



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Estimativa do saldo de radiação em cultivo irrigado de cana-de-açúcar utilizando dados de sensoriamento remoto orbital

Pamella Crisley Costa de Sá¹, José Espínola Sobrinho², Saulo Tasso Araújo da Silva², Rafael da Costa Ferreira³, Magna Soelma Beserra de Moura⁴

¹Mestre em Manejo de Solo e Água, Universidade Federal Rural do Semi-Árido-UFERSA, Mossoró-RN. E-mail para correspondência: pamellacrisley@yahoo.com.br (Sá, P.C.C). ²Prof. da Universidade Federal Rural do Semi-Árido-UFERSA, Mossoró-RN. E-mail: jespinoia@ufersa.edu.br, saulo@ufersa.edu.br. ³Prof. da Universidade Federal Rural do Semi-Árido-UFERSA, Angicos-RN. E-mail: rafael@ufersa.edu.br. ⁴Pesquisadora da Embrapa Semiárido. E-mail: magna.moura@embrapa.br.

Artigo recebido em 06/05/2016 e aceito em 14/09/2016

RESUMO

O emprego de técnicas de sensoriamento remoto para estudos de radiação solar, juntamente com dados de superfície, tem sido indispensável à estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração em várias escalas de tempo e espaço. Assim, objetivou-se determinar os componentes do balanço de radiação em área de cana-de-açúcar a partir de produtos MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e do modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) e validá-los com dados obtidos à superfície em área produtiva de cana-de-açúcar irrigada pertencente à empresa Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A - Agrovale no município de Juazeiro - BA. Foram utilizados dados espectrais de quatro imagens MODIS, uma para cada fase fenológica da cultura; e medições à superfície dos componentes do balanço de radiação sobre o canal. Não houve nenhuma condição atípica no comportamento dos componentes do balanço de radiação obtidos à superfície, quando se consideraram os diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, embora seus valores absolutos tenham sido diferentes. Os termos do balanço de radiação observados na área de estudo por meio de imagens MODIS, aplicando o modelo SEBAL, foram consistentes e próximos daqueles medidos à superfície, exceto para o albedo que apresentou erros de 54,5%, 50%, 11,7% e 26% para os dias representativos das fases de brotação e emergência, perfilhamento e estabelecimento da cultura, crescimento e desenvolvimento dos colmos e maturação, respectivamente. Conclui-se, que o sensoriamento remoto pode ser usado na determinação dos componentes do balanço de radiação utilizando imagens MODIS.

Palavras-chave: Fluxo radiativo; evapotranspiração; saldo de radiação.

Estimate of radiation balance on crop irrigation for cane sugar using remote sensing data orbital

ABSTRACT

The use of remote sensing techniques for solar radiation studies, associated to surface data have been indispensable to estimate the energy balance components and the evapotranspiration at various scales of time and space. Thus, the aim of this study was to determine the components of the radiation balance in sugarcane area from MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) and SEBAL model (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) and validate them with data to the surface in an irrigated commercial area of sugarcane belonging to the company Agribusiness of the São Francisco Valley S. A - Agrovale in Juazeiro - BA, Brazil. It was non usual condition in the behavior of the terms of the radiation balance obtained on the surface, when considering the different growth stages although the absolute values of the terms were different. The terms of the radiation balance found in the study area using MODIS images applying SEBAL model showed consistent and similar values to those found on the surface except for the albedo that had errors of 54.5%, 50%, 11.7% and 26% for days which corresponded to phenological phases of budding and emergency, tillering and crop establishment, growth and maximum development and maturation, respectively. It follows, therefore, that the remote sensing may be used in determining the components of the radiation balance associated to MODIS images.

Keywords: Radiative flux; evapotranspiration; radiation balance.

Introdução

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo (CONAB, 2015). Essa posição privilegiada é decorrência do crescimento da produção de açúcar e álcool devido ao aumento do uso de álcool combustível, em virtude do surgimento dos veículos biocombustíveis e por ser uma forma de energia limpa e renovável, haja vista que a queima da cana como combustível lança menos CO₂ na atmosfera que os combustíveis fósseis, bem como em função do crescimento das exportações de açúcar que, juntos marcam a importância da cultura na economia brasileira e trazem sempre ótimas perspectivas para o setor sucroalcooleiro.

Entretanto, essa atividade vem passando por problemas provenientes, principalmente, da variabilidade climática que causa queda na produção e, conseqüentemente, na produtividade, ao passo que o mercado exige quantidade e qualidade a custos cada vez menores, impondo ao setor a necessidade de estudos para contornar as limitações climáticas de algumas regiões de modo a possibilitar uma produção contínua de forma a equilibrar o mercado em um cenário exigente e de crescente demanda.

No Brasil a cana-de-açúcar é cultivada em todas as regiões e submetida a diferentes condições climáticas devido à grande extensão territorial do mesmo. Certas regiões possuem clima favorável, sem restrição alguma, enquanto outras apresentam restrições térmicas e/ou hídricas moderadas, que permitem a produção econômica da cultura sem exigir recursos e técnicas especiais. Entretanto, há aquelas que apresentam restrições limitantes e somente o cultivo de variedades selecionadas e o emprego de recursos extras podem corrigir as deficiências hídricas ou técnicas, viabilizando economicamente a atividade canavieira (André et al., 2010).

A distribuição da precipitação durante o ano é de suma importância para o desenvolvimento da cultura, pois pode acarretar déficit hídrico nos diferentes estádios implicando em decréscimos na produtividade devido à redução nos perfilhos, na área foliar e no crescimento dos colmos, além de estimular a senescência. Outros fatores responsáveis e determinantes na intensidade do perfilhamento são a temperatura e a radiação solar, acrescidos da variedade utilizada, da densidade do

plântio e do ciclo (cana-planta ou soca), assim como a disponibilidade de nitrogênio no solo.

Para o problema da disponibilidade de água devido à escassez de chuva dispõe-se da irrigação, que é uma solução eficaz para suprir as necessidades hídricas das plantas. Porém, em regiões onde a água é fator limitante, que é o caso do Semiárido brasileiro, otimizar a utilização desse recurso é fundamental, uma vez que a condição climática não favorece a oferta de água e o custo advindo dos processos de irrigação são um dos principais responsáveis por elevar o custo final da produção.

Para Borges (2011) o manejo eficiente da água na irrigação deve considerar a aplicação da menor quantidade de água possível de maneira a promover uma boa produção e conservação do solo, garantindo a sustentabilidade destes recursos. Para tal, se faz necessário o estudo do comportamento evapotranspirativo das áreas cultivadas por meio do conhecimento dos fluxos radiativos no sistema solo-planta-atmosfera, que têm como base a determinação dos componentes do balanço de radiação.

Desta forma, objetivou-se determinar os componentes do balanço de radiação em área de cana-de-açúcar a partir de dados MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e validar os resultados obtidos por meio de imagens orbitais com os dados obtidos à superfície

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi conduzido em área de produção comercial de cana-de-açúcar irrigada pertencente à empresa Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A (Agrovale) (latitude 09°27'11" S; longitude 40°19'58" O e altitude de 396 m), no município de Juazeiro-BA, com classificação climática segundo Koppen, de BSw^h, semiárido quente, com chuvas de verão e período seco bem definido no inverno. A temperatura média da região é de 26,1°C, a pluviosidade média anual de 503,08 mm e a umidade relativa média de 65,2%. Por estar inserida na bacia do Rio São Francisco a região apresenta elevado potencial hídrico, porém não há excedente hídrico no solo, o que impõe a necessidade de realização de irrigação suplementar.

A variedade de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* ssp) trabalhada na área de estudo foi a RB 92579, principal variedade explorada pela empresa e na região Nordeste do país, cultivada em um Vertissolo em espaçamento

duplo de 1,2 m por 0,6 m, irrigada por gotejamento subsuperficial, com 28 gotejadores enterrados a 0,20 m da superfície do solo. O plantio ocorreu no vigésimo segundo dia do mês de outubro do ano de 2009 e a colheita no décimo oitavo dia do mês de novembro de 2010.

Dados micrometeorológicos

A torre micrometeorológica foi instalada no centro da parcela de cultivo, e estava equipada com um saldo radiômetro, modelo CNR1 (Campbell Scientific INC, Logan, Utah, USA), para medida dos quatro componentes do balanço de radiação; dois sensores para o cômputo do fluxo de calor no solo (Modelo HFT3, marca Campbell Scientific, Inc, Logan, Utah, USA), localizados entre e dentro das fileiras a 2 cm de profundidade; dois psicrômetros com manutenção realizada semanalmente com alturas variando de acordo com o desenvolvimento da cultura. Os dados de precipitação foram obtidos a partir de um pluviômetro modelo CS700-L (Hydrological Services Rain Gage, Liverpool, Austrália), instalado no topo da torre micrometeorológica. A leitura e armazenamento dos dados foram

realizados por meio de um sistema de aquisição de dados do tipo datalogger CR23X (Campbell Scientific INC, Logan, Utah, USA), programado para realizar leituras a cada 30 segundos, armazenando valores médios a cada 15 minutos, conectado a uma placa multiplexadora modelo AM16/32 (Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA).

Dados orbitais

Foram utilizadas quatro imagens MODIS/TERRA, uma para cada fase fenológica da cultura da cana-de-açúcar como mostra a (Tabela 1). Para aquisição das imagens foi levada em consideração a disponibilidade de dados de superfície e a ausência ou mínima presença de nebulosidade. Os dados/produtos utilizados foram disponibilizados sem nenhum custo pela NASA EOSDIS *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, disponível no site <https://lpdaac.usgs.gov/>. Neste trabalho as imagens corresponderam ao *Tiles h14v09* como mostra a (Figura 1).

Tabela 1. Datas das imagens MODIS correspondentes às fases fenológicas da cana-de-açúcar, sua duração em dias, número do dia após o plantio (DAP) e dia sequencial do ano (DAS).

Fase fenológica	Duração (dias)	Data das imagens	DAP	DAS
Fase 1 (brotação e emergência)	30	09/11/2009	18 dias	313
Fase 2 (perfilhamento e estabelecimento da cultura)	66	09/12/2009	48 dias	343
Fase 3 (crescimento e desenvolvimento dos colmos)	186	11/03/2010	140 dias	70
Fase 4 (maturação)	104	03/10/2010	346 dias	276
Ciclo	386 dias			

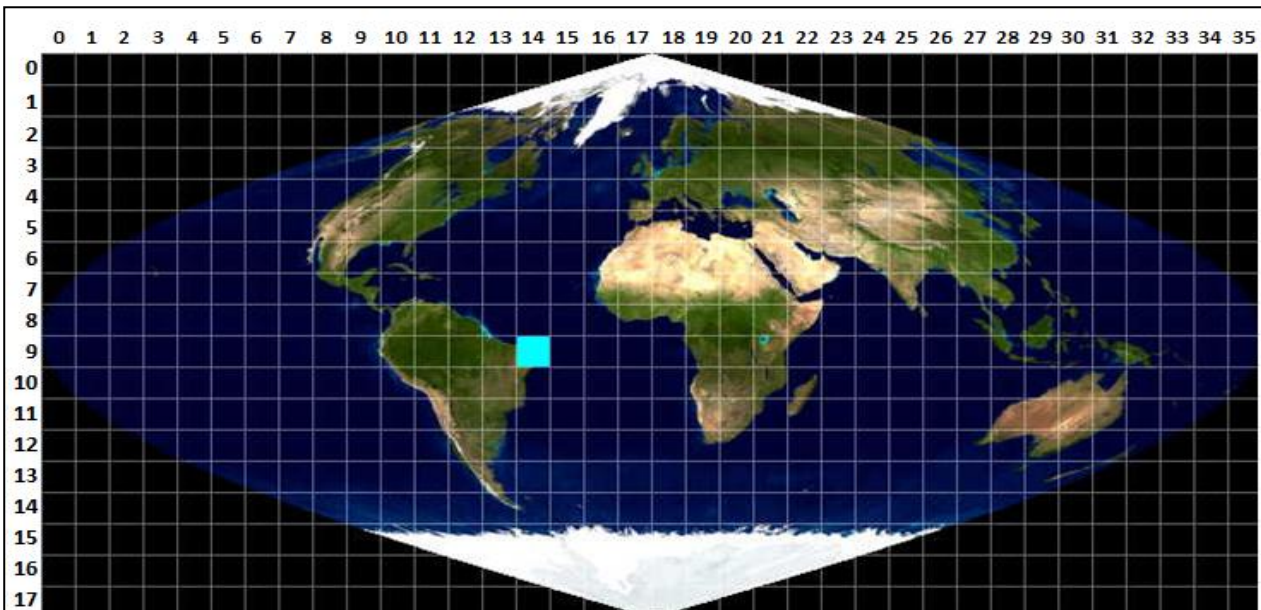


Figura 1. Representação do *tiles* h14v09.

Fonte: Adaptado do *MODISReprojection Tool*

Os produtos MODIS utilizados estão apresentados na Tabela 2, com seus respectivos fatores de correção que são necessários para a conversão dos valores originais em dados de temperatura (K), e de reflectância, dentre outros.

Os dados MODIS/TERRA foram inicialmente tratados em um programa específico desenvolvido pela NASA, disponível gratuitamente, MRT (*MODISReprojection Tool*) como mostra a (Figura 2) e disponibilizado no

endereço https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool, onde os dados foram reprojetoados para coordenadas geográficas, datum *WorldGeodetic System 84* (WGS84) e convertidos do formato Hdf para Geotiff. No mesmo programa foi realizada, também, a reamostragem dos *pixels* dos produtos MOD09GA (reflectância da superfície e ângulo zenital solar) e MOD11A1 (temperatura da superfície) para 250 m, de modo a padronizar a resolução espacial das estimativas para posterior processamento.

Tabela 2. Descrição dos produtos MODIS utilizados, fator multiplicativo e resolução espacial.

Produto	Descrição	Fator multiplicativo	Resolução espacial	Unidades
MOD09GQ	Reflectância da superfície	0,0001	250 m	Reflectância
MOD09GA	Reflectância da superfície	0,0001	500 m	Reflectância
	Ângulo zenital solar	0,01	1 km	Grau
MOD11A1	Temperatura da superfície	0,02	1 km	Kelvin
	Hora da passagem do satélite	0,1	1 km	Hora

Fonte: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table

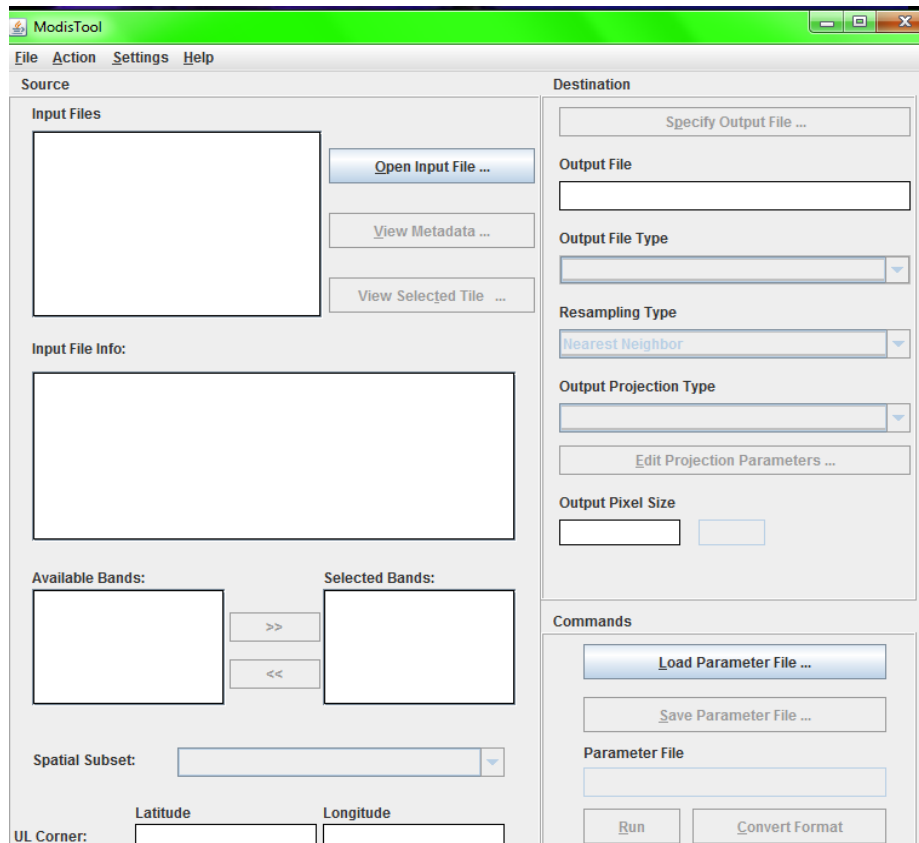


Figura 3. Ferramenta MODIS Reprojection Tool (MRT) para conversão de dados HDF para HDR ou GEOTIFF e reamostragem.

Balanco de Radiação por Sensoriamento Remoto

O balanço de radiação para o momento da passagem do sensor MODIS/TERRA foi estimado partindo-se dos valores de reflectância in-band da superfície contidos nos dados/produtos conforme descrito a seguir (Bastiaanssen, 1995):

$$R_n = (1 - \alpha_s)K_{\downarrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} - (1 - \epsilon_s)L$$

em que R_n é o balanço de radiação à superfície ($W m^{-2}$), α_s é o albedo da superfície, K_{\downarrow} representa a radiação solar incidente à superfície ($W m^{-2}$), L_{\downarrow} é a radiação de onda longa incidente à superfície ($W m^{-2}$), L_{\uparrow} é a radiação de onda longa emitida pela superfície ($W m^{-2}$) e ϵ_s é a emissividade da superfície.

A estimativa do albedo da superfície foi

Tabela 3. Pesos atribuídos às bandas do sensor MODIS no cálculo do albedo de superfície segundo o modelo Tasumi et al. (2008).

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Cte
Tasumi	0,215	0,215	0,242	0,129	0,101	0,062	0,036	-

Para o cálculo da emissividade da superfície, primeiramente foi necessário calcular três índices de vegetação: o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e o índice de área foliar (IAF). O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) foi obtido por meio da razão

realizada utilizando-se o modelo proposto por Tasumi et al. (2008), calculado como uma média ponderada das reflectâncias das bandas de 1 a 7 do sensor MODIS. O peso atribuído a cada banda consta na Tabela 3 e representa a fração de toda radiação solar de onda curta que chega à superfície da Terra que está compreendida no intervalo espectral da mesma (Tasumi et al., 2008):

$$\alpha = \left(\sum_{b=1}^7 [\rho_b \cdot w_b] \right) + cte$$

em que ρ_b é a reflectância de cada banda do sensor MODIS, w_b é o respectivo peso na média ponderada e “cte” é um fator de ajuste constante somado à média ponderada.

entre a diferença das reflectâncias nas faixas do infravermelho próximo (IV) e do vermelho (V) pela soma das mesmas. O NDVI é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores variam de -1 a +1 e para superfícies com alguma vegetação o NDVI varia

entre 0 e 1; enquanto para água e nuvens o NDVI geralmente é menor que zero.

$$NDVI = \frac{\rho IV_2 - \rho V_1}{\rho IV_2 + \rho V_1}$$

onde ρ_1 e ρ_2 são as reflectâncias nas bandas 1 e 2 do sensor MODIS.

Para o cálculo do Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index - SAVI*) (Huete, 1988), que é um índice que busca amenizar os efeitos do “background” do solo do NDVI, foi utilizada a equação a seguir:

$$SAVI = (1 + \delta) \frac{\rho IV_2 - \rho V_1}{\delta + \rho IV_2 + \rho V_1}$$

em que ρIV é a reflectância na banda do infravermelho próximo, ρV é a reflectância na banda do vermelho e δ é uma constante de ajuste em função do tipo de solo, cujo valor mais comumente referenciado é 0,5 (Huete 1988; Boegh et al., 2002), e portanto, também foi adotado nesta pesquisa.

Após o cálculo do NDVI e do SAVI, calculou-se o Índice de Área Foliar (IAF), que é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. O IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem e o mesmo foi computado pela seguinte equação empírica apresentada em Allen et al., (2010):

$$\begin{aligned} \text{Para SAVI} \leq 0,817 & \quad IAF = 11 * SAVI^3 \\ \text{Para SAVI} > 0,817 & \quad IAF = 6 \end{aligned}$$

Assim, para o cômputo da emissividade da superfície a partir dos índices de vegetação, Allen et al., (2002) propuseram a aplicação da equação que segue. Porém, a mesma só é válida para os *pixels* que apresentarem NDVI maior que zero. Para os *pixels* com NDVI negativo, será $\varepsilon_s = 0,985$ (Allen et al., 2002).

$$\varepsilon_s = 0,95 + 0,01 * IAF$$

A radiação solar incidente foi calculada por meio da expressão:

$$K \downarrow = \tau S_0 \left(\frac{dn}{d} \right)^2 \cos \theta_z$$

em que S_0 corresponde a constante solar (1367 W m^{-2}), θ_z o ângulo zenital solar em (radianos), obtido do produto MOD09GA, dn e d são, respectivamente, as distâncias média e instantânea entre a Terra e o Sol e τ corresponde a transmitância da atmosfera no instante da passagem do satélite.

O cálculo da transmitância atmosférica se deu de acordo com Allen et al., (2007):

$$\tau = 0,75 + 2 \times 10^{-5} z$$

em que z é a altitude (m) no *pixel* da torre micrometeorológica utilizada para entrada de dados do SEBAL.

A radiação de onda longa incidente na superfície foi computada a partir da equação de Stefan-Boltzmann (Santos et al., 2011):

$$L \downarrow = \varepsilon_a \sigma T_a^4$$

em que ε_a é a emissividade da atmosfera, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) e T_a é a temperatura do ar próxima à superfície obtida na torre (K).

A emissividade da atmosfera que se insere na equação de Stefan-Boltzmann foi assim calculada:

$$\varepsilon_a = 0,85 ((-\ln \tau)^{0,09})$$

O cômputo da radiação de onda longa emitida pela superfície foi obtida utilizando-se a equação de Stefan-Boltzmann:

$$L \uparrow = \varepsilon_s \sigma T_s^4$$

onde T_s (K) é a temperatura da superfície, obtida do produto MOD11A1.

Após os procedimentos para a obtenção dos termos do balanço de radiação para o instante da passagem do satélite, calculou-se o balanço de radiação médio diário a partir da equação de Slub (Bruin, 1987).

$$Rn_{24H} = (1 - \alpha_s) K \downarrow_{24H} - 110 \tau$$

na qual $K \downarrow_{24H}$ é a média diária de radiação solar incidente na superfície (W m^{-2}) e 110 é um valor constante, expresso em W m^{-2} .

Validação das estimativas

De forma a avaliar a concordância entre os valores observados e modelados foram calculados o viés (VS) e o erro relativo (ER), descritos de acordo com as equações abaixo.

$$VS = (F_{\text{mod}} - F_{\text{obs}})$$

$$ER = 100 \left(\frac{|F_{\text{mod}} - F_{\text{obs}}|}{F_{\text{obs}}} \right)$$

Em que F_{mod} representa a medida do fluxo estimada pelo modelo SEBAL e F_{obs} representa a medida observada no *pixel* da torre micrometeorológica.

Resultados e discussão

As Figuras de 4 a 7 apresentam as variações diárias dos fluxos de radiação, medidos no período diurno (6h às 17h) pela torre micrometeorológica na área produtiva de cana-de-açúcar para quatro dias do ciclo produtivo, sendo um para cada estágio de desenvolvimento da cultura (09/11/2009, 09/12/2009, 11/03/2010 e 03/10/2010).

Ao analisar a variação de $K \downarrow$ (radiação de onda curta incidente) (Figura 4), verificou-se a

ocorrência de nuvens ao longo do dia avaliado, especificamente, das 10h45min às 13h15min, sendo as maiores interferências observadas às 11h45min e 13h15min. Os maiores registros de K_{\downarrow} ocorreram às 11h e 12h15min, com valores máximos de 1043 W m^{-2} e 1040 W m^{-2} respectivamente. Para K_{\uparrow} (radiação de onda curta refletida) os valores máximos ocorreram às 11h e 12h15min, acompanhando a variação de K_{\downarrow} com oscilações menos expressivas em virtude da sua baixa magnitude quando comparada aos demais componentes. A média de K_{\downarrow} e K_{\uparrow} para o período diurno foi, respectivamente de $639,72 \text{ W m}^{-2}$ e $74,88 \text{ W m}^{-2}$.

Durante o período diurno, a L_{\downarrow} (radiação de onda longa incidente) foi inferior a L_{\uparrow} (radiação de onda longa emitida), apresentando valor de 399 W m^{-2} e 563 W m^{-2} , respectivamente. O R_n (saldo de radiação) acompanhou as variações de K_{\downarrow} , que representa o componente de maior influência no balanço de radiação. Os máximos valores de R_n encontrados foram 737 W m^{-2} (11h) e 734 W m^{-2} (12h30min), com média diária de $418,53 \text{ W m}^{-2}$ durante os horários estudados.

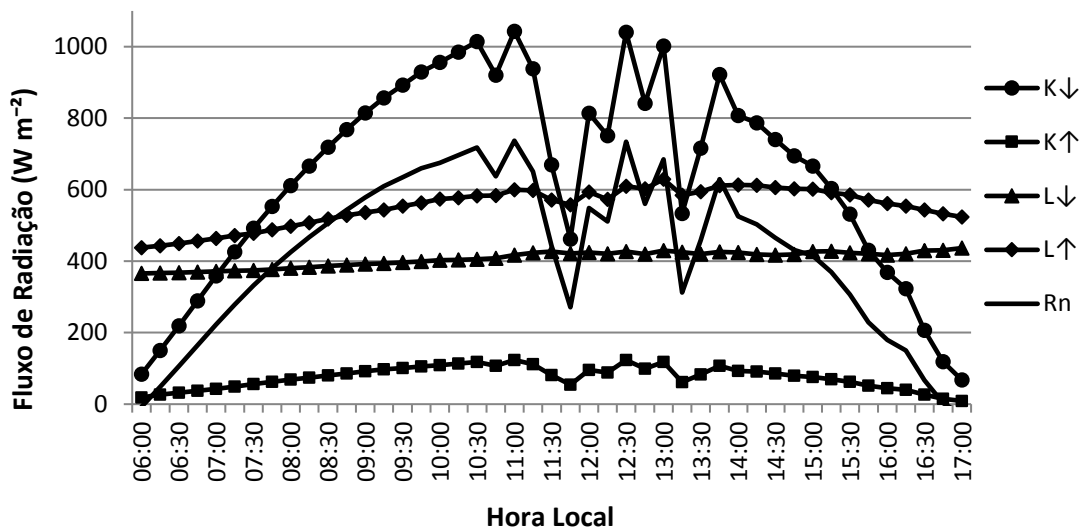


Figura 4. Componentes do balanço de radiação durante o período diurno observados na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar no dia 09/11/2009, Juazeiro, BA.

Para o dia 09/12/2009 (Figura 5), ao se analisar a variação de K_{\downarrow} , verificou-se uma pequena interferência de nuvens às 13h45min e 14h30min, com valores de 804 W m^{-2} e 559 W m^{-2} respectivamente. O maior registro de K_{\downarrow} ocorreu às 11h30min, apresentando valor máximo de 1023 W m^{-2} . O maior registro de K_{\uparrow} ocorreu às 11h30min, apresentando valor máximo de $127,5 \text{ W m}^{-2}$, acompanhando a variação de K_{\downarrow} . A média de K_{\downarrow} e K_{\uparrow} para o período diurno foi, respectivamente de $683,05 \text{ W m}^{-2}$ e $85,98 \text{ W m}^{-2}$.

Durante o período diurno, a L_{\downarrow} foi inferior a L_{\uparrow} , apresentando valor de 394 W m^{-2} e 557 W m^{-2} , respectivamente. O R_n acompanhou as variações de K_{\downarrow} . O máximo valor de R_n encontrado foi às 11h30min (708 W m^{-2}), com média diária de $445,02 \text{ W m}^{-2}$ durante os horários estudados.

De acordo com a (Figura 6) é possível observar que não houve variação de K_{\downarrow} ao longo do dia que caracterizasse nebulosidade. O maior registro de K_{\downarrow} ocorreu às 12h30min, apresentando valor máximo de 1039 W m^{-2} .

Para K_{\uparrow} o maior registro também ocorreu às 12h30min, apresentando valor máximo de $164,6 \text{ W m}^{-2}$. A média de K_{\downarrow} e K_{\uparrow} para o período diurno foi, respectivamente de $670,17 \text{ W m}^{-2}$ e $118,81 \text{ W m}^{-2}$. Durante o período diurno, a L_{\downarrow} foi inferior a L_{\uparrow} , apresentando valor de 407 W m^{-2} e 486 W m^{-2} , respectivamente. O R_n acompanhou as variações de K_{\downarrow} . O máximo valor de R_n encontrado foi às 12h30min (795 W m^{-2}) com média diária de $476,2 \text{ W m}^{-2}$.

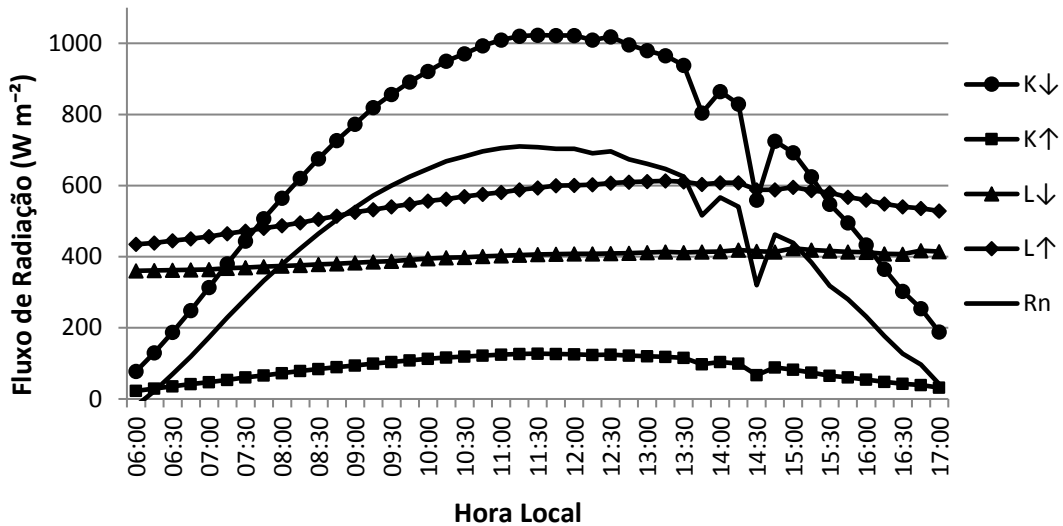


Figura 5. Componentes do balanço de radiação durante o período diurno observados na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 09/12/2009, Juazeiro, BA.

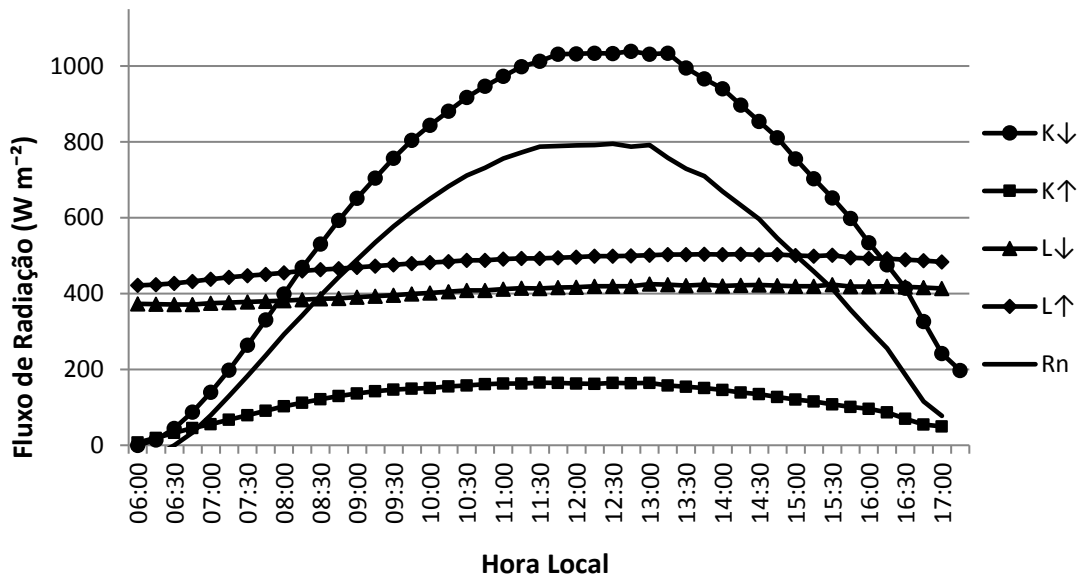


Figura 6. Componentes do balanço de radiação durante o período diurno observados na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 11/03/2010, Juazeiro, BA.

Para o final do ciclo da cana-de-açúcar (Figura 4) observou-se a condição de céu claro, sem variação de K_{\downarrow} ao longo dos horários estudados que indicasse presença de nebulosidade. O maior registro de K_{\downarrow} ocorreu às 11h45min, apresentando valor máximo de 1027 W m^{-2} . Para K_{\uparrow} o maior registro ocorreu às 11h15min, apresentando valor máximo de $200,8 \text{ W m}^{-2}$.

A média de K_{\uparrow} e K_{\downarrow} para o período diurno foi, respectivamente de $137,39 \text{ W m}^{-2}$ e $655,56 \text{ W m}^{-2}$. Durante o período diurno, a L_{\downarrow} foi inferior a L_{\uparrow} , apresentando valor de 383 W m^{-2} e 499 W m^{-2} , respectivamente. O R_n acompanhou as variações de K_{\downarrow} e o máximo valor de R_n encontrado foi às 11h45min (705 W m^{-2}) com média diária de $413,58 \text{ W m}^{-2}$ durante os horários estudados.

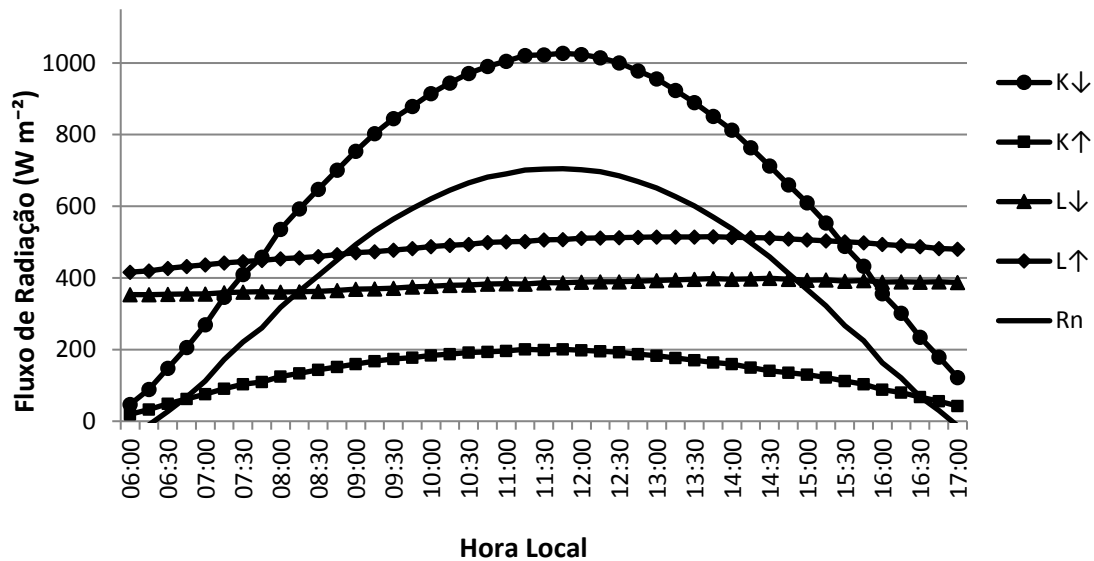


Figura 7. Componentes do balanço de radiação durante o período diurno observados na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar em 03/10/2010, Juazeiro, BA.

Foi possível observar também, que os valores mais elevados ao longo do dia de $L\uparrow$ foram obtidos no início do ciclo da cultura, como apresentado nas Figuras 4 e 5, que é quando a cultura está se desenvolvendo e não tem porte suficiente para sombrear a superfície do solo, com isso, a radiação será mais absorvida pela superfície e menos refletida, contudo a radiação que foi absorvida será posteriormente reemitida em direção a atmosfera terrestre.

As médias diárias de $L\uparrow$ durante os horários estudados para as Fases I, II, III e IV foram respectivamente iguais a 553 W m^{-2} ; 549 W m^{-2} ; $479,7 \text{ W m}^{-2}$; 484 W m^{-2} . O aumento na média de $L\uparrow$ na fase IV se deveu ao fato de que nesse momento a cultura começa a ter uma queda na produção da biomassa, amarelecimento e secagem, das folhas, redução na produção de folhas devido ao corte no fornecimento de água e consequentemente aumento do grau de exposição do solo e dos colmos da cana-de-açúcar.

O contrário ocorreu em $K\uparrow$, onde os maiores valores foram observados no final do ciclo da cultura (Figuras 6 e 7), exatamente quando a cultura já se desenvolveu suficientemente para sombrear a superfície do solo. Desta forma a energia absorvida pelo sistema é inversamente proporcional a energia refletida pela superfície.

Já as médias diárias de $K\uparrow$ para os dias correspondentes as Fases I, II, III e IV foram respectivamente: $74,88 \text{ W m}^{-2}$; $85,98 \text{ W m}^{-2}$;

$118,81 \text{ W m}^{-2}$; $137,39 \text{ W m}^{-2}$. Indicando que quanto mais massa verde a cultura tiver, maior sua reflexão.

As Figuras de 8 a 11 apresentam o albedo medido no período diurno (6h às 17h) na torre micrometeorológica na área produtiva de cana-de-açúcar para os dias 09/11/2009, 09/12/2009, 11/03/2010 e 03/10/2010), respectivamente representativos das fases fenológicas I, II, III e IV.

Ao se analisar o comportamento do albedo, observou-se para todas as datas estudadas que os maiores valores de albedo ocorreram nas primeiras horas da manhã e no final da tarde. André et al. (2010) atribui essa tendência à dependência desta variável ao ângulo de elevação solar. Contudo, é importante saber que outras variáveis influenciam o comportamento do albedo, como: a umidade do solo e da planta, o grau de cobertura do solo, e tipo e quantidade de cobertura de nuvens. O albedo médio diário para o dia 09/11/2009 (Figura 8) que corresponde a fase de brotação e emergência (Fase I) foi de 0,12, nesse estágio de desenvolvimento verificou-se elevada absorção de energia em função do grau de exposição do solo, ao fornecimento de água e ao pouco sombreamento. Essa característica persiste até a fase seguinte (Figura 9) que corresponde ao perfilhamento e estabelecimento da cultura, com albedo médio diário de 0,13.

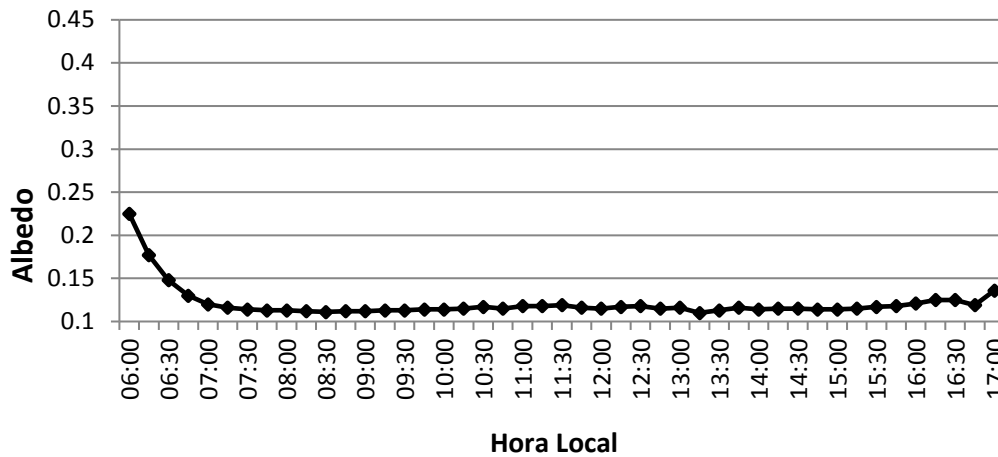


Figura 8. Albedo durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar para o dia 09/11/2009, Juazeiro, BA.

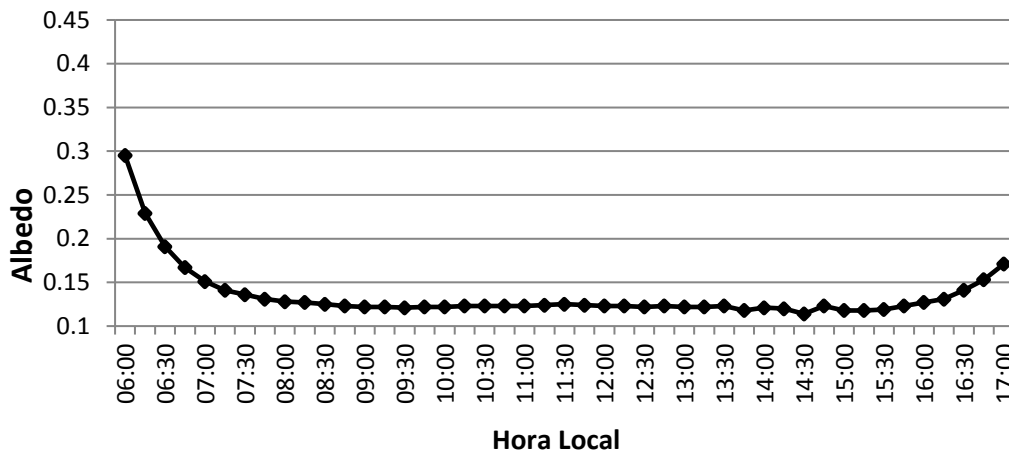


Figura 9. Albedo durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar no dia 09/12/2009, Juazeiro, BA.

Para o dia 11/03/2010 que está inserido na fase que corresponde ao crescimento e desenvolvimento dos colmos (Figura 10) o albedo médio foi de 0,21, nesse momento há influência do sombreamento do solo devido ao desenvolvimento da cultura, com isso, a refletividade da superfície para ondas curtas aumenta mais significativamente em relação às fases anteriores.

O albedo médio para o período de maturação da cana-de-açúcar (Figura 11) representado pelo dia 03/10/2010 foi de 0,23.

Silva et al. (2011) analisando albedo ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada por sulcos, também em Juazeiro, BA, observaram que os menores valores ($0,19 \pm 0,02$) foram constatados no início do ciclo e que os valores do albedo oscilaram entre 0,15 e 0,27, com

valor médio de $0,23 \pm 0,03$ para todo ciclo da cultura.

Juárez (2004) obteve um valor médio de 0,21 para cana-de-açúcar, com variações entre 0,15 e 0,25. Cabral et al. (2003) encontraram valores variando entre 0,12 e 0,32 para a cana-de-açúcar não irrigada, a depender da fase de crescimento da cultura. Estudando a cultura do milho, André (1996), encontrou valores médios de albedo de 0,15 no estágio de desenvolvimento vegetativo, 0,17 no estágio de florescimento e 0,23 na maturação fisiológica, com valor médio para o ciclo da cultura de $0,16 \pm 0,04$. Por outro lado, para a cultura da soja, foram observados valores de albedo médio diário de 0,26 (Fontana et al., 1991).

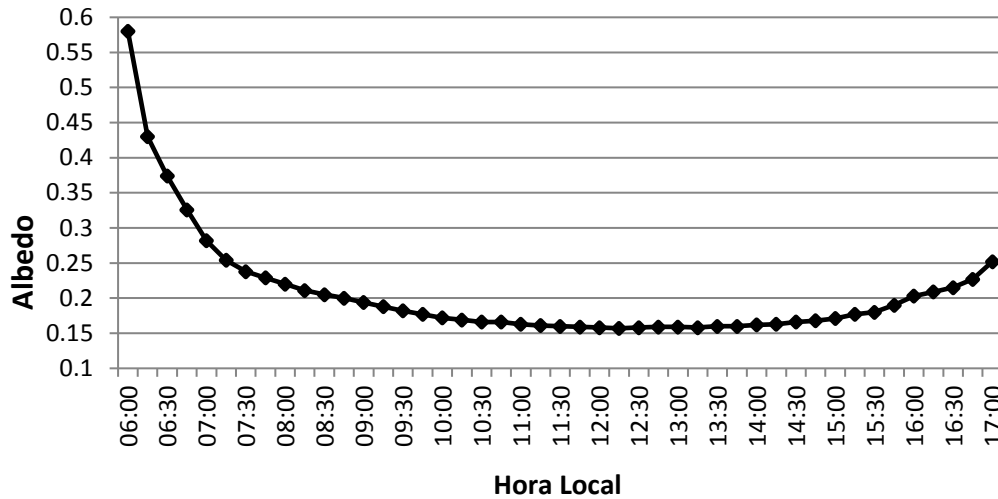


Figura 10. Albedo durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar para o dia 11/03/2010, Juazeiro, BA.

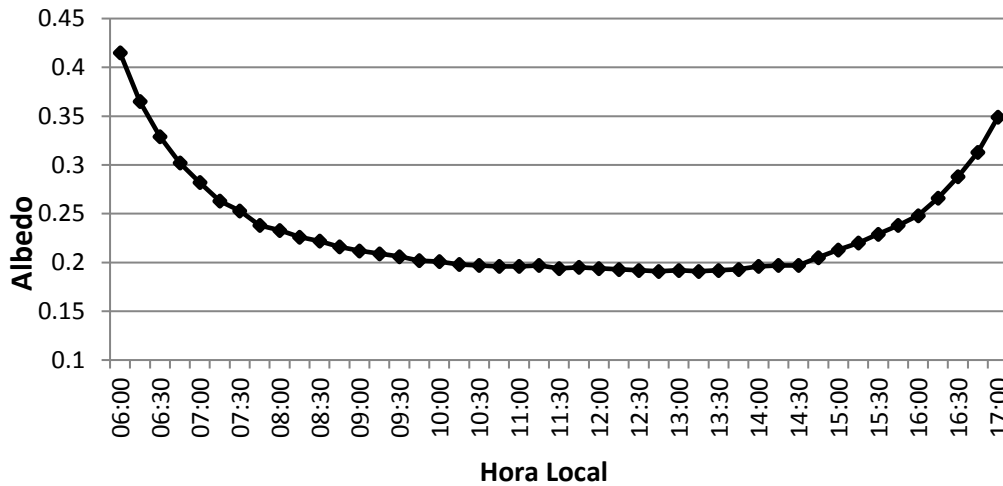


Figura 11. Albedo durante o período diurno na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar para o dia 03/10/2010, Juazeiro, BA.

De um modo geral as medidas de fluxos de superfície obtidas pela torre demonstraram que nos dias 09/11/2009 e 09/12/2009 houve uma interferência de nuvens, enquanto que os dias 11/03/2010 e 03/10/2010 não apresentaram nebulosidade, sendo estes considerados dias de céu-claro. Verificou-se também uma relação de caráter inverso entre R_n e albedo, onde as áreas com maiores valores de R_n estiveram associadas a menores valores de albedo, e vice-versa. Esse aspecto deixa evidente a atuação das propriedades da superfície na reflexão da radiação solar e sua relação com o total de energia disponibilizado aos processos de aquecimento do ar, aquecimento do solo e evapotranspiração.

As Tabelas de 4 a 7 apresentam as concordâncias e o erros relativos existentes entre os valores modelados por meio do sensoriamento remoto a partir de dados MODIS/TERRA, e aqueles observados na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar. De acordo com Sá, P. C. C.; Espínola Sobrinho, J.; Silva, S. T. A.; Ferreira, R. C.; Moura, M. S. B.

os resultados apresentados na Tabela 4 é possível observar que os maiores erros relativos (ERs) foram nas estimativas do albedo e da $L\uparrow$, enquanto os menores ERs ocorreram nas estimativas de $K\downarrow$ e R_n 24h.

O albedo estimado por meio da equação empírica de Tasumi et al. (2008) foi de (0,17) maior que o albedo observado neste trabalho (0,11), apresentando um viés de 0,06 e ER de 54,5%. Oliveira et al. (2015) encontraram para estimativa de albedo em área de cana-de-açúcar aplicando o modelo de Tasumi et al. (2008) em imagens do sensor MODIS um erro relativo de 42%. Alguns trabalhos citam a incompatibilidade entre a medida pontual e a resolução do sensor MODIS como um dos problemas da validação do albedo por meio de produtos desse sensor. O produto MOD09GA, por exemplo, utilizado nesse estudo pode incorporar a resposta espectral de diferentes alvos na superfície, contaminando a reflectância do alvo de interesse. Vale salientar ainda, que quando se tratam de

imagens geradas a partir do sensoriamento remoto, a radiação detectada pelo sensor é causada pela mistura da resposta de diferentes alvos e os efeitos atmosféricos, que podem causar alterações importantes nos dados.

Para $L\uparrow$ verificou-se uma razoável concordância, com ER de 12,4%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL (493 W m^{-2}) ter sido 70 W m^{-2} inferior à medida pela torre micrometeorológica (563 W m^{-2}).

O valor de $L\downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA apresentou erro relativo de 6,3 %, com valor modelado de 374 W m^{-2} e observado de 399 W m^{-2} , o que caracteriza uma boa concordância.

Para o R_n verificou-se ER de 5,5%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL (623 W m^{-2}) ter sido 36 W m^{-2} inferior à medida pela torre micrometeorológica (659 W m^{-2}). Lira (2008) obteve ERs de 9,2% e 18,4% em estimativas de R_n pelo modelo SEBAL em áreas de cana-de-açúcar.

A estimativa de R_n 24h para a área experimental apresentou ER de apenas 3,8%,

superestimando o valor medido pela torre em apenas 6 W m^{-2} . Essa medida de erro é melhor que as obtidas por Ruhoff et al. (2012), que encontraram para estimativas de R_n 24h utilizando dados MODIS (TERRA e AQUA) ERs de 15% e 23%.

O valor de $K\downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA (923 W m^{-2}) apresentou-se muito próximo ao observado na torre micrometeorológica da área experimental (929 W m^{-2}), com ER de 0,6%, o que caracteriza uma excelente concordância.

Oliveira e Moraes (2013) encontraram ER de 0,2% na estimativa de $K\downarrow$ a partir de dados MODIS/TERRA na Amazônia enquanto que Silva et al. (2005) trabalhando com dados medidos na estação micrometeorológica de Bebedouro (PE) e com o satélite TM/Landsat 5 obtiveram ER de 3,2% na estimativa de $K\downarrow$. Esses resultados evidenciaram que a equação de estimativa de $K\downarrow$ utilizada no modelo SEBAL apresenta boa acurácia.

Tabela 4. Medidas de concordância Viés (VS) (W m^{-2}) e Erro Relativo (ER) (%) entre os valores modelados (M) pelo SEBAL, a partir de dados MODIS/TERRA, e observados (O) na torre micrometeorológica da área produtiva de cana-de-açúcar para as seguintes variáveis: albedo (α_s), radiação solar incidente ($K\downarrow$) (W m^{-2}), radiação de onda longa incidente ($L\downarrow$) (W m^{-2}), radiação de onda longa emitida ($L\uparrow$) (W m^{-2}), balanço de radiação (R_n) (W m^{-2}) e balanço de radiação médio diário (R_n 24h) (W m^{-2}) para 09/11/2009.

	α_s		$K\downarrow$		$L\downarrow$		$L\uparrow$		R_n		R_n 24h	
	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O
	0,17	0,11	923	929	374	399	493	563	623	659	164	158
VS	0,06		-6		-25		-70		-36		6	
ER	54,5		0,6		6,3		12,4		5,5		3,8	

É possível observar na Tabela 5 que os maiores erros relativos (ERs) continuaram sendo no albedo e no $L\uparrow$, enquanto que os menores foram nas estimativas de $K\downarrow$ e R_n . O albedo estimado por meio da equação empírica de Tasumi (0,18) foi maior que o albedo observado na torre micrometeorológica (0,12), apresentando um viés de 0,06 e ER de 50%. Para $L\uparrow$ verificou-se uma razoável concordância, com ER de 12,2%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL (489 W m^{-2}) ter sido 68 W m^{-2} inferior à medida pela torre micrometeorológica (557 W m^{-2}). O valor de $L\downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA apresentou erro relativo de 5,1 %, com valor modelado de 374 W m^{-2} e observado de 394 W m^{-2} , o que caracteriza uma boa concordância. Já a estimativa de R_n 24h para a área experimental apresentou ER de apenas 6,5%, superestimando o valor medido pela torre em 11 W

m^{-2} . Para o R_n verificou-se ER de 3,3%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL (625 W m^{-2}) ter sido 21 W m^{-2} inferior à medida pela torre micrometeorológica (646 W m^{-2}).

O valor de $K\downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA (925 W m^{-2}) apresentou valor muito próximo ao observado na torre micrometeorológica da área experimental (921 W m^{-2}), com ER de 0,4%, o que caracteriza uma excelente concordância.

Para o dia correspondente a fase em que ocorre o crescimento e desenvolvimento dos colmos foi possível observar por meio da Tabela 6 que os maiores erros foram no albedo e no R_n 24h, enquanto que os menores erros foram na estimativa de $L\uparrow$ e $K\downarrow$.

Tabela 5. Medidas de concordância Viés (VS) ($W m^{-2}$) e Erro Relativo (ER) (%) entre os valores modelados (M) pelo SEBAL, a partir de dados MODIS/TERRA, e observados (O) na torre micrometeorológica da área produtiva de cana para as seguintes variáveis: albedo (α_s), radiação solar incidente ($K\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa incidente ($L\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa emitida ($L\uparrow$) ($W m^{-2}$), balanço de radiação (Rn) ($W m^{-2}$) e balanço de radiação médio diário (Rn24h) ($W m^{-2}$) para 09/12/2009.

	α_s		$K\downarrow$		$L\downarrow$		$L\uparrow$		Rn		Rn24h	
	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O
		0,18	0,12	925	921	374	394	489	557	625	646	181
VS	0,06		4		-20		-68		-21		11	
ER	50		0,4		5,1		12,2		3,3		6,5	

O albedo estimado (0,15) foi menor que o albedo observado (0,17), apresentando um viés de 0,02 e ER de 11,7%. Ruhoff (2011) encontrou valores estimados de albedo variando entre 0,15 e 0,19 em uma plantação de cana-de-açúcar em sertãozinho-SP. Na estimativa de Rn24h para a área experimental observou-se um ER de 7%, devido ao valor estimado pelo modelo SEBAL ter sido 14 $W m^{-2}$ inferior ao observado.

O valor de $L\downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA apresentou erro relativo de 5,4 %, com valor modelado de 385 $W m^{-2}$ e observado de (407 $W m^{-2}$), o que caracteriza uma boa concordância.

Para o Rn verificou-se ER de 2,2%, que se

deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL (682 $W m^{-2}$) ter sido 15 $W m^{-2}$ inferior à medida pela torre micrometeorológica (697 $W m^{-2}$). O valor de $K\downarrow$ obtido a partir da imagem MODIS/TERRA (934 $W m^{-2}$) apresentou valor muito próximo ao observado na torre micrometeorológica da área experimental (932 $W m^{-2}$), com ER de 0,2%, o que caracteriza uma excelente concordância.

Para $L\uparrow$ verificou-se uma excelente concordância, com ER de 0%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL (486 $W m^{-2}$) ter sido exatamente igual ao valor medido pela torre micrometeorológica (486 $W m^{-2}$).

Tabela 6. Medidas de concordância Viés (VS) ($W m^{-2}$) e Erro Relativo (ER) (%) entre os valores modelados (M) pelo SEBAL, a partir de dados MODIS/TERRA, e observados (O) na torre micrometeorológica da área produtiva de cana para as seguintes variáveis: albedo (α_s), radiação solar incidente ($K\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa incidente ($L\downarrow$) ($W m^{-2}$), radiação de onda longa emitida ($L\uparrow$) ($W m^{-2}$), balanço de radiação (Rn) ($W m^{-2}$) e balanço de radiação médio diário (Rn24h) ($W m^{-2}$) para 11/03/2010.

	α_s		$K\downarrow$		$L\downarrow$		$L\uparrow$		Rn		Rn24h	
	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O
		0,15	0,17	934	932	385	407	486	486	682	697	186
VS	-0,02		2		-22		0		-15		-14	
ER	11,7		0,2		5,4		0		2,2		7	

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7 é possível observar que os maiores erros relativos (ERs) foram nas estimativas do albedo e Rn24h e os menores nas estimativas de $L\downarrow$ e $K\downarrow$.

O albedo estimado através da equação empírica de Tasumi et al. (2008) foi de (0,14) menor que o albedo observado (0,19), apresentando um viés de 0,05 e ER de 26,3%. Período em que ocorrem amarelecimento e seca das folhas em proporção maior que o crescimento, caracterizado pelo intenso armazenamento de açúcares, devido ao corte na irrigação. Gomes

(2009) obteve valores de albedo entre 0,16 e 0,20 para cana-de-açúcar empregando os parâmetros apresentados por Allen et al. (2007) e Tasumi et al. (2008). A estimativa de Rn24h para a área experimental apresentou ER de 16%, superestimando o valor medido pela torre em 25 $W m^{-2}$, o que caracteriza uma razoável concordância.

Para $L\uparrow$ verificou-se uma boa concordância, com ER de 8,2%, que se deveu ao fato da estimativa pelo modelo SEBAL (540 $W m^{-2}$) ter sido 41 $W m^{-2}$ superior à medida pela torre micrometeorológica (499 $W m^{-2}$). Para o Rn verificou-se ER de 1,5%, que se deveu ao fato da

estimativa pelo modelo SEBAL (672 W m^{-2}) ter sido 10 W m^{-2} inferior à medida pela torre micrometeorológica (682 W m^{-2}).

O valor de K_{\downarrow} obtido a partir da imagem MODIS/TERRA (982 W m^{-2}) apresentou valor muito próximo ao observado na torre micrometeorológica da área experimental (991 W m^{-2}), com ER de 0,9%, o que caracteriza uma

excelente concordância. Assim como K_{\downarrow} , o valor de L_{\downarrow} obtido a partir da imagem MODIS/TERRA apresentou valor muito próximo ao observado, apresentando erro relativo de 0,5 %, com valor modelado de 381 W m^{-2} e observado de (383 W m^{-2}), o que caracteriza, também, uma excelente concordância.

Tabela 7. Medidas de concordância Viés (VS) (W m^{-2}) e Erro Relativo (ER) (%) entre os valores modelados (M) pelo SEBAL, a partir de dados MODIS/TERRA, e observados (O) na torre micrometeorológica da área produtiva de cana para as seguintes variáveis: albedo (α_s), radiação solar incidente (K_{\downarrow}) (W m^{-2}), radiação de onda longa incidente (L_{\downarrow}) (W m^{-2}), radiação de onda longa emitida (L_{\uparrow}) (W m^{-2}), balanço de radiação (Rn) (W m^{-2}) e balanço de radiação médio diário (Rn24h) (W m^{-2}) para 03/10/2010.

	α_s		K_{\downarrow}		L_{\downarrow}		L_{\uparrow}		Rn		Rn24h	
	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O	M	O
		0,14	0,19	982	991	381	383	540	499	672	682	181
VS	-0,05		-9		-2		41		-10		25	
ER	26,3		0,9		0,5		8,2		1,5		16	

Conclusão

Não houve nenhuma condição atípica no comportamento dos termos do balanço de radiação obtidos à superfície, quando se consideraram os diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, embora os valores absolutos dos termos tenham sido diferentes.

Os termos do balanço de radiação encontrados por meio de imagens MODIS aplicando o modelo SEBAL apresentaram comportamento esperado para os alvos, com valores consistentes e próximos aos encontrados à superfície, exceto para o albedo que apresentou erros de 54,5%, 50%, 11,7% e 26% para as fases de I a IV, respectivamente.

Por fim, conclui-se que o sensoriamento remoto e produtos MODIS podem perfeitamente ser usados na determinação dos componentes do balanço de radiação para a cana-de-açúcar.

Agradecimentos

À CAPES pela concessão da bolsa a primeira autora e a Embrapa pelo financiamento dos Projetos Desenvolvimento de indicadores para análise da sustentabilidade do cultivo da cana-de-açúcar sob irrigação nas regiões tradicionais e de expansão do Nordeste (02.11.07.007.00.00) e Pegada Hídrica da Cana-de-açúcar, Etanol e Açúcar em Áreas Irrigadas do Brasil (02.12.11.005.00.00).

Referências

- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2002. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and user’s manual - Idaho implementation. Idaho University, Idaho, USA. 98 p.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration “METRIC” - model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133 (4): 380-394.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., Kjaersgaard, J.H., 2010. METRIC - Mapping Evapotranspiration at High Resolution, Application Manual. Idaho: Idaho University, 2010. 175p.
- André, R.G. B., 1996. Aspectos energéticos e hídricos da cultura do milho (*Zea mays*) na região de Jaboticabal, SP. Tese (Livredocência). Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal-UNESP.
- André, R.G.B., Mendonça, J. C., Marques, V.S.; Pinheiro, F.M.A., Marques, J., 2010. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: balanço de radiação e parâmetros derivados. Revista Brasileira de Meteorologia, 25 (3), 375-382.
- Bastiaanssen, W.G.M., 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Ph.D. Thesis. Wageningen, Wageningen Agricultural University.
- Boegh, E., Soegaard, H., Thomsen, A., 2002. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance.

- Remote Sensing of Environment, 79 (2-3): 329-343.
- Borges, V.P., 2011. Necessidades hídricas e produtividade de água da cultura do meloeiro irrigado na região de Mossoró - RN. Tese (Doutorado). Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande.
- Bruin, H.A.R., 1987. From Penman to Makkink. In: Hooghart, J.C., Ed., Proceedings and Information: TNO Committee on Hydrological Research N°39. The Netherlands Organization for Applied Scientific Research TNO, Den Haag, 5-31.
- Cabral, O.M.R., Rocha, H.R., Ligo, M.A.V., Brunini, O., Dias, M.A.F.S., 2003. Fluxos turbulentos de calor sensível, vapor d'água e CO₂ sobre plantação de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) em Sertãozinho-SP. Revista Brasileira de Meteorologia, 18, 61-70.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, 2015. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 2 – Safra 2015/16, n.1 – Primeiro levantamento, Brasília - DF, 1-28.
- Fontana, D.C., Berlato, M.A., Bergamaschi, H., 1991. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 26 (3), 411-418.
- Gomes, H.B., 2009. Balanços de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais. Tese (Doutorado em Meteorologia). Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande.
- Huete, A.R., 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25 (3), 295-309.
- Juárez, R.I.N., 2004. Variabilidade climática regional e controle da vegetação no sudeste: um estudo de observações sobre cerrado e cana-de-açúcar e modelagem numérica da atmosfera. Tese de Doutorado. São Paulo, Universidade de São Paulo.
- Lira, V. M., 2008. Obtenção de parâmetros biofísicos e evapotranspiração da cana-de-açúcar mediante imagens orbitais na região do Submédio São Francisco. Tese de Doutorado. Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande.
- Oliveira, G., Moraes, E.C., 2013. Validação do balanço de radiação obtido a partir de dados MODIS/TERRA na Amazônia com medidas de superfície do LBA. Acta Amazonica, 43 (3), 353-364.
- Oliveira, B.S., Moraes, E.C., Rudorff, B.F.T., Mataveli, G.A.V., 2015. Análise do desempenho de modelos de albedo da superfície em áreas de cana-de-açúcar com dados MODIS/TERRA. Revista Brasileira de Cartografia, 67 (3), 479-491.
- Ruhoff, A.L., 2011. Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais. Tese de Doutorado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Ruhoff, A.L., Paz, A.R., Collischonn, W., Aragão, L.E.O.C.; Rocha, H.R., Malhi, Y.S., 2012. A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas. Remote Sensing, 4 (3): 703-725.
- Santos, C.A.C., Silva, B.B., Rao, T.V.R., Satyamurty, P., Manzi, A.O., 2011. Downward long wave radiation estimates for clear-sky conditions over northeast Brazil. Revista Brasileira de Meteorologia, 26 (3): 443-450.
- Silva, B.B., Lopes, G.M., Azevedo, P.V., 2005. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 - TM. Revista Brasileira de Meteorologia, 20 (2): 243-252.
- Silva, T.G., Moura, M.S.B., Zonier, 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, 15 (2), 139-147.
- Tasumi, M., Allen, R., Trezza, R., 2008. At surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. Journal of Hydrologic Engineering, 13 (2), 51-63.