

Variação temporal dos componentes do balanço radiativo em áreas de cana-de-açúcar no oeste de MG e sudeste de GO

Gabriel de Oliveira¹
André Moscardo Salles Almeida Luz¹
Elisabete Caria Moraes¹
Bernardo Friedrich Theodor Rudorff¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
CEP 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{gdo, moscardo, bete, bernardo}@dsr.inpe.br

Abstract. Net radiation is an important variable related to agricultural crop development. The present study aimed to determine, from MODIS/Terra data and SEBAL model, the albedo and surface energy fluxes and also to analyse the temporal behaviour of the radiation balance in sugarcane areas for three dates during the dry season of 2010. The study area is encompassed by the western part of Minas Gerais state and the south-eastern part of Goiás state. To estimate the components of the radiation balance by the SEBAL model we used air temperature data acquired by the Itumbiara weather station, located in the state of Goiás, and MODIS/Terra data regarding to reflectance and surface temperature. Information related to the areas of sugarcane cultivation were obtained from Canasat Project. The combined use of MODIS/Terra data and the SEBAL model allowed generating estimates of the radiation balance components for the studied region and, thus, identify aspects related to the temporal variation of these components for the sugarcane crop. A rapid response of the sugarcane crop to precipitation was observed, providing favourable conditions for increasing the surface energy available to be used in the evaporative processes.

Palavras-chave: balanço de radiação, modelo SEBAL, sensoriamento remoto, agricultura, net radiation, SEBAL model, remote sensing, agriculture.

1. Introdução

O cultivo da cana-de-açúcar foi trazido pelos portugueses em meados do século XVI e atualmente é uma das atividades agrícolas mais importantes do Brasil (Dean, 1996). Dentre os produtos extraídos da cana-de-açúcar pode-se citar a utilização, como matéria-prima, para a fabricação do álcool (etanol), o açúcar e a energia elétrica. Estimado em quase 10 milhões de hectares de área cultivada de cana-de-açúcar, que correspondem a 2,5% de toda terra arável do Brasil, os estados de Goiás (7,5%) e Minas Gerais (8%) são responsáveis por 15,5% dessa extensão distribuída pelo território (Conab, 2011).

De acordo com Barbieri (1993) o clima é o fator mais influente no processo de produtividade da cana-de-açúcar, dessa forma, se faz indispensável um entendimento mais amplo das condições climáticas e atmosféricas em áreas ocupadas por essa cultura. A radiação solar incidente sobre uma comunidade vegetal pode influenciar na armazenagem de glicose, crescimento das plantas e atuar diretamente sobre a temperatura dos elementos do dossel que, por sua vez, governa as taxas dos processos bioquímicos e de evapotranspiração (Querino et al., 2006). O balanço de radiação, que consiste no total de energia disponível na superfície para os processos de aquecimento do ar e do solo e evapotranspiração, tem sido objeto de diversos trabalhos de pesquisa devido à sua importância para o desenvolvimento das culturas agrícolas (André et al., 2010).

Os dados de sensoriamento remoto possibilitam estimar ao longo do tempo os fluxos energéticos em grandes superfícies. Nesse contexto, o sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo dos satélites Terra e Aqua, representa um instrumento importante, pelo fato de seus dados possuírem alta qualidade radiométrica e geométrica, bem como alta resolução temporal, que, de acordo com Justice et al. (2002) são requisitos importantes para o monitoramento da cobertura terrestre. Diferentes algoritmos têm sido formulados para estimar os componentes do balanço de energia da superfície com imagens de

satélite. O modelo *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL), têm se destacado pelo fato de utilizar dados de sensores orbitais complementados por poucas informações de superfície; sendo muito aceito e utilizado pela comunidade científica (Gomes, 2009).

O presente estudo teve como objetivo determinar, a partir de dados MODIS/Terra e o modelo SEBAL, o albedo e os fluxos de energia na superfície em uma região englobando o oeste do estado de Minas Gerais e o sudeste do estado de Goiás, e analisar o comportamento temporal do balanço de radiação em áreas de cultivo de cana-de-açúcar para três datas do período seco do ano de 2010.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

O estudo foi desenvolvido em uma área formada por 44 municípios, abrangendo o sudeste do estado de Goiás e oeste do estado de Minas Gerais (Figura 1). Especificamente, a área de estudo localiza-se entre as latitudes 17° 19' S e 19° 98' S e longitudes 48° 15' W e 52° 48' W, e possui 6.688.197 hectares. O clima, de acordo com a classificação climática de Köppen, pertence ao tipo de clima temperado, e ao subtipo Cwa, que significa possuir um clima temperado úmido com inverno seco e verão quente. Na região são encontrados diversos tipos de uso e cobertura da terra, com destaque para as áreas de cana-de-açúcar (situadas em sua maior parte na porção norte), pastagens e formações vegetais do cerrado e da mata atlântica.

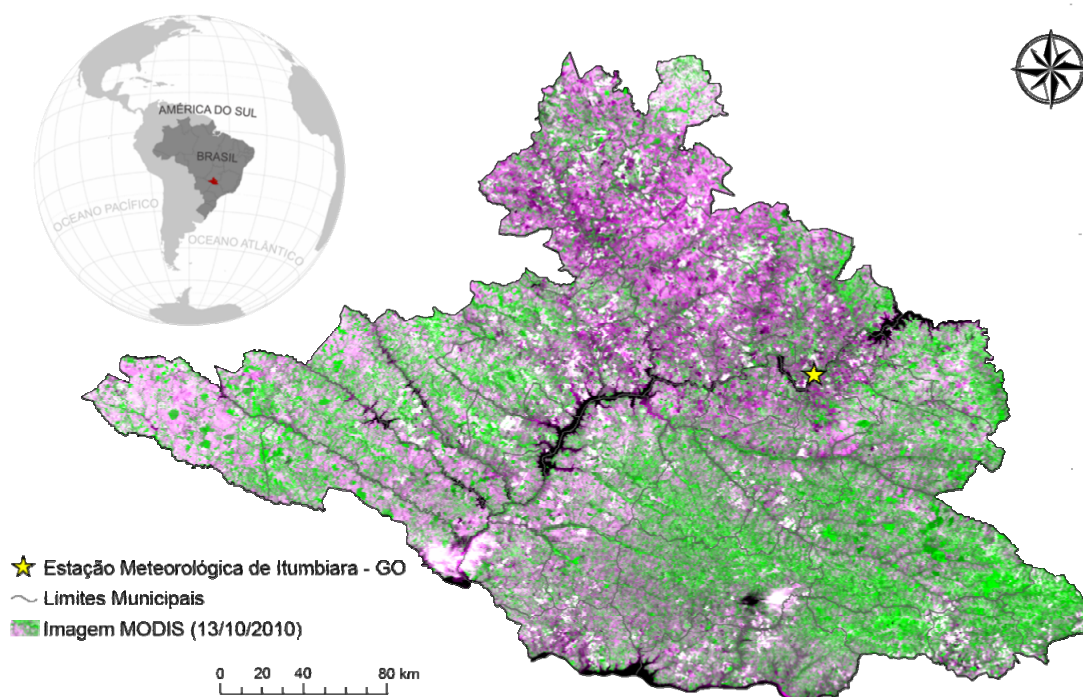


Figura 1. Localização da área de estudo abrangendo o sudeste do estado de Goiás e oeste do estado de Minas Gerais.

2.2 Dados utilizados

As informações de superfície foram adquiridas do Sistema Nacional de Dados Ambientais (SINDA) (<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>). As variáveis temperatura do ar e precipitação acumulada foram medidas na estação meteorológica de Itumbiara, localizada na região sudeste do estado de Goiás, e utilizadas para inserção direta no modelo SEBAL nos dias de implementação (08/09/2010, 22/09/2010 e 13/10/2010) e para análise dos resultados.

Para a estimativa dos componentes do balanço radiativo da superfície foram utilizados dados orbitais MODIS/Terra. Esses dados foram adquiridos na forma de produtos, diretamente do endereço eletrônico do *Land Processes Distributed Active Archive Center (LPDAAC)/United States Geological Survey (USGS)* (<https://lpdaac.usgs.gov/>). Os produtos MODIS utilizados corresponderam aos *tiles* H12V10, H12V11 e H13V10 e foram os seguintes: MOD09GQ - reflectância da superfície nas bandas 1 e 2 (vermelho e infravermelho próximo), resolução espacial de 250 m; MOD09GA - reflectância da superfície nas bandas 3 a 7 (azul, verde e infravermelho médio), resolução espacial de 500 m; e MOD11A1 - temperatura da superfície (K), resolução espacial de 1 km. As imagens MODIS foram mosaicadas e reprojetaadas no programa *Modis Reprojection Tool (MRT)*. Após o tratamento das imagens os *pixels* dos produtos MOD09GA e MOD11A1 foram reamostrados para uma resolução de 250 metros para que todos os dados apresentassem a mesma resolução espacial. As imagens MODIS, apesar de terem sido adquiridas durante a estação seca, não estavam totalmente isentas de nebulosidade, com destaque para a imagem de 13/10/2010, que apresentou a maior quantidade de nuvens dentre todas. As áreas de nuvens não foram mascaradas para geração das estimativas, no entanto, se tomou cuidado para que nenhuma área selecionada de cana-de-açúcar (**item 2.3**) estivesse coberta por nuvem. A Tabela 1 apresenta algumas informações acerca das imagens MODIS utilizadas.

Tabela 1. Data das imagens MODIS, horário, quadrado da distância relativa Terra-Sol, declinação solar ($^{\circ}$), ângulo zenital solar ($^{\circ}$) e cosseno do ângulo zenital solar ($^{\circ}$) no momento de passagem do satélite na área de estudo.

Data da imagem	Dia juliano	Hora local	dr	Declinação solar ($^{\circ}$)	Ângulo zenital solar ($^{\circ}$)	Cos ângulo zenital solar ($^{\circ}$)
08/09/2010	251	10:30:00	0,9874	5,6023	35,2040	0,8171
22/09/2010	265	10:30:00	0,9963	0,2243	30,7293	0,8595
13/10/2010	286	10:30:00	1,0069	-7,8574	24,9397	0,9067

2.3 Áreas de cultivo de cana-de-açúcar

As informações referentes às áreas de cultivo de cana-de-açúcar foram obtidas a partir do mapeamento realizado pelo Projeto Canasat (<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>). O mapeamento é realizado com base na interpretação visual de imagens TM/Landsat 5 e ETM⁺/Landsat 7 adquiridas em datas específicas do calendário agrícola, permitindo a identificação de áreas em reforma com cana de ano e meio, reformadas com cana de ano e meio e as áreas de expansão do cultivo para a safra corrente (Rudorff et al., 2010). No estudo foram utilizados os polígonos mapeados como expansão do cultivo da cana-de-açúcar no ano-safra 2010/2011 nos estados de Goiás e Minas Gerais. De porte dos polígonos, primeiramente efetuou-se um recorte englobando a área de estudo, e, posteriormente, realizou-se a edição no programa ARCGIS 9.3 sobre as imagens utilizadas (referentes à 08/09/2010, 22/09/2010 e 13/10/2010), de modo a verificar se as áreas mapeadas como expansão já haviam sido colhidas ou estavam ainda disponíveis para colheita nos dias avaliados. Após a etapa de edição, efetuaram-se recortes sobre as diferentes estimativas do modelo SEBAL de modo a extrair os valores médios de cada variável.

2.4 Estimativas dos componentes do balanço de radiação

Os procedimentos do modelo SEBAL foram efetuados no programa ERDAS IMAGINE 9.1. O balanço de radiação para o momento de passagem do satélite Terra foi obtido de acordo com a equação proposta por Bastiaanssen (1995):

$$R_n = (1 - \alpha_s) K \downarrow + L \downarrow - L \uparrow - (1 - \varepsilon_s) L \downarrow \quad (1)$$

em que R_n é o balanço de radiação na superfície ($W m^{-2}$), α_s é o albedo da superfície, $K \downarrow$ representa a radiação solar incidente na superfície ($W m^{-2}$), $L \downarrow$ é a radiação infravermelha termal (IVT) incidente na superfície ($W m^{-2}$), $L \uparrow$ é a radiação IVT emitida pela superfície ($W m^{-2}$) e ε_s é a emissividade da superfície.

As estimativas de albedo se deram de acordo com a equação a seguir (Liang, 2001):

$$\alpha_s = 0,160\alpha_1 + 0,291\alpha_2 - 0,243\alpha_3 - 0,116\alpha_4 - 0,112\alpha_5 + 0,081\alpha_7 - 0,0015 \quad (2)$$

em que α_s é o albedo da superfície e α_i ($i=1$ a 7) é a reflectância *in-band* da superfície correspondente as bandas 'i' do sensor MODIS.

Para o cálculo da emissividade da superfície, primeiramente calculou-se o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e o índice de área foliar (LAI) (Allen et al., 2002). Assim sendo, para o cômputo da emissividade da superfície a partir dos índices de vegetação, utilizou-se a Equação 3:

$$\varepsilon_s = 0,95 + 0,01LAI \quad (3)$$

A Equação 3, contudo, só é adequada para os *pixels* que apresentarem NDVI maior que zero. Para os *pixels* com NDVI negativo, foi adotada $\varepsilon_s=0,985$ (Allen et al., 2002).

A radiação solar incidente foi calculada através da expressão:

$$K \downarrow = \tau S_0 \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 \cos \theta_z \quad (4)$$

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

O cálculo da transmitância atmosférica se deu de acordo com Allen et al. (2002):

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

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

A radiação IVT incidente na superfície foi computada a partir da equação de Stefan-Boltzmann:

$$L \downarrow = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (6)$$

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

Como visto na Equação 6, um dos termos que se insere na equação de Stefan-Boltzmann é a emissividade da atmosfera, que foi calculada da seguinte maneira:

$$\varepsilon_a = 0,85 (-\ln \tau)^{0,09} \quad (7)$$

A radiação IVT emitida pela superfície foi obtida pela equação de Stefan-Boltzmann:

$$L \uparrow = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (8)$$

em que T_s é a temperatura da superfície (K).

3. Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta a distribuição espacial do NDVI para as três datas de estudo. Os valores médios de NDVI para cada imagem foram: 0,306 (08/09), 0,301 (22/09) e 0,405 (13/10). Os valores médios de NDVI são próximos nos dois primeiros dias, onde se verifica que a diferença entre o maior e o menor valor é de apenas 0,005. No entanto, no dia 13/10 há um incremento significativo no valor médio e então, ao compararmos o maior e o menor valor durante as três datas, observa-se uma diferença de 0,104. De modo a entender a variação nos valores médios de NDVI realizou-se uma análise das medidas de precipitação na estação meteorológica de Itumbiara nos sete dias anteriores à passagem do satélite Terra. Não foram

verificados eventos de precipitação nos dias anteriores à imagem de 08/09, enquanto que se observaram precipitações frequentes nos dias precedentes à imagem de 13/10. Salienta-se que para 22/09 não foi possível realizar essa análise, pois os dados medidos pela estação de Itumbiara no período em questão foram considerados espúrios. Dessa forma, pode-se inferir que o aumento no NDVI em 13/10 está relacionado à maior disponibilidade hídrica nos solos e na vegetação em função de ocorrências de chuva.

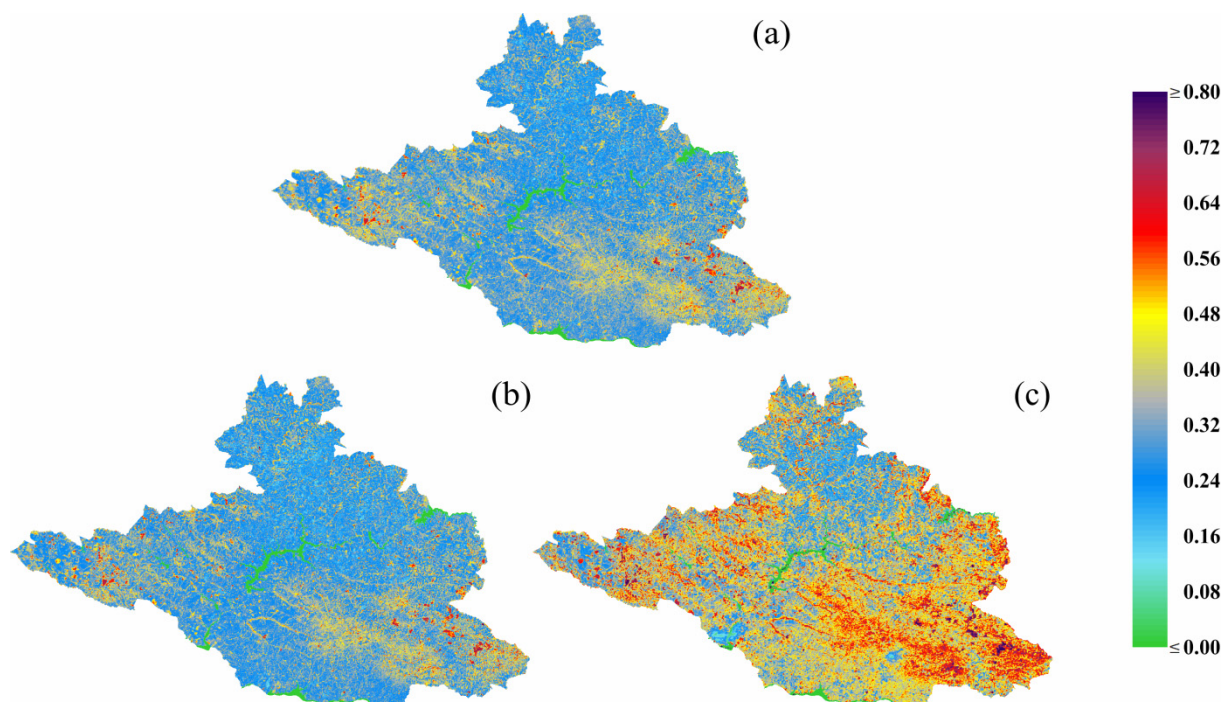


Figura 2. Distribuição espacial do NDVI nos dias 08/09/2010 (a), 22/09/2010 (b) e 13/10/2010 (c).

Nas imagens de albedo (Figura 3) os valores médios observados para os dias 08/09, 22/09 e 13/10 foram 0,181, 0,171 e 0,126, respectivamente. Do mesmo modo como observado para as imagens de NDVI, nos dois primeiros dias os valores são próximos, enquanto que no terceiro dia há uma considerável mudança. Ao considerarmos a média de valores dos dias 08/09 e 22/09 verifica-se que houve uma redução do valor médio de albedo no dia 13/10 de 0,050 ou 28,4%. Para entender essa mudança deve-se considerar a umidade disponível, ou seja, a disponibilidade hídrica no período estudado. Querino et al. (2006) destacam que pode haver grandes variação dos valores de albedo entre períodos secos e chuvosos. De acordo com esses autores, as mudanças de coloração dos vegetais, que se tornam mais verdes em períodos chuvosos, e ainda solos mais escuros devido à presença de umidade, são fatores condicionantes das mudanças no albedo. Assim, é esperado que em períodos com maior disponibilidade hídrica ocorra uma redução do albedo da superfície. Nesse sentido, cabe salientar que a redução, ainda que pequena, do valor médio de albedo na imagem de 22/09, pode estar relacionada à ocorrência de chuva em um ou mais dias antecedentes a esse imageamento, embora, conforme mencionado anteriormente, não tenha sido possível obter dados de precipitação para os dias anteriores à imagem de 22/09. Com relação à nebulosidade, essa pode ter influenciado negativamente no valor médio das imagens, principalmente em 13/10, pois as nuvens se caracterizam por possuir altos valores de albedo (círculos na Figura 3c).

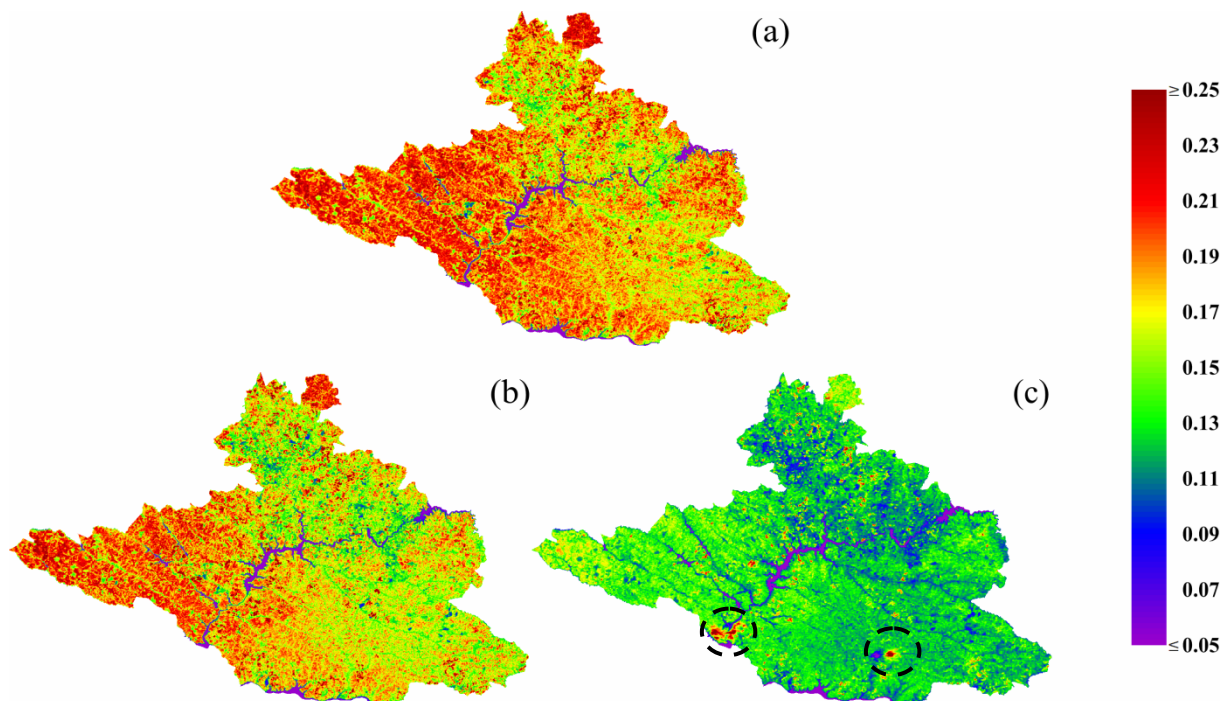


Figura 3. Distribuição espacial do albedo nos dias 08/09/2010 (a), 22/09/2010 (b) e 13/10/2010 (c).

Na Figura 4 estão apresentadas as imagens de balanço de radiação nos dias 08/09/2010, 22/09/2010 e 13/10/2010. Os valores médios obtidos para os respectivos dias foram 566,7, 607,6 e 700,8 $W m^{-2}$.

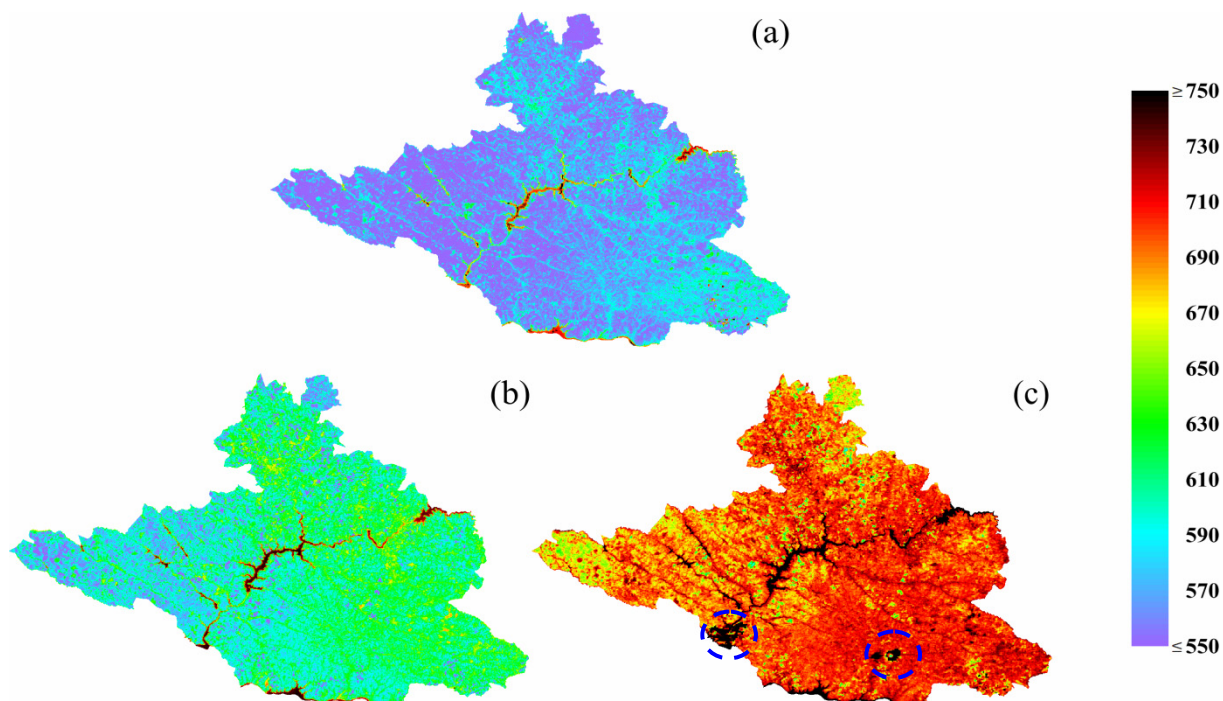


Figura 4. Distribuição espacial do balanço de radiação ($W m^{-2}$) nos dias 08/09/2010 (a), 22/09/2010 (b) e 13/10/2010 (c).

Foram observados aumentos nos valores médios de balanço de radiação da ordem de: 7,2% entre 08/09 e 22/09 e 15,3% entre 22/09 e 13/10. Cabe ressaltar que a imagem com o

maior valor médio de R_n , referente ao dia 13/10, apresentou o menor valor médio de albedo. Provavelmente isso está relacionado ao fato dos valores de albedo expressarem uma relação inversa com R_n , pois se o albedo for menor implicará num maior armazenamento de energia por conta de uma menor reflexão da radiação solar (Berbet, 2002). Percebe-se a presença de ruídos na imagem de 13/10 (círculos na Figura 4c), relacionados justamente a nuvens, que apresentaram elevados valores de albedo e, conseqüentemente, de R_n .

Após a edição dos polígonos de expansão, mapeados pelo Projeto Canasat, foram selecionados um total de 15.869,70 hectares de cana-de-açúcar que estavam ainda disponíveis para colheita no período avaliado. A Tabela 2 apresenta os valores médios de NDVI, albedo, e dos fluxos de energia nas áreas de cana-de-açúcar selecionadas.

Tabela 2. Valores médios de NDVI, albedo, radiação IVT incidente e emitida ($W m^{-2}$) e balanço de radiação ($W m^{-2}$) nas áreas de cana-de-açúcar selecionadas.

Data	NDVI	Albedo	Radiação IVT incidente ($W m^{-2}$)	Radiação IVT emitida ($W m^{-2}$)	Balanço de radiação ($W m^{-2}$)
08/09/2010	0,254	0,154	403,1	506,6	584,9
22/09/2010	0,235	0,138	434,9	546,2	632,5
13/10/2010	0,302	0,110	442,0	555,4	707,8

Os valores de NDVI oscilaram entre 0,235 e 0,302, com média de 0,264. O menor valor foi encontrado no dia 22/09, enquanto o maior correspondeu ao dia 13/10. No dia 13/10 a variação ocorre como o esperado, pois nesse dia havia uma maior disponibilidade hídrica. O albedo médio durante o período foi de 0,134, com o mínimo verificado no dia 13/10/2010 e o máximo em 08/09/2010. O valor mínimo de albedo está relacionado justamente ao maior valor de NDVI, ou seja, a ocorrência de precipitação próxima a esse dia fez aumentar de maneira significativa os valores de NDVI e diminuir os valores de albedo. O máximo valor de albedo, encontrado no dia 08/09, provavelmente esteve associado às condições de déficit hídrico na área de estudo, de acordo com as medidas pluviométricas registradas na estação de Itumbiara. A título de comparação, Ruhoff et al. (2008) obtiveram valores de albedo para os meses de setembro e outubro em São Paulo variando de 0,15 a 0,19. Com relação à radiação IVT incidente e emitida, os valores médios para o período avaliado foram de 426,7 e 536,1 $W m^{-2}$, respectivamente. Os valores médios de R_n nas áreas selecionadas variaram entre 584,9 e 707,8 $W m^{-2}$, com média para o período de 641,7 $W m^{-2}$. O maior valor foi verificado no dia 13/10, em que também foi observado o menor albedo. No dia 13/10 também foi verificado o maior valor de NDVI, como antes visto, relacionado à ocorrência de precipitação. Nesse sentido, o aumento do valor de R_n sugere um aumento no fluxo de calor latente (evapotranspiração) e uma diminuição no fluxo de calor sensível (aquecimento do ar). Gomes (2009) encontrou no mês de novembro, para o período da manhã, em um cultivo no estado de São Paulo o valor de 718,8 $W m^{-2}$.

4. Conclusões

A utilização de dados MODIS/Terra e o modelo SEBAL permitiu gerar estimativas dos componentes do balanço radiativo para a região estudada e, assim, identificar aspectos relacionados à variação temporal destes componentes em áreas de cana-de-açúcar. Foi verificada uma resposta rápida da cultura à ocorrência de precipitação, proporcionando condições para o aumento da energia disponível na superfície a ser utilizada para os processos evaporativos. A metodologia proposta pode servir como um recurso técnico de subsídio à atividade canavieira em regiões que apresentam restrições hídricas e/ou térmicas.

Agradecimentos

À equipe do Laboratório de Agricultura e Floresta (LAF) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), bem como a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo: 08/56252-0).

Referências Bibliográficas

Allen, R. G.; Tasumi, M.; Trezza, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and user's manual - Idaho implementation**. Idaho: Idaho University, 2002. 98 p.

André, R. G. B.; Mendonça, J. C.; Marques, V. S.; Pinheiro, F. M. A.; Marques, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 375-382, 2010.

Barbieri, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 40 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

Bastiaanssen, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. 1995. 273 p. Tese (Ph.D.) - Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1995.

Berbet, M. L. C. **Variação sazonal do albedo e sua influência na mudança do padrão de chuva, em consequência da conversão da floresta tropical em pastagem**. 2002. 33 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, janeiro/2011**. Disponível em <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_01_06_09_14_50_boletim_cana_3o_lev_safra_2010_2011..pdf> Acesso em: 15.out.2012.

Dean, W. **A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira**. 1. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 1996. 484 p.

Gomes, H. B. **Balanços de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no Estado de São Paulo mediante imagens orbitais**. 2009. 108 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

Justice, C. O.; Townshend, J. R. G.; Vermote, E. F.; Masuoka, E.; Wolfe, R. E.; Saleous, N.; Roy, D. P.; Morisette, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1, p. 3-15, 2002.

Liang, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 2, p. 213-238, 2001.

Querino, C. A. S.; Moura, M. A. L.; Lyra, R. F. F.; Mariano, G. L. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zenital na região amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 42-49, 2006.

Rudorff, B. F. T.; Aguiar, D. A.; Silva, W. F.; Sugawara, L. M.; Adami, M.; Moreira, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo state (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.

Ruhoff, A. L.; Collischonn, W.; Freitas, R. M.; Juárez, R. I. N.; Rocha, H. R. Estimativa da sazonalidade da evapotranspiração em plantação de cana-de-açúcar (*saccharum sp.*) a partir de dados do sensor Terra/MODIS. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Sul Sudeste, 2. (ABRH), 2008, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: ABRH, 2008. p. 1 20.