e Características Aerodinâmicas da Cultura no Semiárido brasileiro

Thieres G. F. da Silva¹, Sérgio Zolnier², Magna S. B. de Moura³, Luciana S. B. de Souza⁴

¹ Engenheiro-Agrônomo, Professor, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco. (87) 3929-3001. thieres_freire@yahoo.com.br. ² Engenheiro-Agrícola, Professor, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Avenida Peter Henry Holfs s/n, CEP 36570-000, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. (31) 3899-1859. zolnier@ufv.br. ³ Engenheira-Agrônoma, Pesquisadora, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Semiárido, BR 428, Km 152, Zona Rural, CP 23, CEP 56310-000, Petrolina, PE. (87) 3866-3600. magna@cpatsa.embrapa.br. ⁴ Bióloga, Doutoranda em Meteorologia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Avenida Peter Henry Holfs s/n, CEP 36570-000, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. (31) 3899-1859. sanddrabastos@yahoo.com.br

Artigo recebido em 12/06/2013 e aceito em 27/06/2013

RESUMO

Objetivou-se analisar a variação sazonal do controle de evapotranspiração pela cana-de-açúcar irrigada, assim como as características aerodinâmicas da superfície da cultura sob condições climáticas do Semiárido brasileiro. O experimento foi conduzido em um talhão experimental situado no município de Juazeiro, Bahia, onde foram realizadas medições micrometeorológicas. A evapotranspiração da cultura foi quantificada por meio do método do balanço de energia, com base na razão de Bowen. Para analisar o controle da cana-de-açúcar ao processo de evapotranspiração foi utilizado o fator de desacoplamento (Ω). Para o ciclo, os valores de Ω foram, em média, iguais a 0,68, demonstrando um desacoplamento moderado a alto da superfície com a atmosfera, o que indica que a evapotranspiração da cana-de-açúcar irrigada no Semiárido brasileiro é mais fortemente controlada pela energia disponível, proveniente do saldo de radiação, do que pelo efeito do vento, temperatura e umidade do ar. Todavia, após o tombamento da cultura, percebeu-se uma queda de Ω , decorrente de um novo crescimento das plantas, que também foi responsável por modificações nas características aerodinâmicas da cultura. Este fato resultou, ao final do ciclo, em valores médios de 58 s m^{-1} para a resistência da superfície, de 0,43 m para o parâmetro de rugosidade e de $0,39 \text{ m s}^{-1}$ para a velocidade de fricção.

Palavras-chave: balanço de energia, fator de desacoplamento, fluxo de calor latente.

Seasonal Evapotranspiration Control by Irrigated Sugarcane and Crop Aerodynamic Characteristics in the Brazilian Semi-Arid

ABSTRACT

The objective was to analyze the seasonal variation of the evapotranspiration control by irrigated sugarcane, as well the crop surface aerodynamic characteristics under Brazilian semi-arid climatic conditions. The experiment was conducted in an experimental site in the city of Juazeiro, Bahia State, where micrometeorological measurements were carried out. The crop evapotranspiration was quantified by using the energy balance method, based on the Bowen ratio. In order to analyze the sugarcane control to the evapotranspiration process, the decoupling factor (Ω) was used. For the crop cycle, values of Ω were, on average, equal to 0.68, demonstrating a moderate to high decoupling between the crop surface and the atmosphere, which indicates that the evapotranspiration of irrigated sugarcane in the Brazilian Semi-arid is more strongly controlled by the available energy, provided by net radiation, as compared to the wind, temperature and air moisture. However, after the crop lodging, it was noticed reduction of the Ω parameter due to an additional plant growth, which was responsible for changes in the crop aerodynamic characteristics. This fact resulted at the end of the crop cycle in mean values of 58 s m^{-1} for surface resistance, 0.43 m for the roughness parameter and 0.39 m s^{-1} for the friction velocity.

* E-mail para correspondência:

thieres_freire@yahoo.com.br (Silva, T. G. F. da).

Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum* ssp.) vem sendo amplamente cultivada no Semiárido brasileiro. Nesta região, a cultura apresenta alta produção de biomassa, como resposta ao clima local e à utilização de tecnologias de irrigação no sistema de produção (Silva *et al.*, 2011). Por este motivo, informações sobre a evapotranspiração da cultura, bem como o seu controle sobre este processo, tornam-se de grande relevância.

A evapotranspiração (ET) é um dos principais componentes do processo de troca de energia entre a superfície e a atmosfera, tendo sido bastante estudada devido a sua influência no ciclo de água e de nutrientes dos ecossistemas agrícolas e na produtividade primária das culturas (Surkey & Verma, 2008). A magnitude dos seus valores varia com o crescimento das plantas e condições ambientais reinantes no local de cultivo (Steduto & Hsiao, 1998a). No manejo de água do sistema de produção, dados de ET permitem conhecer a demanda hídrica das culturas e, assim, pode-se aumentar a eficiência do uso de água pela seleção de cultivares mais adaptadas a um sistema agrícola específico (Inman-Bamber & Mcglinchey, 2003; Inman-Bamber & Smith, 2005).

Para quantificar o controle da superfície cultivada ao processo de evapotranspiração, uma possibilidade é utilizar um índice denominado “fator de desacoplamento” (Mcnaughton & Jarvis,

1983; Jarvis & Mcnaughton, 1986). Com base na equação de Penman-Monteith, este índice permite avaliar a contribuição relativa da energia disponível ou das características aerodinâmicas, determinadas pela interação da cultura com o vento e umidade do ar, na transferência de vapor d’água para a atmosfera (Kumagai *et al.*, 2004; Pereira, 2004).

Quando a ET depende apenas da energia disponível, ou seja, do termo energético da equação de Penman Monteith, a mesma é conhecida como evapotranspiração de equilíbrio, e neste caso a cultura é caracterizada como desacoplada da atmosfera, ou seja, a energia disponível é o fator preponderante no processo de evapotranspiração. Por outro lado, quando a ET depende apenas do déficit de pressão de vapor d’água e da resistência do dossel e do ar, ou seja, do termo aerodinâmico da equação de Penman Monteith, denomina-se evapotranspiração imposta, estando neste caso a cultura acoplada com atmosfera, de modo que o processo de evapotranspiração é governado pelo controle estomático das plantas.

A partir dos valores do “fator de desacoplamento”, é possível conhecer qual destes dois fatores, energético ou aerodinâmico, exerce maior efeito na evapotranspiração da cultura. Pereira (2004), calculando os valores de Ω para uma superfície gramada, nas condições de Davis-

USA e Piracicaba-SP, verificou que os seus valores variaram de 0,69 a 0,93, cuja média foi de 0,83. Steduto & Hsiao (1998b) observaram, em escala diária, antes do período de senescência da cultura, que os valores de Ω variaram entre 0,4 (acoplamento moderado) e 0,8 (baixo acoplamento), demonstrando o baixo controle da cultura no processo de evapotranspiração.

Assim, o objetivo deste trabalho é analisar variação sazonal do controle da cana-de-açúcar ao processo de evapotranspiração sob as condições climáticas do Vale do Submédio São Francisco.

Material e Métodos

Área experimental e práticas culturais

O experimento foi realizado no município de Juazeiro, Bahia, no Submédio do Vale do São Francisco, região semiárida do Nordeste brasileiro. A cana-de-açúcar, variedade RB92579, foi conduzida no ciclo de cana-soca em um solo do tipo vertissolo, sendo cultivada em fileiras espaçadas em 1,5 m durante os meses de junho/2007 e junho/2008. A adubação foi aplicada no início do ciclo de cana-soca, com base nas análises de solo e foliar, quando se utilizou 157,5 kg ha⁻¹ e 0,5 L ha⁻¹ de uréia e Ajipower, respectivamente. Para o controle de ervas daninhas foram aplicados 1 L ha⁻¹ dos herbicidas Aminol e Trop. A irrigação foi do tipo superficial por sulcos, utilizando um sistema de condução em tubos janelados, sendo realizada sempre que o conteúdo de

água no solo atingia 50% da capacidade de campo, conforme detalhada em Silva *et al.* (2012).

Medidas micrometeorológicas

As medições micrometeorológicas foram realizadas dentro do talhão experimental, onde foi instalada uma torre com oito metros de altura, que esteve situada a 350 m em relação à bordadura, na direção do vento predominante. Três psicrômetros ventilados com termopares de Cobre-Constantan (Tipo T) foram utilizados para medição da temperatura do bulbo seco e úmido acima da superfície vegetada. O primeiro foi acomodado a uma altura de $2z_{om}$ do topo do dossel da cultura (onde, z_{om} = parâmetro de rugosidade da superfície para o *momentum*), enquanto o segundo a uma distância de 1,5 m do primeiro psicrômetro. O segundo e o terceiro, também, foram posicionados a 1,5 m entre si. Um saldo radiômetro foi instalado na altura de $2z_{om} + 1,5 + h_c$ (h_c = altura do dossel da cultura). As distâncias entre os sensores e o dossel da cultura foram mantidas até o final do experimento, contudo os mesmos foram realocados para novas posições em relação ao dossel, à medida que a cultura foi crescendo. Além disso, foram instalados três fluxímetros a 0,02 m de profundidade no solo, situados entre fileiras e na fileira de cultivo. Para estimativa das características aerodinâmicas da cana-de-açúcar, quatro sensores de velocidade do vento, além de sensores de

temperatura e de umidade relativa do ar, foram instalados logaritmicamente em diferentes alturas (0,5, 1, 2 e 4 m) acima do dossel vegetativo. Finalmente, a precipitação foi monitorada por meio de um pluviômetro instalado no topo da torre. Todos os sensores foram conectados a um multiplexador (modelo AM16/32, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) e a um sistema de aquisição de dados (modelo CR10X, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) programado para realizar medidas a cada 60 s e armazenar médias em intervalos de 15 min.

Evapotranspiração da cultura

A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi determinada por meio do método do balanço de energia, com base na razão de Bowen, podendo ser integrada em escala diária por:

$$ET_c = \sum_{R_n - G > 0}^{i=1} \left(\frac{\left(\frac{R_n - G}{1 + \beta} \right) \times t \times f_{tempo}}{L} \right) \dots\dots\dots(1)$$

em que, em que, R_n = saldo de radiação (W m⁻²); G = fluxo de calor no solo (W m⁻²); β = razão de Bowen (adimensional); t = intervalo de armazenamento dos valores médio (15 minutos); f_{tempo} = fator de ajuste da escala de tempo (60 s); L = calor latente de evaporação (kJ kg⁻¹).

2.4 Fator de desacoplamento e características aerodinâmicas da cultura

Para analisar o controle da cana-de-açúcar ao processo de evapotranspiração, foi utilizado o fator de desacoplamento, estimado utilizando a seguinte equação:

$$\Omega = \left(1 + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} \frac{r_c}{r_a} \right)^{-1} \dots\dots\dots(2)$$

em que, em que, γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); Δ = declividade da curva de pressão de saturação de vapor d’água (kPa); e, r_a e r_c = resistências aerodinâmica e do dossel da cultura (s m⁻¹), respectivamente.

O parâmetro Ω varia entre zero e um, sendo que, no limite inferior, o vento e umidade do ar exercem maior controle sobre a transferência de vapor d’água para atmosfera, uma vez que a evapotranspiração ocorrerá apenas se houver alto déficit de pressão de vapor e baixa resistência aerodinâmica; neste caso, diz-se que a superfície vegetada está acoplada com a atmosfera. No caso superior, quando Ω é igual a um, o fluxo de vapor d’água é inibido devido à saturação do ar e, com isso, a maior contribuição ao processo de evapotranspiração se deve à entrada de energia na forma de radiação; neste caso, diz-se que a superfície está desacoplada com a atmosfera (Mcnaughton & Jarvis, 1983; Jones, 1992; Goldberg & Bernhofer, 2008).

Os valores de r_c foram calculados por meio da inversão da equação de Penman-Monteith, como apresentado a seguir:

$$r_c = r_a \left(\frac{\Delta H}{\gamma LE} - 1 \right) + \left(\frac{\rho_a c_p (e_s - e_a)}{\gamma LE} \right) \dots\dots\dots (3)$$

A r_a foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$r_a = \frac{\ln \left(\frac{z-d}{z_{oh}} \right) - \psi_h}{k u_*} \dots\dots\dots (4)$$

em que, z = altura de medição acima do dossel da cultura (m), d = deslocamento do plano zero (m), z_{oh} = parâmetro de rugosidade que governa a transferência de calor e vapor d'água entre a superfície e a atmosfera; k = constante de Von Karman (0,41); u_* = velocidade de fricção ($m s^{-1}$); ψ_h = fator de correção da estabilidade atmosférica para o calor sensível (adimensional).

Para o cálculo de u_* , foi utilizada a relação fluxo-gradiente com dois níveis de velocidade do vento acima do dossel da cultura, a partir da Equação 5:

$$u_* = \frac{k (u_2 - u_1)}{\ln \left(\frac{z_2 - d}{z_1 - d} \right) - \psi_m \left(\frac{z_2 - d}{L_{M-O}} \right) + \psi_m \left(\frac{z_1 - d}{L_{M-O}} \right)} \dots\dots\dots (5)$$

em que, u_2 e u_1 são os valores de velocidade do vento obtidos nos níveis z_2 e z_1 , respectivamente; e ψ_m = fator de correção da estabilidade atmosférica para o *momentum* (adimensional).

O deslocamento do plano zero (d) foi calculado inicialmente considerando o perfil logarítmico do vento. Os dados de “ d ” foram estimados utilizando os valores de velocidade do vento restritos a condições próximas da neutralidade, para satisfazer o comportamento logarítmico do perfil de velocidade do vento (Toledo Filho *et al.*, 2003). Assim, a partir de um método iterativo da relação linear entre $\ln(z-d)$ e “ u ”, os valores de “ d ” foram obtidos até que o coeficiente de determinação fosse o maior possível (Steduto & Hsiao, 1998a; Lyra & Pereira, 2007).

2.5 Crescimento da cana-de-açúcar

O crescimento da cultura foi representado ao longo do tempo pelo índice de área foliar, que foi monitorado por meio de um integrador de área foliar (LAI 2000, LICOR Inc., Lincoln, NE). Nesta análise, foram selecionadas parcelas dentro das subáreas de amostragem com dimensões de 30 x 30 m.

Resultados e Discussão

Os valores médios diários das variáveis meteorológicas (temperatura do ar, T_{ar} ; umidade relativa do ar, UR_{ar} ; radiação solar global, R_g ; e déficit de pressão de vapor d'água, DPV) e dos eventos de precipitação (P) e de irrigação (I), ao longo do ciclo da cultura, são demonstrados na Figura 1. Nota-se que, entre os meses de setembro e março, ocorrem os maiores valores de temperatura (Figura 1A), em resposta a maior incidência de radiação solar global (Figura 1B). Por sua

vez, os valores de umidade relativa do ar foram reduzidos na maior parte do período (Figura 1C), com momentos de elevação em

decorrência dos eventos de precipitação (Figura 1D).

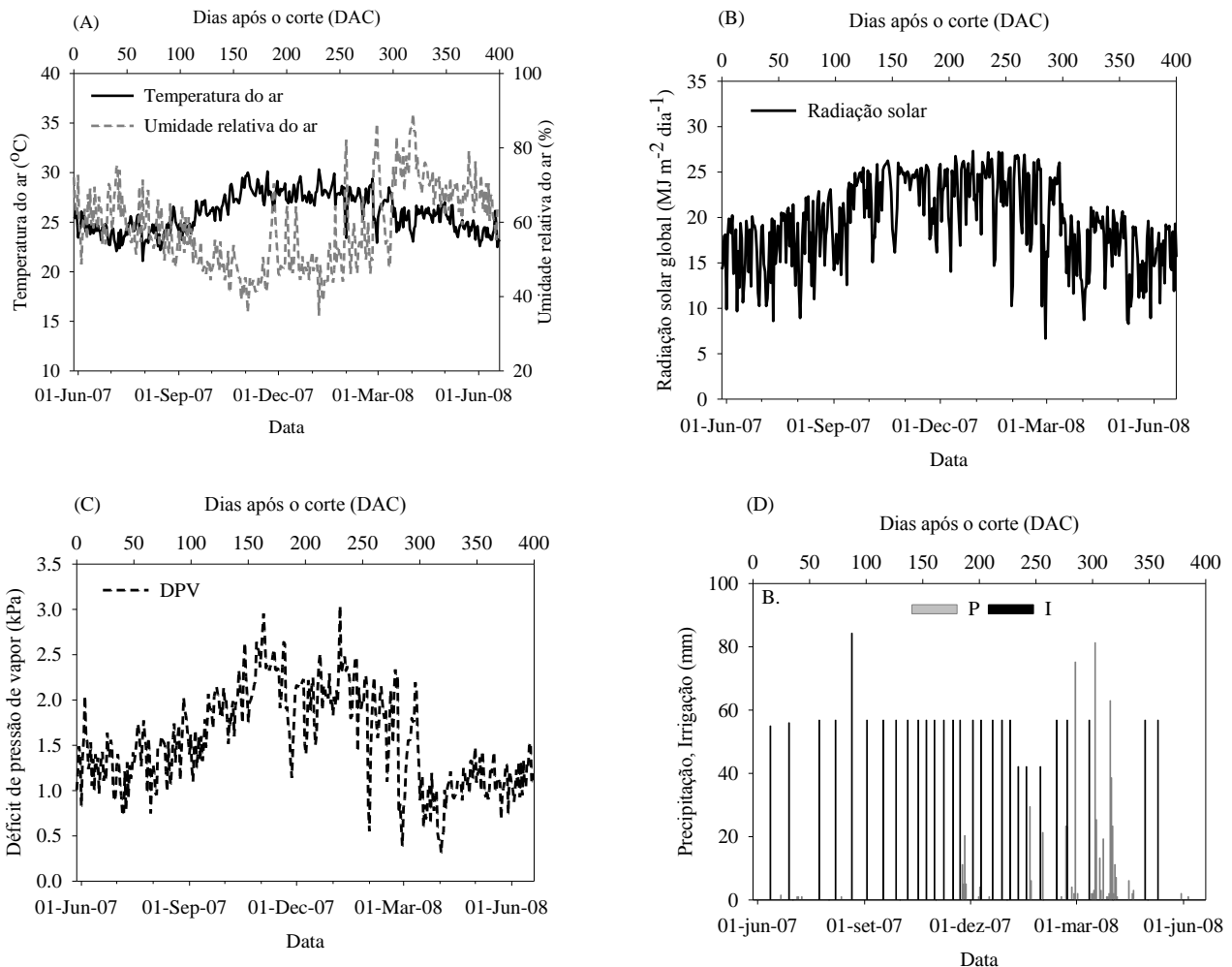


Figura 1. Valores médios diários das variáveis meteorológicas e dos eventos de precipitação e de irrigação ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada, no ciclo de cana-soca, sob condições do Submédio do Vale do São Francisco.

Como resposta, verificam-se as maiores demandas atmosféricas (Figura 1D), que coincidem com os meses mais chuvosos, totalizando 523 mm durante o período experimental. Assim, para a condução comercial da cana-de-açúcar, foram aplicados 2514 mm na forma de irrigação, ao longo do ciclo da cultura. Percebe-se que os maiores intervalos de irrigação ocorreram no início do

ciclo da cultura e durante o período chuvoso, nessa ordem, devido ao baixo índice de área foliar da cultura (IAF), conforme Figura 2, e o maior suprimento de água com o número de eventos de precipitação. Ao longo do ciclo, também foi evidenciado o tombamento da cultura, caracterizado por uma pequena redução do IAF (Figura 2).

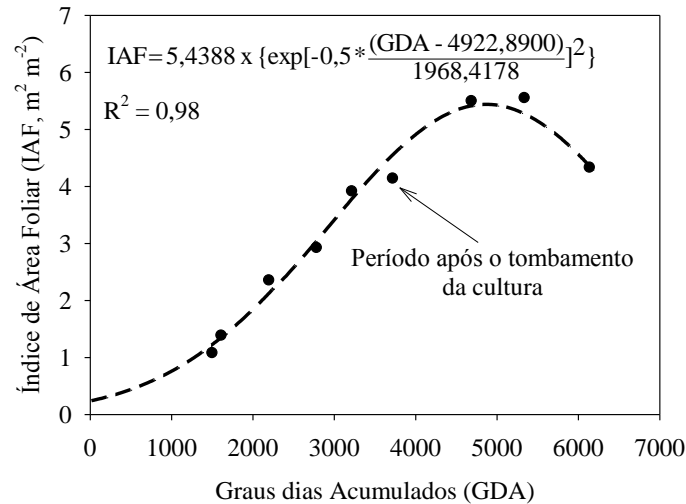


Figura 2. Índice de área foliar (IAF) em função dos graus dias acumulados (GDA) da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB92579) no ciclo de cana-soca, sob condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Na Figura 3, pode ser visualizada a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar (ETc). Observa-se que no início do ciclo, a ETc é baixa, resultado do IAF reduzido (Figura 2) e do maior intervalo entre os eventos de irrigação (Figura 1D). Contudo, com o decorrer do ciclo, percebe-se que a ETc atinge valores máximos (6 e 8 mm dia⁻¹), em torno dos 150 DAC, quando a Rg e o DPV é alto (Figuras 1B e 1C). Valores similares foram obtidos por Inman-Bamber & Mcglinchey (2003), durante as duas primeiras fases de crescimento desta cultura, sob condições climáticas da Kalamia – Austrália e Simunye – Suazilândia (Região Sul do continente africano). Em Kalamia – Austrália, estes autores verificaram que a ETc média, no período de cobertura máxima do solo (fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada, f_{RFA} > 80%), foi de 5,48 ± 0,13

mm d⁻¹, enquanto a ETo foi de 4,44 ± 0,07 mm d⁻¹. Esses autores constataram também que, na fase inicial, a ETc foi de 5,19 ± 0,26 mm d⁻¹, no período de cobertura máxima do solo (f_{RFA} > 80%).

Watanabe *et al.* (2004), utilizando o método BERB para estimar a ETc da cultura da cana-de-açúcar cultivada num solo franco-arenoso na região semiárida do Nordeste da Tailândia, onde a temperatura média anual oscila em torno de 26°C, a radiação solar varia entre 15 e 20 MJ m⁻² d⁻¹ e o total de precipitação é de 1200 mm, verificaram que a ETc média foi de 4,0 mm d⁻¹. Decréscimos dos valores de ETc foram verificadas quando ocorreu redução do conteúdo de água no solo devido à suspensão dos eventos de irrigação e ausência dos eventos de precipitação (Figura 1D).

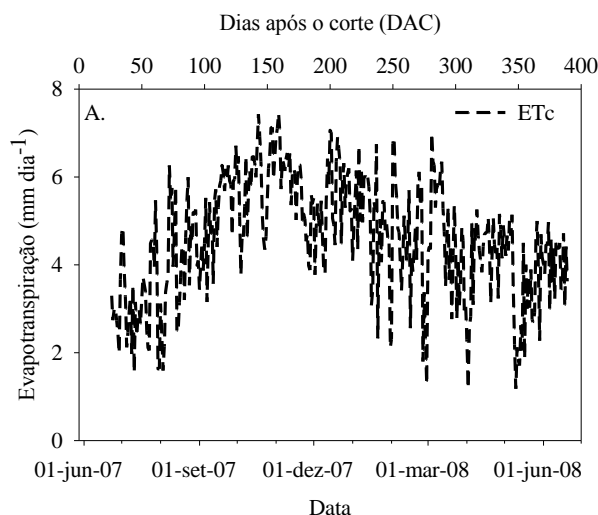


Figura 3. Variação sazonal da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB92579) no ciclo de cana-soca, sob condições climáticas do Submédio do Vale do São Francisco.

Este fato pode ser constatado, por exemplo, no final do ciclo (Figura 3), quando também coincide com o período de menor demanda atmosférica, atingindo valores próximos de $1,5 \text{ mm d}^{-1}$. No início do ciclo (< 75 DAC), observou-se que houve tendência dos valores Ω serem maiores, indicando o menor acoplamento da cana-de-açúcar devido ao IAF ainda pequeno (Figura 2A). Contudo, ao longo do ciclo, verificou-se que seus valores tenderam a oscilar entre 0,60 e 0,80 (Figura 4A), com uma ligeira redução entre os 200 e 300 DAC. Esta diminuição possibilitou inferir que, durante este período, o tombamento da cultura (Figura 3B) promoveu uma redução na troca de vapor d'água da cana-de-açúcar com a atmosfera, devido à redução da exposição da área foliar às condições ambientais. Neste período (200 a 300 DAC), também foram constatados valores elevados de R_g e DPV (Figura 1B e 1C) e baixos valores de velocidade do vento

(Figura 4B), ao passo que não foram verificadas reduções expressivas na disponibilidade de água para a cultura (Figura 1D). Por outro lado, mesmo sob estas condições de disponibilidade de água, a alta demanda atmosférica associada às características físico-hídricas dos vertissolos, que apresentam baixa condutividade hidráulica (Amaral *et al.*, 2007), podem restringir a captação de água pela cultura e, conseqüentemente, reduzir a sua capacidade de atender a demanda de água da atmosfera.

Para o ciclo, os valores de Ω foram, em média, iguais a 0,68, conforme a Tabela 1, demonstrando um desacoplamento de moderado a alto com a atmosfera. Por sua vez, quando não se considerou o período após os 200 DAC, caracterizado pelo início do tombamento, visando retirar esse efeito sobre os valores de Ω , observou-se pouca alteração no valor médio final, sendo igual a 0,69. Este valor é inferior ao informado por Meinzer &

Grantz (1989), que citam, para cultivos irrigados de cana-de-açúcar, valores de Ω em torno de 0,90; contudo mencionam que o uso

de água pela cultura sofre variações expressivas apenas quando se tem condições severas de estresse hídrico ($\Omega \sim 0,20$).

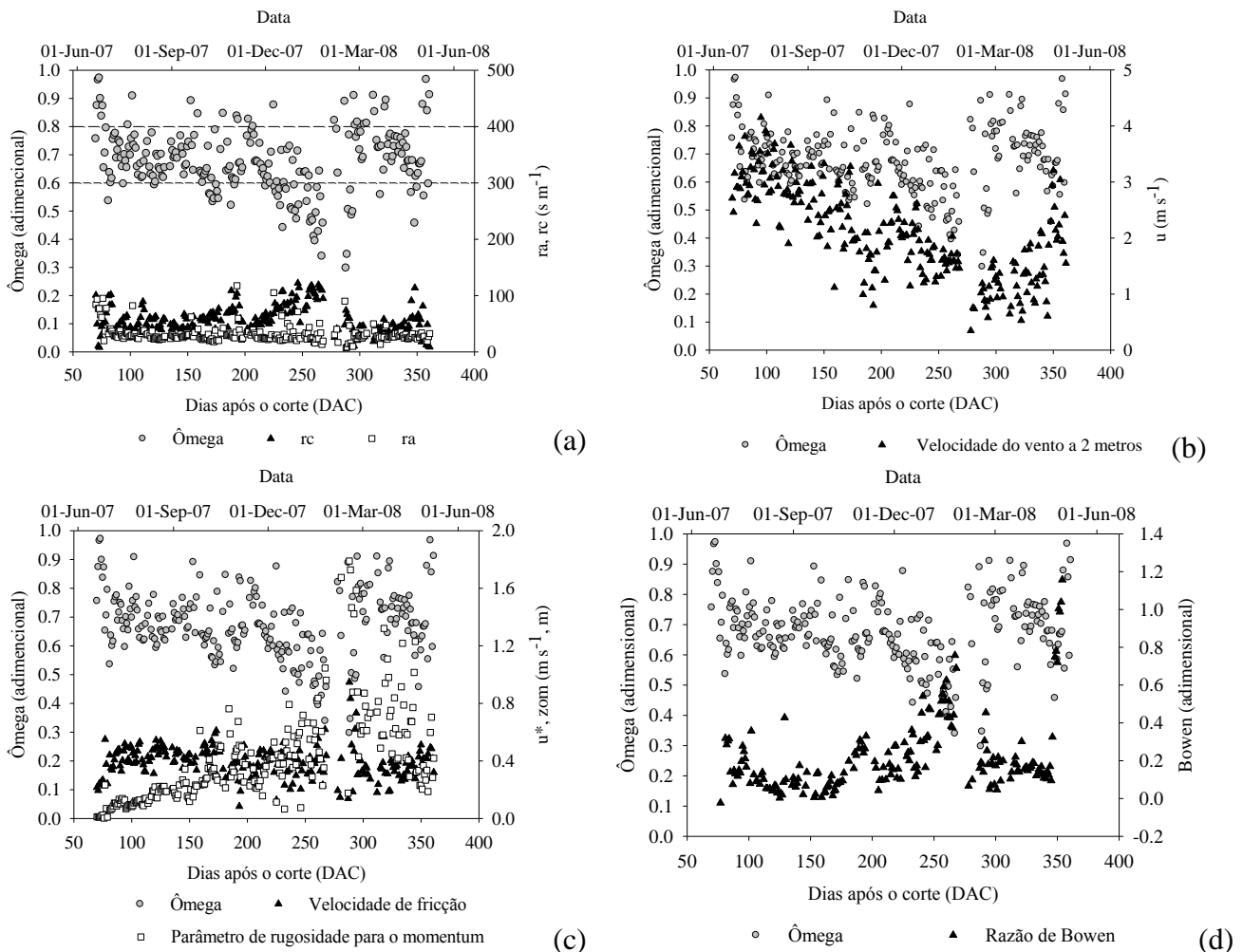


Figura 4. Sazonalidade do fator de desacoplamento (ômega) e resistência da superfície e aerodinâmica ao processo de transferência de energia (a), velocidade do vento a 2 m (b), velocidade de fricção e parâmetro de rugosidade para o momentum (c), e razão de Bowen (d), ao longo do ciclo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB92579), no ciclo de cana-soca, no Semiárido brasileiro.

Quando comparados com espécies florestais, os valores de Ω tendem a ser maiores para as culturas agrícolas, especialmente sob condições de baixa turbulência e resistência estomática, indicando um maior acoplamento da vegetação de floresta com a atmosfera. Isto se deve ao fato da estatura, fechamento do dossel

e a dimensão das folhas das culturas agrícolas inibirem a interação do ar com a superfície vegetada das plantas (Magnani *et al.*, 1998). Estes autores constataram, nas primeiras horas da manhã, quando a resistência das plantas e a velocidade do vento eram baixas, um menor acoplamento ($\Omega > 0,3$) entre a vegetação *Fagus sylvatica* L. e a atmosfera.

Tabela 1. Dados médios do fator de desacoplamento (Ω , ômega) e de variáveis relacionadas ao longo do ciclo da cultura da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB 92579), no ciclo de cana-soca, sob condições climáticas do Semiárido brasileiro.

Ω	r_c	r_a	u^*	z_{om}	β
-	$s\ m^{-1}$	$s\ m^{-1}$	$m\ s^{-1}$	m	-
0,68	58	31	0,39	0,43	0,25

r_c = resistência da cultura, r_a = resistência aerodinâmica, u^* = velocidade de fricção, z_{om} = parâmetro de rugosidade para o momentum, β = razão de Bowen.

Com o aumento de energia incidente, devido à baixa disponibilidade de água no solo, os valores de Ω tenderam a diminuir, em decorrência do maior controle das plantas à transpiração. Na fase de crescimento das plantas, foram evidenciados valores médios de Ω da ordem de 0,28. Para as condições climáticas de Araras-SP, Peres *et al.* (1997) encontraram valor médio de Ω igual a 0,76 para a cana-de-açúcar irrigada, variedade NA56-79, cultivada em um Latossolo Vermelho-escuro, distrófico, com textura argilosa. Notoriamente, a resistência da cultura foi elevada durante os 200 e 300 DAC, atingindo valores próximos de $100\ s\ m^{-1}$, ao passo que a resistência aerodinâmica não apresentou modificações relevantes nos seus valores (Figura 4A).

Ao longo do ciclo, os valores da r_a foram, na sua maioria, inferiores aos da r_c , indicando que as trocas de LE, por efeito de mecanismos turbulentos, foram mais eficientes, comparadas à transferência de vapor a partir do dossel da cultura (Verma *et al.*, 1976; Santos & Bouhid, 1993). Em

média, os valores da r_c foram iguais a $58\ s\ m^{-1}$ (Tabela 1), mostrando que a cana-de-açúcar apresentou uma leve resistência ao processo de evapotranspiração. Meinzer & Grantz (1989) obtiveram valores médios de r_c iguais a $34\ s\ m^{-1}$ para a cana-de-açúcar irrigada, utilizando o método do balanço de energia com base na razão de Bowen. Em escala decenal e mensal, Peres *et al.* (1999) encontraram valores variando entre 3 e $82\ s\ m^{-1}$ e 8 e $74\ s\ m^{-1}$, com valores médios de $43\ s\ m^{-1}$ e $42\ s\ m^{-1}$, respectivamente, para um cultivo de cana-de-açúcar irrigada sob as condições climáticas de Araras-SP.

Pela Figura 4B, observa-se que o menor acoplamento da cana-de-açúcar foi verificado quando a velocidade do vento foi maior, tanto no início do ciclo da cultura quanto no final, demonstrando a importância relativa da velocidade do vento na interação entre a biosfera e a atmosfera (Steduto & Hsiao, 1998b).

Como mencionado, no final do ciclo, o acoplamento esteve associado com a suspensão dos eventos de irrigação e o

tombamento da cultura. Entretanto, evidências do tombamento foram observadas a partir dos 200 DAC, confirmado em decorrência de um aumento mais pronunciado da rugosidade da superfície (Figura 4C). No início do ciclo, a cultura mais homogênea e com h_c , ainda, reduzida, os valores de z_{om} tenderam a ser menores. Para o ciclo, z_{om} foi, em média, igual a 0,43 m (Tabela 1).

Em relação à velocidade de fricção, verificou-se que seus valores estiveram, em média, em torno de $0,39 \text{ m s}^{-1}$ (Tabela 1), sendo, porém, ligeiramente superiores antes dos 200 DAC (Figura 6). Esses valores indicam a ocorrência de turbulência acima da superfície e está associada à característica de rugosidade. Toledo Filho *et al.* (2003) encontraram valores entre $0,12$ e $0,70 \text{ m s}^{-1}$, em cultivo em sequeiro de cana-de-açúcar, onde valores acima de $0,44 \text{ m s}^{-1}$ estavam relacionados a maiores valores de rugosidade da superfície. Apesar da maior turbulência promovida pelo tombamento da cultura, verifica-se que não resultou em trocas efetivas de vapor d'água entre a cana-de-açúcar e a atmosfera, especialmente entre 200 e 300 DAC e na fase final do ciclo, logo que os valores de β foram mais elevados ($> 0,40$), em resposta da redução do índice de área foliar e dos eventos de irrigação. Maiores valores de β indicam que, durante esses períodos, maior fração da energia disponível está sendo destinada ao fluxo de calor sensível, ou seja, para o aquecimento do ar, em vez do processo de evapotranspiração (ETc). Para o ciclo, β

apresentou valor médio em torno de 0,25, indicando maior gasto de energia para a ETc, em decorrência da aplicação de irrigação ao longo do ciclo.

Conclusões

A evapotranspiração da cana-de-açúcar irrigada no Semiárido brasileiro é mais fortemente controlada pela energia disponível, proveniente do saldo de radiação, do que pela interação da superfície da cultura com o ar do ambiente de cultivo, influenciada pelo vento, temperatura e umidade do ar. Este fato demonstra um desacoplamento da cultura com a atmosfera, tendo como base o valor médio de 0,68 para o parâmetro Ω . Porém, verifica-se um maior acoplamento da cultura com a atmosfera após o tombamento das plantas, que por sua vez promove modificações nas características aerodinâmicas da superfície e afeta as trocas gasosas com a atmosfera.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a Empresa Agrovale pela concessão da área experimental, à Embrapa Semiárido pela infraestrutura disponibilizada, à Universidade Federal de Viçosa – UFV e ao CNPq pela bolsa de estudo.

Referências

Amaral, F.C.S. do; Fernandes, L.A.C.; Araújo Filho, A.A.; Vieira, V.J. de S.; Faria Júnior, W.G. (2007). Influência da irrigação na

condutividade hidráulica de um vertissolo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 35 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa, 113).

Goldberg, V.; Bernhofer, C. (2008). Testing different decoupling coefficients with measurements and models of contrasting canopies and soil water conditions. *Annales Geophysicae*, Paris, v. 26, p. 1977-1992.

Inman-Bamber, N.G.; Mcglinchey, M.G. (2003). Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 83, p. 125-138.

Inman-Bamber, N.G.; Smith, D.M. (2005). Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 92, p. 185-202.

Jarvis, P.G., Mcnaughton, K.G. (1986). Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Advances Ecology Research*, New York, v. 15, p. 1-49.

Jones, H.G. (1992). *Plants and microclimate*. Cambridge: University Press Cambridge, 428 p.

Kumagai, T.; Saitoh, T.M.; Sato, Y.; Morooka, T.; Manfroi, O.J.; Kuraji, K.; Suzuki, M. (2004). Transpiration, canopy conductance and the decoupling coefficient of

a lowland mixed dipterocarp forest in Sarawak, Borneo: Dry spell effects. *Journal of Hydrology*, v. 287, p. 237-251.

Lyra, G.B., Pereira, A.R. (2007). Dificuldades de estimativa dos parâmetros de rugosidade aerodinâmica pelo Perfil logarítmico do vento sobre vegetação esparsa em região semi-árida. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 187-197.

Magnani, F.; Leonardi, S.; Tognetti, R.; Grace, J.; Borghetti, M. (1998). Modelling the surface conductance of a broad-leaf canopy: effects of partial decoupling from the atmosphere. *Plant, Cell and Environment*, Oxford, v. 21, p. 867-879.

Mcnaughton, K. G., JARVIS, P. G. (1983). Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: Kozlowski, T. T. (Ed.). *Water deficits and plant growth*. New York: Academic Press, v. 7, p. 1-47.

Meinzer, F.C., Grantz, D.A. (1989). Stomatal control of transpiration from a developing sugarcane canopy. *Plant Cell and Environmental*, Oxford, v. 12, p. 635-642.

Pereira, A. R. (2004). The Priestley–Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 125, p. 305-313.

- Peres, J.G.; Pereira, A.R.; Frizzone, J.A.; Villa Nova, N.A. (1997). Calibração do modelo de Priestley-Taylor para estimar a evapotranspiração potencial da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 77-82.
- Perez, P.J.; Castellvi, F.; Ibañez, M.; Rosell, J.I. (1999). Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 97, p. 141-150.
- Santos, R.Z.; Bouhid, A.R.G. (1999). Relações energéticas e aerodinâmicas em uma cultura de feijão. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 11-18.
- Silva, T.G.F. da; Moura, M.S.B. de; Zolnier, S.; Soares, J.M.; Vieira, V.J. de S.; Farias Júnior, W.G. (2012). 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.
- Silva, T.G.F. da; Moura, M.S.B. de; Zolnier, S.; Soares, J.M.; Souza, L.S.B.; Brandão, E.O. (2011). Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 139-147.
- Steduto, P.; Hsiao, T.C. (1998a). Maize canopies under two soil water regimes. I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy conductance. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 89, p. 169-184.
- Steduto, P.; Hsiao, T.C. (1998b). Maize canopies under two soil water regimes. II. Variation in coupling with the atmosphere and the role of leaf area index. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 89, p. 201-213.
- Suyker, A.E.; Verma, S.B. (2008). Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 148, p. 417-427.
- Suyker, A.E.; Verma, S.B.; Burba, G.G.; Arkebauer, T.J.; Walters, D.T.; Hubbard, K.G. (2004). Growing season carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 124, p.1-13.
- Toledo Filho, M.R.; Berlato, M.A.; Lyra, R.F.F. (2003). Parâmetros aerodinâmicos associados a cultivo de cana-de-açúcar no estado de alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 207-212.

Verma, S.B.; Rosemberg, N. J.; Blad, B.L.; Baradas, M.W. (1976). Resistance-energy balance model for predicting evapotranspiration: Determination of boundary layer resistance and evaluation of error effects. *Agronomy Journal*, Madison, v. 68, p. 776-782.

Watanabe, K.; Yamamoto, T.; Takashi Yamada, L. (2004). Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 67, p. 133-143.