

DESENVOLVIMENTO E BALANÇO DE ENERGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO NORTE FLUMINENSE, BRASIL

Barbara dos Santos Esteves, Elias Fernandes de Sousa, José Carlos Mendonça, Lidiane de Lima Lousada, Rodrigo de Almeida Muniz, Cláudio Roberto Marciano e David Pessanha Siqueira

RESUMO

A preocupação crescente por fontes de energias renováveis e menos poluentes tem elevado a demanda de biocombustíveis, se destacando o etanol proveniente da cana-de-açúcar. O objetivo deste estudo foi quantificar a partição dos componentes do balanço de energia e acompanhar os índices fisiológicos do desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, relacionando-os com a disponibilidade hídrica das condições de clima e solo de Campos dos Goytacazes, Norte Fluminense, Brasil. Para

tal, instalou-se uma estação micrometeorológica em uma área de 13 ha, em cultivo comercial num Cambissolo. O cultivo foi acompanhado periodicamente aos 85, 102, 128, 149, 174, 194, 215, 235, 255 e 280 dias após o corte (DAC). As variações da disponibilidade hídrica influenciaram diretamente nas taxas de crescimento da cultura e no balanço de energia. Nas condições analisadas a maior parte da energia disponível (53%) foi consumida pelo fluxo de calor latente.

Introdução

A preocupação crescente por fontes de energias renováveis e menos poluentes tem elevado à demanda de biocombustíveis, dentre os quais se destaca o etanol proveniente da cana-de-açúcar (Almeida *et al.* 2008). O Brasil desponta como líder mundial em exportações de açúcar, além de ser líder mundial na utilização desta planta como fonte de energia renovável (Oliveira *et al.* 2007). A cultura da cana-de-açúcar tem grande importância econômica para a região de Campos dos Goytacazes, sendo este

município o maior produtor do Estado do Rio de Janeiro. Pesquisas relacionadas aos aspectos agrometeorológicos desta cultura são importantes para o entendimento dos fluxos energéticos e suas trocas com a biomassa e os impactos inerentes a esta atividade agrícola.

O manejo adequado da cana-de-açúcar implica em conhecer os padrões de crescimento de cada variedade, fazendo com que as fases de máximo desenvolvimento coincidam com os períodos de maior disponibilidade hídrica e radiação solar, permitindo que a cultura expresse todo

seu potencial genético (Keating *et al.*, 1999).

A energia solar é a fonte primária para a atividade fotossintética e também para a transpiração das plantas em determinada localidade climática (Pereira *et al.* 2009). O método do balanço de energia é utilizado, comumente, para se estimar a evapotranspiração de superfícies vegetadas e se baseia na análise do balanço energético dos ganhos e perdas de energia térmica radiativa, condutiva e convectiva por uma superfície evaporante (Borges *et al.* 2008). O método permite que se avaliem as alterações no micro-

clima da vegetação, em função dos estádios de desenvolvimento da cultura e das condições de solo e atmosfera (Fontana *et al.*, 1991).

Em muitos trabalhos, para a estimativa do balanço de energia, é utilizado o método de razão de Bowen, para obtenção do fluxo de calor latente. Buscando-se evitar erros na estimativa, os dados inerentes ao erro instrumental micrometeorológico do sistema Razão de Bowen são excluídos (Silva *et al.*, 2007). Sob condições de seca ou de grande umidade do ar, em que não há formação de gradientes, não é aconselhável a

PALAVRAS CHAVE / Evapotranspiração / Fluxo de Calor Latente / Índices Fisiológicos / Método de Penman-Monteih / Saldo de Radiação /

Recebido: 19/05/2011. Modificado: 24/04/2012. Aceito: 02/05/2012.

Barbara dos Santos Esteves.

Engenheira Agrônoma e M.Sc. em Produção Vegetal, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Brasil. Doutoranda em Produção Vegetal, Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG), Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA), UENF, Brasil. Endereço: Avenida Alberto Lamego, N°2000, CEP: 28013-600, Horto, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil. e-mail: barbbarase@yahoo.com.br

Elias Fernandes de Sousa.

Engenheiro Agrícola. Universidade Federal de Viçosa (UFV), Brasil. M.Sc. em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV); D.Sc. em Produção Vegetal, UENF, Brasil. Professor, CCTA/UENF, Brasil. e-mail: efs@uenf.br

José Carlos Mendonça. Engenheiro Agrônomo, M.Sc. e D.Sc. em Produção Vegetal, UENF, Brasil. Professor, CCTA/UENF, Brasil. e-mail: mendonca@yahoo.com.br

Lidiane de Lima Lousada.

Engenheira Agrônoma, M.Sc. em Produção Vegetal e Doutoranda em Produção Vegetal-Física do Solo, UENF, Brasil. e-mail: delimalousada@yahoo.com.br

Rodrigo de Almeida Muniz.

Engenheiro Agrônomo e M.Sc. em Produção Vegetal, UENF, Brasil. Doutorando em Engenharia de Biosistemas, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (USP/ESALQ),

Brasil. e-mail: uenfrodri@gmail.com

Cláudio Roberto Marciano.

Engenheiro Agrônomo, UNESP, Brasil. M.Sc. e D.Sc. em Solos e Nutrição de Plantas, USP/ESALQ, Brasil. Professor, CCTA/UENF, Brasil. e-mail: marciano@uenf.br

David Pessanha Siqueira. Graduando de Agronomia, UENF, Brasil. e-mail: david_pessanha007@hotmail.com

DEVELOPMENT AND ENERGY BALANCE OF SUGARCANE IN THE NORTE FLUMINENSE, BRAZIL

Barbara dos Santos Esteves, Elias Fernandes de Sousa, José Carlos Mendonça, Lidiane de Lima Lousada, Rodrigo de Almeida Muniz, Cláudio Roberto Marciano and David Pessanha Siqueira

SUMMARY

The growing concern for renewable and cleaner energy sources has increased the demand for biofuels, pointing out the ethanol from sugarcane. The aim of this study was quantify the partition of energy balance components and monitor the physiological development indexes of the sugarcane, relating them to water availability conditions of climate and soil in Campos dos Goytacazes, Norte Fluminense, Brazil. To this end, a mi-

crometeorological station was settled in an area of 13 ha in commercial cultivation. The culture was regularly monitored at 85, 102, 128, 149, 174, 194, 215, 235, 255 and 280 days after cutting (DAC). The variations in water availability directly influenced the rates of crop growth and energy balance. Under the conditions studied most of the available energy (53%) was consumed by the latent heat flux.

DESARROLLO Y BALANCE ENERGÉTICO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN EL NORTE FLUMINENSE, BRASIL

Barbara dos Santos Esteves, Elias Fernandes de Sousa, José Carlos Mendonça, Lidiane de Lima Lousada, Rodrigo de Almeida Muniz, Cláudio Roberto Marciano y David Pessanha Siqueira

RESUMEN

La creciente preocupación por las fuentes de energía renovables y menos contaminantes ha aumentando la demanda de biocombustibles, señalando que el etanol de la caña de azúcar. El objetivo de este estudio fue cuantificar la partición de los componentes del balance de energía y controlar los índices fisiológicos del desarrollo de la caña de azúcar, en relación a las condiciones de disponibilidad de agua del clima y suelo del Campos dos Goytacazes, Norte Fluminense, Brasil. Con este fin,

se estableció una estación micrometeorológica en una área, de 13 hectáreas en el cultivo comercial en un Cambisol. La cultura fue un seguimiento regular de 85, 102, 149, 174, 184, 194, 215, 235, 255 y 280 días después del corte (DAC). Las variaciones en la disponibilidad de agua influyen directamente en las tasas de crecimiento de los cultivos y el balance energético. Bajo las condiciones estudiadas la mayor parte de la energía disponible (53%) fue consumido por el flujo de calor latente.

utilização do método da razão de Bowen.

Para uma condição em que o método da razão de β não pode ser utilizado com confiabilidade, o fluxo de calor latente pode ser obtido pelo método de Penman-Monteith (PM) (Allen *et al.*, 1998), que foi estudado por Toledo Filho (2001), na cultura da cana-de-açúcar, obtendo resultados satisfatórios para o estado de Alagoas, na região nordeste do Brasil. Ortega-Farias *et al.* (2006) estudaram a quantificação do fluxo de calor latente na cultura do tomate, no Chile, também obtendo resultados satisfatórios. Abdelhadi *et al.* (2000) utilizaram o método de PM para estimar as necessidades hídricas do algodão, na região árida do Sudão, na África.

O melhor desempenho observado no método de PM, em condições mais secas, se deve principalmente à consideração de informações sobre o potencial hídrico foliar e déficit de pressão de vapor,

uma vez que a abertura estomatal é em grande parte controlada pela turgescência e o movimento de água é governado pelo gradiente de potencial hídrico entre a superfície vegetada e a atmosfera (Rodrigues, 2006). O mesmo autor argumenta que um potencial hídrico baixo induz ao fechamento estomatal, o que reduz a condutância foliar e inibe a transpiração.

Neste contexto, este estudo objetivou quantificar a partição da energia solar disponível à cana-de-açúcar durante suas fases de desenvolvimento relacionando-a com o crescimento da cultura e a disponibilidade hídrica, utilizando o método de PM, para obtenção do fluxo de calor latente, nas condições de clima e solo de Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

Materiais e Métodos

O experimento foi conduzido em 13ha de um cultivo

comercial de cana-de-açúcar na Fazenda Partido, da empresa Feliz Terra Agrícola, não irrigado, em Campos dos Goytacazes, Norte Fluminense, Brasil (21°48'17,1"S e 41°16'28,8"O, referidas ao datum WGS84, altitude local de 9m). A variedade da cana-de-açúcar utilizada foi a SP81-3250, plantada em um espaçamento de 1,5m, estando na ressoca de 3°corte. O solo, que apresenta drenagem moderada, ausência de pedregosidade e propriedades verticais, foi classificado como Cambissolo Háptico Eutrófico (Embrapa, 2006).

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região Norte Fluminense é do tipo Aw, ou seja, tropical úmido com verão chuvoso e inverno seco, sendo a temperatura do mês mais frio superior a 18°C. As médias anuais de precipitação, temperatura e umidade relativa do ar são respectivamente, iguais a 1023mm, 24°C e 77%. Na

Figura 1, estão apresentados os eventos de chuvas ocorridas no período experimental e as variações da temperatura média.

Na área do experimento foi instalada, no dia 12/10/2009, 30 dias após o corte da cana-de-açúcar, uma estação micrometeorológica contendo os seguintes sensores: um saldo radiômetro (NR Lite), dois piranômetros LI 200 (X-Li-cor), dois termohigrômetros HMP45C-L (Vaissala), dois anemômetros Met One (RM Young) e três fluxímetros HFP01SC-L (Hukseflux). Todos os dados foram coletados a cada 10seg e armazenados em valores médios a cada 15min por um coletor de dados (datalogger) CR21X (Campbell Scientific). As hastes horizontais foram dispostas a 0,50m sobre o dossel da cultura (1ª haste) e a 2,5m sobre o dossel (2ª haste), as quais foram elevadas de acordo com o crescimento da cultura. Junto à estação, foi ins-

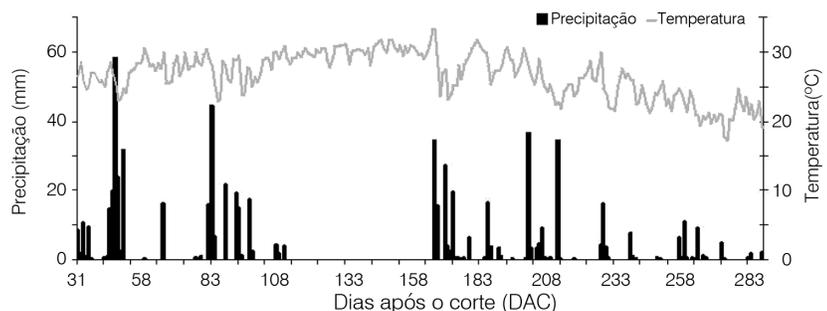


Figura 1. Precipitações (mm) ocorridas e variação da temperatura média diária (°C) durante o período experimental.

talado um pluviômetro registrador da Squitter do Brasil, com 0,25mm de sensibilidade.

O método do balanço de energia utilizado para quantificar os fluxos entre a cana-de-açúcar e a atmosfera, foi baseado na equação

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

onde: R_n : saldo de radiação, H : fluxo de calor sensível, LE : fluxo de calor latente, e G : fluxo de calor do solo.

O fluxo calor latente foi obtido pela equação de Penman-Monteith (Monteith, 1981) apresentada na equação

$$LE = \frac{sR_n + \rho C_p \Delta e}{s + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (2)$$

em que R_n : saldo de radiação ($W \cdot m^{-2}$), ρ : massa específica do ar ($kg \cdot m^{-3}$), C_p : calor específico do ar a pressão constante ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$), Δe : déficit de pressão de vapor (kPa), γ : constante psicrométrica, r_c e r_a : resistências da cobertura vegetal e aerodinâmica da cultura ao transporte de vapor ($s \cdot m^{-1}$), e s : tangente à curva de pressão de vapor saturante ($kPa \cdot ^\circ C$).

As resistências da cobertura vegetal e aerodinâmica da cultura foram estimadas pelas Eqs. 3 (Allen *et al.*, 1989) e 4 (Allen *et al.*, 1998).

$$r_c = \frac{500 - 0,85R_n}{IAF} \quad (3)$$

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{(z_u - d)}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{(z_r - d)}{z_{ov}}\right]}{k^2 U_z} \quad (4)$$

em que R_n : $cal \cdot cm^{-2}/dia$, IAF : índice de área foliar, z_u : altura da medição da velocidade do

vento (m), z_{om} : comprimento de rugosidade da cultura para transporte de *momentum* (m), z_r : altura da medição da umidade do ar (m), z_{ov} : comprimento de rugosidade da cultura para transporte de vapor e calor sensível (m), k : constante de von Karman (0,41), U_z : velocidade do vento ($m \cdot s^{-1}$) na altura z . O d representa o deslocamento do plano zero e foi obtido pela relação 2/3 da altura da cultura. Os valores de altura do dossel e IAF entre as coletas de campo foram estimados por interpolações. O fluxo do calor sensível (H) foi obtido como resíduo do balanço de energia (Eq. 1).

O desenvolvimento da cultura foi acompanhado através de coletas de campo periódicas aos 85, 102, 128, 149, 174, 194, 215, 235, 255 e 280 dias após o corte (DAC), para estimativa da massa seca total (MST) do cultivo e dos índices fisiológicos: índice de área foliar (IAF), taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR) e taxa de assimilação líquida (TAL).

Em cada coleta foram obtidas amostras em 40,0m do cultivo, sendo determinadas a cada metro a altura do dossel e as massas frescas totais de colmos e folhas. As amostras foliares seguiam para a determinação da área foliar, realizada com auxílio do equipamento LICOR-3100, para posterior estimativa da área foliar total e cálculo do IAF (área foliar/espacamento da planta). Após este procedimento as amostras de colmos e folhas foram levadas para secagem do material verde, sendo iden-

tificadas e colocadas em estufa de ventilação forçada a temperatura média de 70°C até peso constante, seguido da pesagem das massas secas. Com estas massas secas foi estimada a MST, em $Mg \cdot ha^{-1}$.

Os índices fisiológicos TCA, TCR e TAL expressam as condições fisiológicas das plantas e quantificam a produção líquida derivada do processo fotossintético, sendo este desempenho afetado por condições intrínsecas da espécie e por fatores ambientais. Estes índices foram obtidos pelas Eqs. 5, 6 e 7.

$$TCR = \frac{\ln(MST2) - \ln(MST1)}{T2 - T1} \quad (5)$$

$$TCA = \frac{(MST2 - MST1)}{(T2 - T1)} \quad (6)$$

$$TAL = \left[\frac{MST2 - MST1}{AF2 - AF1} \right] \cdot \left[\frac{\ln(AF2) - \ln(AF1)}{T2 - T1} \right] \quad (7)$$

em que TCR: $g \cdot g/dia$, TCA: g/dia , TAL: $g \cdot dm^{-1}/dia$, MST2-MST1: massa seca entre duas amostragens; T2-T1: intervalo de tempo entre duas amostragens (dias), e AF: área foliar (dm^2).

Os estádios fenológicos considerados foram: estabelecimento (0 a 60 DAC), perfilhamento (61 até os 110 DAC), desenvolvimento dos

colmos (entre 111 a 240 DAC) e maturação (241 DAC em diante).

Resultados e Discussão

Crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar

Os acompanhamentos de campo foram realizados a partir do estágio de perfilhamento, sendo apresentados os resultados a partir desta fase. Monteith (1972) afirma que as taxas de crescimento de uma espécie podem ser expressas em função da quantidade de energia luminosa incidente, da interceptação e conversão dessa energia em massa seca. As taxas de crescimento sendo índices fisiológicos são indicativos de como a comunidade vegetal está aproveitando a energia líquida disponível, representada pelo R_n . Por essa razão a MST, a TCA, a TCR e a TAL foram analisadas neste estudo, nos distintos estádios de desenvolvimento da cultura (Tabela I).

A MST observada aos 85 DAC foi de $3,18 Mg \cdot ha^{-1}$; aos 102 DAC a MST obtida foi de $4,47 Mg \cdot ha^{-1}$, representando aumento de 41% em relação à coleta anterior. A TCA obtida entre estas duas coletas foi de $0,092 g/dia$, enquanto que a TCR foi de $0,024 g \cdot g^{-1}/dia$ e a TAL de $0,492 g \cdot dm^{-2}/dia$.

Verifica-se que no período de 110 a 165 DAC, durante o estágio de desenvolvimento

TABELA I
MASSA SECA TOTAL (MST), TAXA DE CRESCIMENTO ABSOLUTO (TCA), TAXA DE CRESCIMENTO RELATIVO (TCR) E TAXA DE ASSIMILAÇÃO LÍQUIDA (TAL)

Estádio	DAC	MST	TCA	TCR	TAL
Perfilhamento	85	3,18	-	-	-
Perfilhamento	102	4,47	0,092	0,024	0,492
Desenvolvimento dos colmos	128	12,84	0,311	0,039	1,816
Desenvolvimento dos colmos	149	16,08	0,153	0,011	0,941
Desenvolvimento dos colmos	174	19,43	0,134	0,008	0,798
Desenvolvimento dos colmos	194	21,08	0,082	0,004	0,464
Desenvolvimento dos colmos	215	26,67	0,280	0,012	1,728
Desenvolvimento dos colmos	235	27,53	0,043	0,002	0,262
Maturação	255	28,93	0,070	0,002	0,449
Maturação	280	29,75	0,041	0,001	0,246

MST em $Mg \cdot ha^{-1}$, TCA em g/dia , TCR em $g \cdot g/dia$, e TAL, em $g \cdot dm^{-2}/dia$.

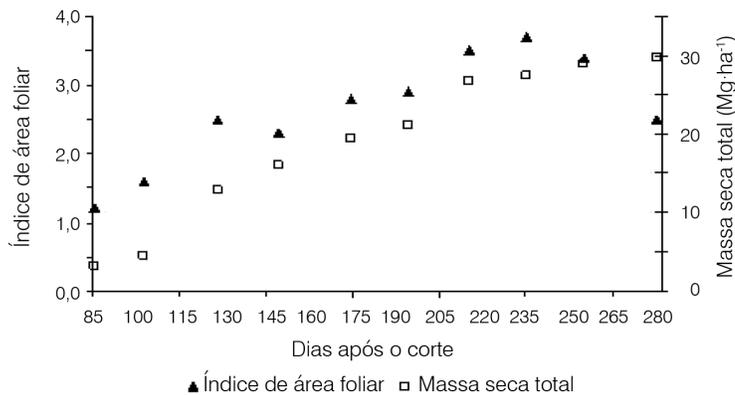


Figura 2. Índice de área foliar e massa seca total da cana-de-açúcar durante o ciclo de cultivo (setembro de 2009 a outubro de 2010), em sequeiro, variedade SP81-3250, Campos dos Goytacazes, Norte Fluminense, Brasil.

dos colmos, não houve precipitação (Figura 1), caracterizando um período prolongado de estiagem durante o ciclo da cana-de-açúcar. Ao todo choveram 664,25mm durante o período de cultivo. Este valor ficou abaixo do ideal para a cana-de-açúcar, sendo que uma precipitação pluvial anual a partir de 1000mm, bem distribuída, é suficiente para a obtenção de altas produções (Almeida *et al.*, 2008), sem utilização da irrigação.

A temperatura média para a fase de estabelecimento foi de 26,6°C; para a fase de perfilhamento foi de 27,6°C. A maior temperatura média ocorreu durante a fase de desenvolvimento dos colmos, na qual houve o período de estiagem prolongado. A média desta fase foi de 28,1°C. Ressalta-se que a média de temperatura desta fase situou-se dentro da faixa ideal (25-33°C) para a cultura da cana-de-açúcar (Keating *et al.*, 1999). Todavia, a alta temperatura média combinada com o período prolongado sem precipitação e a baixa umidade relativa média diurna (59,2%) reduziram as taxas de crescimento da cultura. Na fase de maturação obteve-se a menor temperatura média do ciclo, sendo de 22,0°C. Observa-se que está redução da temperatura na fase final do cultivo é decorrente da época do ano, que é a mais fria da região de estudo.

Durante o período de estiagem foram feitas duas observações do cultivo, aos 128 e aos 149 DAC. Aos 128 DAC a MST observada foi de 12,84Mg·ha⁻¹, sendo o aumento em relação à coleta de 102DAC de 287,2%. Em relação às taxas de crescimento, entre os 102 e 128 DAC a TCA, TCR e TAL foram, respectivamente, de 0,311g/dia, 0,039g·g⁻¹/dia e 1,816g·dm⁻²/dia. As plantas mantiveram crescentes as suas taxas de crescimento, mesmo durante a seca, possivelmente devido às reservas de água presentes no solo nas camadas mais profundas. No entanto, com a continuidade do período sem chuvas, as taxas de crescimento se reduziram, sendo seus valores entre os dias 128 e 149 DAC de 0,153g/dia, 0,011g·g⁻¹/dia e 0,941g·dm⁻²/dia (TCA, TCR e TAL, respectivamente).

Na Figura 2 está apresentada a variação do IAF e da MST da cana-de-açúcar, durante o ciclo. Observando-se a Figura 2, percebe-se que há incremento do IAF dos 85 aos 128 DAC, sendo os valores respectivamente de 1,2 e 2,5. Porém, a menor disponibilidade hídrica afetou o IAF, que aos 149 DAC caiu para 2,3. Taiz e Zeiger (2002) afirmam que o déficit hídrico pode afetar vários aspectos do crescimento vegetal, sendo os efeitos mais óbvios do estresse à redução das taxas de crescimento das plantas. Um efeito de particular im-

portância em resposta a um déficit hídrico é a limitação à expansão da área foliar, sendo o seu decréscimo uma das consequências em resposta ao déficit hídrico, podendo ser considerado uma primeira linha de defesa contra a seca (Farias *et al.*, 2008). Está redução da área foliar foi refletida pelo decréscimo do IAF. Porém, mesmo com a redução das taxas de crescimento e do IAF, a MST se manteve crescente durante o período, alcançando o valor de 16,08Mg·ha⁻¹, aos 149 DAC, com um menor acréscimo em relação à coleta anterior (25%).

A coleta aos 174 DAC foi realizada no período após um evento de precipitação. Nota-se, que mesmo com a maior oferta hídrica e aumento do IAF (2,8), neste período, as taxas de crescimento foram menores do que o acompanhamento anterior, sendo os valores de TCA, TCR e TAL de 0,134g/dia, 0,008g·g⁻¹/dia e 0,798g·dm⁻²/dia, respectivamente. A MST obtida para este dia foi de 19,43Mg·ha⁻¹. Estas menores taxas podem ser explicadas, provavelmente, ainda como efeitos do estresse hídrico sofrido pela cultura. Aos 194 DAC, com o IAF de 2,9, observa-se que as taxas de crescimento se mantiveram reduzidas, sendo a TCA e a TAL de 0,082g/dia e 0,464g·dm⁻²/dia, respectivamente, e a TCR de 0,004g·g⁻¹/dia. A MST para esta observação foi de 21,08Mg·ha⁻¹. Aos 215 DAC, observaram-se taxas de crescimento maiores que as observadas aos 194 DAC, sendo os valores respectivamente, da TCA, TCR e TAL de 0,280g·g⁻¹/dia, 0,012g·g⁻¹/dia e 1,728g·dm⁻²/dia. A MST para os 215 DAC foi de 26,67Mg·ha⁻¹, sendo o IAF deste dia de 3,5.

Aos 235 DAC observou-se o máximo IAF (3,7) da cultura da cana-de-açúcar. As taxas de crescimento obtidas foram menores em relação à coleta anterior, sendo a MST observada de 27,53Mg·ha⁻¹. Nas observações realizadas durante o estágio da maturação as TCA e TAL, foram respectivamente de 0,070g·g⁻¹/dia e 0,449g·dm⁻²/dia, para os 255 DAC e de 0,041g·g⁻¹/dia e 0,246g·dm⁻²/dia para os 280 DAC. As TCR destas coletas ficaram próximas. A MST para os dias analisados para a fase de maturação, respectivamente, foi de 28,93 e 29,75Mg·ha⁻¹. De uma forma geral a MST foi crescente ao longo de todo o ciclo, concordando com Oliveira *et al.* (2007), que estudaram o crescimento de três variedades de cana-de-açúcar no Paraná. A MST final também obteve valores próximos aos encontrados por Almeida *et al.* (2008), estudando quatro variedades em cana-planta e cana-soca, em Alagoas.

Balanco de energia na cana-de-açúcar

No decorrer do experimento, foi verificado os valores máximos diários de Rn ocorreram entre 11:00 e 13:00. Este resultado foi similar ao encontrado por Moura (2005) estudando a cultura da goiabeira, na região Nordeste do Brasil. Durante o período de estudo o saldo de radiação máximo foi de 79,66MJ·m⁻²/dia na fase de desenvolvimento de colmos, no horário de 12:30.

A variação dos fluxos médios diurnos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G), e o saldo de radiação (Rn) durante o desenvolvimento da cana-de-açúcar são apresentados na Figura 3. Observa-se que no início do cultivo os valores de H são elevados, em função da cultura ainda não ter se estabelecido, tendo nenhuma ou pouca área foliar e biomassa, sendo a maior parte da energia utilizada para o aquecimento do ar. Este

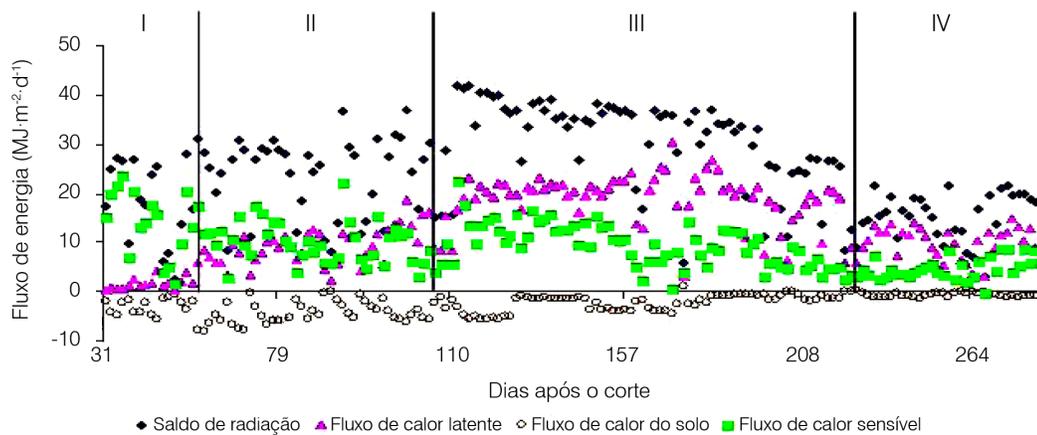


Figura 3. Variação das médias diurnas dos fluxos de energia durante o ciclo da cana-de-açúcar (setembro de 2009 a junho de 2010), em sequeiro, variedade SP81-3250, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil. I: estabelecimento da cultura, II: perfilhamento, III: desenvolvimento dos colmos, IV: maturação.

maior consumo pode ser explicado pelo fato de que na fase de estabelecimento os fatores atmosféricos e do solo possuem maior participação do que os fatores da cultura na variação dos componentes do balanço de energia (Oliveira *et al.*, 2009). Em torno de 90 DAC (início da fase de perfilhamento) pode-se perceber que o LE se transforma no maior consumidor da energia disponível, enquanto que o G mantém suas médias reduzidas durante todo o período. As médias diurnas dos fluxos durante o ciclo da cana-de-açúcar para Rn, LE, H e G foram de 24,57; 12,94; 9,21 e 2,43 MJ·m⁻²/dia, respectivamente. Observa-se que a maior parte da energia disponível (Rn) foi consumida pelo fluxo de calor latente (LE), sendo a porcentagem média de 53%. A partição entre o fluxo de calor sensível e o saldo de radiação, apresentou o valor médio diurno durante o ciclo de 37%, enquanto que o G consumiu na média 10% da energia disponível. Estes resultados concordam com os obtidos em vários trabalhos com balanço de energia em culturas anuais e perenes, que concluíram que a maior porção do saldo de radiação é transformada em fluxo de calor latente (Cunha *et al.*, 1994; Teixeira, 2001; Souza *et al.*, 2008;

Oliveira *et al.*, 2009; André *et al.*, 2010).

Na fase de estabelecimento, o H foi o maior consumidor da energia disponível, correspondendo a 63% do Rn. O LE representou apenas 18% da energia disponível. Observa-se que no período inicial do cultivo da cana-de-açúcar o G obteve sua maior proporção no consumo do saldo de radiação (19%), concordando com Lima *et al.* (2005), que também observaram o maior consumo do Rn com o G na primeira fase de desenvolvimento do feijão-caupi. As médias diurnas dos fluxos de energia (Rn, LE, G e H, respectivamente) para esta fase foram de 20,33; 3,66; 3,92 e 12,75 MJ·m⁻²/dia. Durante o perfilhamento da cultura da

cana-de-açúcar, pode-se perceber que o LE aumenta sua participação no consumo de Rn, sendo responsável por 43% do mesmo. O H correspondeu a 42% do Rn, enquanto que o G, 15%. As médias diurnas para este estágio foram de 23,97; 10,38; 3,64 e 9,95 MJ·m⁻²/dia para o Rn, o LE, o G e o H, respectivamente.

Na Tabela II está apresentado o resumo dos termos do balanço de energia para os dias de coleta de campo. Para o estágio de perfilhamento, foram realizadas duas coletas de campo, uma aos 85 e outra aos 102 DAC. Percebe-se que aos 85 DAC a maior parte da energia foi destinada ao H, sendo o IAF de 1,2. Aos 102 DAC, com a maior cobertura do solo, re-

presentada pelo maior IAF (1,6), observa-se que o LE é o maior consumidor da energia disponível com 51%.

Durante o estágio de desenvolvimento dos colmos, observou-se que o LE correspondeu à maior parte do Rn, em todo o período, representando na média 62% da energia disponível. Andre *et al.* (2010) estudando o balanço de energia para a na região de Campos dos Goytacazes, encontraram para os dias analisados durante a fase de desenvolvimento dos colmos, o consumo de 86% do Rn pelo LE, em cultivo que não sofreu estresse hídrico. A menor taxa observada no presente estudo pode ser devido ao período prolongado de estiagem (55 dias) que ocorreu logo no início desta fase, correspondendo a 43% da etapa de desenvolvimento dos colmos. O H representou 31% do consumo de Rn e o G médio foi de 7% da energia disponível. Os valores médios dos fluxos energéticos durante o desenvolvimento de colmos foram de 30,17; 18,68; 9,46 e 2,03 MJ·m⁻²/dia para Rn, LE, H e G, respectivamente.

Para os dias em que ocorreram as coletas de campo durante a fase de desenvolvimento dos colmos observou-se que o LE se mantém como o principal consumidor do Rn, mesmo durante a estiagem. Durante o período seco foram analisados os 128 e os 149 DAC. Observa-se que para estes dias a porcentagem média de energia consumida por LE foi de 60% do Rn. Para o H, o consumo de energia para os 128 DAC foi de 37%, enquanto que para o G foi de 3%. Observa-se que o IAF para este dia foi de 2,5. Aos 149 DAC o H foi responsável pelo consumo de 29% da energia disponível e o G por 10%. O IAF para este dia foi de 2,3. O menor grau de cobertura do solo, representado pela redução do IAF pode estar relacionado ao acréscimo do G.

TABELA II
TERMOS DO BALANÇO DE ENERGIA PARA O PERÍODO DIURNO DOS DIAS DE COLETA (DAC): SALDO DE RADIAÇÃO, FLUXO DE CALOR LATENTE, FLUXO DE CALOR SENSÍVEL E FLUXO DE CALOR NO SOLO, E ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF)

DAC	IAF	Rn	LE	H	G	LE/Rn	H/Rn	G/Rn
85	1,2	36,64	11,80	22,19	2,65	0,32	0,61	0,07
102	1,6	37,02	18,89	12,07	6,06	0,51	0,33	0,16
128	2,5	38,88	23,30	14,35	1,24	0,60	0,37	0,03
149	2,3	36,70	22,61	10,33	3,75	0,62	0,28	0,10
174	2,8	32,33	25,18	5,01	2,15	0,78	0,15	0,07
194	2,9	33,49	20,91	11,99	0,58	0,62	0,36	0,02
215	3,5	24,01	17,82	6,46	1,58	0,74	0,19	0,07
235	3,7	22,02	16,74	4,54	0,75	0,76	0,21	0,03
255	3,4	17,15	11,27	5,00	0,88	0,66	0,29	0,05
280	2,5	18,31	9,09	8,40	0,83	0,50	0,46	0,04

Rn, LE, H e G em MJ·m⁻²/dia, respectivamente.

Após o período de estiação foram feitas mais quatro observações durante o desenvolvimento dos colmos. Observa-se que para estes dias selecionados o grau de cobertura do solo é maior em relação aos dias analisados anteriormente e a disponibilidade hídrica também. O IAF para os 174, 194, 215 e 235 DAC, respectivamente, foi de 2,8, 2,9, 3,5 e 3,7, este último sendo o IAF máximo observado durante o ciclo da cana-de-açúcar. A média de consumo do Rn pelo LE para estes dias foi de 72,5%. Para os 194 DAC observou-se que o LE foi menor em relação à média. Este fato pode ser explicado pela ocorrência de chuva neste dia. A média do consumo de H para os dias analisados foi de 22,75% do Rn e para o G foi de 4,75%.

Observou-se durante o ciclo da cana-de-açúcar que os fluxos energéticos sofreram decréscimo ao longo do cultivo, fato associado à disponibilidade de energia na região, que foi maior no início, apresentando um maior fotoperíodo, e menor ao final do ciclo da cultura, mesma condição encontrada por Souza *et al.* (2008). As médias diurnas dos fluxos de energia durante a fase de maturação da cana-de-açúcar foram, respectivamente, para Rn, LE, H e G de 15,90; 10,49; 4,80 e 0,60MJ·m⁻²/dia.

Nos 255 DAC observa-se que o IAF foi de 3,4 e o LE consumiu 66% do Rn. O H correspondeu a 29% da energia disponível, enquanto que o G consumiu 5%. Para os 280 DAC o IAF decresceu, sendo acompanhado também do decréscimo do LE, que para este dia consumiu 50% da energia disponível. Observa-se que há acréscimo do H, representando 46% do Rn. O G para este dia foi de 4% da energia disponível. As menores taxas observadas em relação ao LE podem estar associadas à menor transpiração

das plantas devido à redução da área foliar e das taxas de crescimento deste período.

Conclusões

A partição da energia disponível variou com as etapas de desenvolvimento da cana-de-açúcar e com a disponibilidade hídrica da região de estudo. Observou-se que na fase de estabelecimento da cultura a maior parte da energia foi consumida pelo fluxo de calor sensível (63%). No entanto, com incremento das taxas de crescimento e por conseguinte, aumento da cobertura do solo (maior IAF) o fluxo de calor latente se tornou o principal consumidor do saldo de radiação.

Durante um período prolongado de baixa disponibilidade hídrica, na fase de desenvolvimento dos colmos, observou-se que com a redução da cobertura do solo, representada pelo menor IAF, houve queda tanto em relação às taxas de crescimento, como no consumo da energia pelo fluxo de calor latente, demonstrando sua interdependência.

Durante todo o ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar o saldo de radiação foi consumido, na média, nas seguintes porcentagens: 53% pelo fluxo de calor latente; 37% pelo fluxo de calor sensível; e 10% pelo fluxo de calor no solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia e à Fundação Carlos Chagas Filho de Ampara a Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, pelo auxílio financeiro e bolsas de estudo concedidas.

REFERÊNCIAS

Abdelhadi AW, Hata T, Tanakamaru H., Tada A, Tariq M.A (2000) Estimation of crop water requirements in arid region using Penman-Monteith equation with derived crop coefficients: a case

study on Acala cotton in Sudan Gezira irrigated scheme. *Agric. Water Manag.* 45: 203-214.

Almeida ACS, Souza JL, Teodoro I, Barbosa JVS, Moura Filho G, Ferreira Júnior RA (2008) Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. *Ciênc. Agrotéc.* 32: 1441-1448.

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. (1998) *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements*. Irrigation and Drainage Paper 56. UN Food and Agriculture Organization. Roma, Italia. 301 pp.

Allen RG, Jensen ME, Wright JL, Burman RD (1989) Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J.* 81: 650-662.

André RGB, Mendonça JC, Pinheiro FMA, Marques VS, Marques J (2010) Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar parte 2: balanço de energia e parâmetros derivados. *Rev. Bras. Meteorol.* 25: 535-542.

Borges CJR, Azevedo PV, Silva VPR, Campos JHB, Moura MSB, Soares JM, Silva BB (2008) Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.* 12: 393-399.

Cunha GR, Bergamaschi H (1994) Balanço de energia em alfafa. *Rev. Bras. Agrometeorol.* 2: 9-16.

EMBRAPA (2006) *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2ª ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Rio de Janeiro, Brasil. 306 pp.

Farias CHA, Fernandes PD, Azevedo HM, Neto JD (2008) Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.* 12: 356-362.

Fontana DC, Berlatto MA, Bergamashi H (1991) Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. *Pesq. Agropec. Bras.* 36: 403-410.

Keating BA, Robertson MJ, Muchow RC, Huth NI (1999) Modelling sugarcane production systems I: Development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Res.* 48: 27-36.

Moura MSB (2005) *Consumo Hídrico, Produtividade e Qualidade de Fruto da Goiabeira*

Irrigada na Região do Submédio São Francisco. Tese. Universidade Federal da Paraíba, Brasil. 122 pp.

Monteith JL (1972) Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9: 747-766.

Monteith JL (1981) Evaporation and surface temperature. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 107: 1-27.

Oliveira IA, Lima JRS, Silva IF, Antonino ACD, Neto GCG, Lira CABO (2009) Balanço de energia em mamona cultivada em condições de sequeiro no Brejo Paraibano. *Rev. Bras. Cs. Agr.* 4: 185-191.

Oliveira RA, Daros E, Zambon JLC, Weber H, Ido OT, Bessalhoc-Filho JC, Zuffellato-Ribas KC, Silva DKT (2007) Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. *Pesq. Agropec. Trop.* 37: 71-76.

Ortega-Farias SO, Oliosio A, Fuentes S, Valdes H (2006) Latent heat flux over a furrow-irrigated tomato crop using Penman-Monteith equation with a variable surface canopy resistance. *Agric. Water Manag.* 82: 421-432.

Pereira AB, Villa Nova NA, Alfaro AT (2009) Necessidades hídricas de citros e macieiras a partir da área foliar e da energia solar. *Rev. Bras. Fruticult.* 31: 671-679.

Rodrigues HJB (2006) *Balanço de Radiação, Energia e Fluxo de CO₂ em Ecossistema de Manguezal na Amazônia*. Tese. Universidade Federal de Viçosa, Brasil. 202 pp.

Silva TJA, Folegatti MV, Silva CR, Alves Junior J, Bonfim-Silva EM (2007) Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de Bowen. *Eng. Agric.* 27: 392-403.

Souza CB, Silva BB, Azevedo PV, Silva VPR (2008) Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.* 12: 400-407.

Taiz L, Zeiger E (2002) *Plant Physiology*. 3ª ed. Sinauer. Sunderland, MA, EEUU. 798 pp.

Teixeira AHC (2001) Avaliação dos componentes do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.* 5: 28-32.

Toledo Filho MR (2001) *Estudo Micrometeorológico de um Cultivo de Cana-de-Açúcar em Alagoas*. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. 168 pp.