

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N^o 66/3: 419-431
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

BALANÇO DE RADIAÇÃO EM ÁREAS DE EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO COM USO DE DADOS ORBITAIS MODIS/AQUA

Radiation Balance in Areas of Sugarcane Expansion in São Paulo State using MODIS/Aqua Orbital Data

Gabriel de Oliveira, Elisabete Caria Moraes & Bernatrdto Friedrich Theodor Rudorff

**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR**

Avenida dos Astronautas, 1.758, Jardim da Granja. CEP: 12227-010, São José dos Campos, SP, Brasil.
gdo@dsr.inpe.br; bete@dsr.inpe.br; bernardo@dsr.inpe.br

*Recebido em 13 de Setembro, 2013/ Aceito em 15 de Março, 2014
Received on September 13, 2013/ Accepted on March 15, 2014*

RESUMO

O conhecimento do balanço de radiação e seus componentes é fundamental na estimativa das perdas de água por superfícies vegetadas, sendo, dessa forma, útil para o planejamento de atividades agrícolas, como o cultivo da cana-de-açúcar. Este estudo teve como objetivo estimar, a partir de dados MODIS/Aqua com base no modelo SEBAL, o albedo e os fluxos de energia superficiais no estado de São Paulo em duas datas (23/08/2006 e 16/08/2007) e avaliar o comportamento do balanço radiativo da superfície em áreas de expansão da cana-de-açúcar nos anos-safra 2006/2007 e 2007/2008. Para a implementação do SEBAL foram utilizados dados de temperatura do ar medidos na estação meteorológica de São Carlos, localizada na região centro-leste do estado de São Paulo, e imagens do sensor MODIS/Aqua referentes aos produtos diários de refletância e temperatura da superfície (MYD09GQ, MYD09GA e MYD11A1). As informações referentes às áreas de expansão da cana-de-açúcar foram advindas do Projeto Canasat. Os valores das variáveis estimadas pelo modelo SEBAL responderam às alterações biofísicas e à intensidade pluviométrica nos dias que antecederam a coleta dos dados orbitais. Ainda, os valores obtidos para as áreas de cana-de-açúcar foram, de modo geral, concordantes com estudos observacionais realizados no estado de São Paulo em períodos semelhantes. Os resultados evidenciam o potencial da metodologia para estudos envolvendo o desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica. Dessa forma, sugere-se a utilização de um maior número de imagens de sensoriamento remoto cobrindo diferentes fases de crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Albedo, Fluxos de Energia na Superfície, Sensoriamento Remoto, Modelo SEBAL, Áreas Agrícolas.

ABSTRACT

Radiation balance and its components are critical variables to estimate water losses by vegetated surfaces. Therefore, they are relevant in the planning of agricultural activities such as sugarcane cultivation. This study aimed to estimate the albedo and surface energy fluxes in São Paulo state and evaluate the behaviour of the radiation balance in areas of sugarcane expansion in the crop years 2006/2007 and 2007/2008. MODIS/Aqua data acquired at two dates (23/08/2006 and 16/08/2007) and the SEBAL model were used in this evaluation. Air temperature was measured at the meteorological station of São Carlos, located in the center-east region of São Paulo state, and MODIS/Aqua images of daily surface reflectance and temperature (MYD09GQ, MYD09GA and MYD11A1) were used. The information about sugarcane expansion areas was from the Canasat Project. The values of the variables estimated by the SEBAL model responded to the biophysical changes and the pluviometric intensity in the days that preceded the collection of the orbital data. Still, the values obtained for the sugarcane areas were, in general, concordant with observational studies conducted in São Paulo state in similar periods. The results evidence the potential of the methodology for studies involving the development of sugarcane culture in relation to water availability. Therefore, it is suggested the use of a larger number of remote sensing images covering different stages of growth and development of sugarcane.

logical station of São Carlos, located in the central-eastern part of São Paulo state. The MODIS/Aqua products were: reflectance and surface temperature (MYD09GQ, MYD09GA and MYD11A1). The sugarcane expansion from 2006 to 2007 was mapped by the Canasat Project. The data estimated by the SEBAL model responded to the land use change and the rainfall intensity observed prior to the satellite data acquisitions. Moreover, the values obtained for the sugarcane areas were in general consistent with observational studies conducted in the state of São Paulo in similar periods. The results indicate that the methodology has potential for studies involving water availability for crop growth suggesting the use of a larger number of remote sensing images to cover a broader range of sugarcane growth stages.

Keywords: Albedo, Surface Energy Fluxes, Remote Sensing, SEBAL Model, Agricultural Areas.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem uma vasta experiência com etanol e atualmente se constitui no maior produtor de cana-de-açúcar do mundo (ABDALA e CASTRO, 2010; RUDORFF *et al.*, 2010; LOARIE *et al.*, 2011). A região centro-sul concentra a maior parte das lavouras e é responsável por 90% do total produzido pelo país (IBGE, 2011). Devido principalmente ao início da produção de carros no Brasil que utilizam biocombustíveis foi verificada, no período de 2005 a 2010, a expansão de áreas de cultivo de cana-de-açúcar nessa região de 4,24 milhões de hectares. Somente no estado de São Paulo foi constatado um incremento de 2,27 milhões de hectares para esse período (ADAMI *et al.*, 2012). Assim, torna-se necessário um melhor conhecimento acerca desses novos ambientes de produção, de modo, por exemplo, a obter informações relacionadas às condições térmicas e hídricas da superfície e atmosfera vizinha em áreas ocupadas por plantações de cana-de-açúcar (ANDRÉ *et al.*, 2010).

Os processos radiativos ocorrentes na superfície terrestre são de grande importância para a redistribuição de umidade e calor no solo e na atmosfera (BASTIAANSEN *et al.*, 2005). A radiação solar incidente sobre a vegetação pode influenciar na armazenagem de glicose, crescimento das plantas e atuar diretamente sobre a temperatura do ar no dossel, que, por sua vez, governa as taxas dos processos bioquímicos e de evapotranspiração (BURBA e VERMA, 2005; QUERINO *et al.*, 2006). O conhecimento do balanço de radiação e seus componentes é fundamental na estimativa das perdas de água por superfícies vegetadas, sendo, dessa forma, útil para o planejamento de atividades agrícolas, como o cultivo da cana-de-açúcar. De modo geral, o balanço de radiação é obtido por saldo radiômetros, no entanto, estes instrumentos

possuem um alto custo e são válidos somente para áreas com pequena dimensão (PAPADAVID e HADJIMITSIS, 2012; RUHOFF *et al.*, 2012).

Nesse contexto, a utilização de dados de sensoriamento remoto surge como alternativa, pois possibilita determinar os fluxos energéticos em superfície com vasta cobertura espaço-temporal. O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo das plataformas Terra e Aqua, apresenta algumas características como: cobertura global, alta resolução radiométrica, intervalos dinâmicos de calibração nas bandas do visível, infravermelho próximo, médio e termal (ROJAS *et al.*, 2002) que o torna um instrumento promissor para os mais diversos estudos de cunho ambiental. Deste modo, a utilização de dados do sensor MODIS para estimativa dos fluxos de energia à superfície pode ser realizada por modelagem, com entrada de dados extraídos de imagens, como reflectância da superfície e índices de vegetação. O modelo *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL) se destaca pelo fato de necessitar de dados de sensores orbitais complementados por reduzidas informações de superfície, além disso, é bastante difundido e aceito pela comunidade científica nacional e internacional (LEITE e BRITO, 2012; BHATTARAI *et al.*, 2012; TANG *et al.*, 2013). Especificamente com relação a estudos que utilizam imagens MODIS e o modelo SEBAL, se destacam os trabalhos recentes de Yang *et al.* (2012), Du *et al.* (2013) e Oliveira e Moraes (2013).

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo estimar, a partir de dados MODIS/Aqua com base no modelo SEBAL, o albedo e os fluxos de energia superficiais no estado de São Paulo em duas datas (23/08/2006 e 16/08/2007) e avaliar o comportamento do balanço radiativo da superfície em áreas de expansão do cultivo da cana-de-açúcar nos anos-safra 2006/2007 e 2007/2008.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o estado de São Paulo, que está localizado na região sudeste do Brasil, entre as latitudes 19° 50' S e 24° 30' S e longitudes 44° 00' W e 53° 30' W, e ocupa uma área de aproximadamente 248.000 km². O plantio da cana-de-açúcar concentra-se principalmente nas regiões oeste e centro-norte do estado (AGUIAR *et al.*, 2010). A Figura 1 ilustra a localização do estado no Brasil, bem como a localização da estação meteorológica de São Carlos (22° 10' S e 47° 53' W), utilizada para obtenção de parâmetros de entrada no modelo SEBAL.

3. MATERIAL E MÉTODOS

No presente item são descritos os dados a serem utilizados e, também, os procedimentos metodológicos propostos para o cumprimento dos objetivos deste estudo. Primeiramente, são tratadas questões pertinentes aos dados de campo e de sensores orbitais. Em seguida, discutem-se a aquisição das informações referentes à expansão do cultivo da cana-de-açúcar em São Paulo, e a implementação do modelo SEBAL.

3.1 Dados *in situ* e orbitais

Os dados de superfície foram advindos do Sistema Nacional de Dados Ambientais (SINDA) (<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>) e do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (Sistema Agritempo) (<http://www.agritempo.gov.br/index.php>). As variáveis necessárias para o estudo foram temperatura do ar e

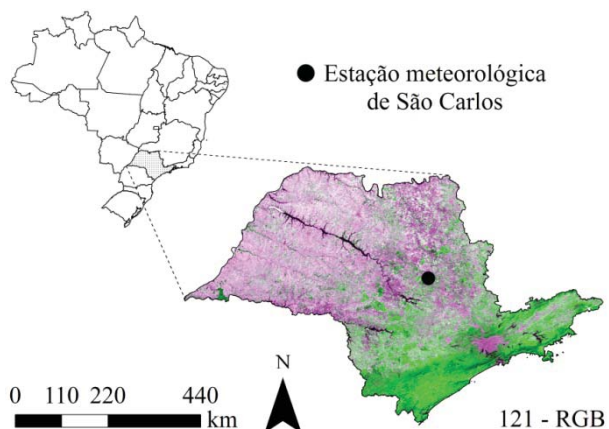


Fig. 1 - Localização do estado de São Paulo. A composição colorida foi obtida com dados adquiridos pelo sensor MODIS/Aqua (produto MYD09GQ) de 23/08/2006.

precipitação. As medidas de temperatura do ar, necessárias para inserção direta no modelo SEBAL nos dias de implementação (23/08/2006 e 16/08/2007), foram adquiridas através do SINDA e foram referentes à estação meteorológica de São Carlos, localizada na região centro-leste do estado de São Paulo. O SINDA fornece informações de temperatura do ar a cada três horas, totalizando oito medidas por dia em cada estação meteorológica. As medidas de precipitação, utilizadas para análise dos resultados, foram obtidas pelo Sistema Agritempo e se referiram a um total de 38 estações meteorológicas localizadas no estado de São Paulo (informações sobre essas estações podem ser obtidas no endereço eletrônico supracitado). O Sistema Agritempo disponibiliza boletins históricos decendiais (períodos de dez dias) de precipitação, ou seja, três medidas por mês para cada estação meteorológica.

Para a estimativa dos componentes do balanço de radiação no estado de São Paulo foram utilizados dados orbitais MODIS/Aqua referentes aos dias 23/08/2006 e 16/08/2007. Cabe salientar que para a escolha das datas levou-se em consideração principalmente a ausência (ou mínima presença) de nebulosidade nas imagens. Esses dados foram adquiridos na forma de produtos, diretamente do endereço eletrônico do *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LPDAAC) (<https://lpdaac.usgs.gov/>). Os produtos MODIS utilizados corresponderam aos *tiles* H13V10 e H13V11 e foram os seguintes: MYD09GQ - reflectância da superfície nas bandas 1 e 2 (vermelho e infravermelho próximo), resolução espacial de 250 m; MYD09GA - reflectância da superfície nas bandas 3 a 7 (azul, verde e infravermelho médio), resolução espacial de 500 m; e MYD11A1 - temperatura da superfície (K), resolução espacial de 1 km.

Os dados MODIS são disponibilizados no formato HDF em projeção Sinusoidal. Por este não ser um formato usual nos sistemas de informação geográfica utilizados para o processamento de imagens foi desenvolvido pelo *Earth Resources Observation System Data Center* (EDC) e LPDAAC um programa de distribuição gratuita, com a finalidade de reprojeter e mosaicar dados MODIS, denominado *MODIS Reprojection Tool* (MRT). Dessa forma,

as imagens MODIS foram inicialmente tratadas no aplicativo MRT, onde foram efetuadas operações de reprojeção e mosaicagem. Os dados foram reprojados para coordenadas geográficas (latitude e longitude), datum WGS 84, e então convertidos para o formato GeoTIFF. Com as imagens inicialmente tratadas foi efetuada, no programa ENVI 4.5, a reamostragem dos *pixels* dos produtos MYD09GA e MYD11A1 para 250 m, de modo a padronizar a resolução espacial dos resultados do SEBAL com imagens MODIS. A Tabela 1 apresenta algumas informações acerca das imagens MODIS utilizadas.

3.2 Áreas de expansão da cana-de-açúcar

O mapeamento do cultivo da cana-de-açúcar foi realizado pelo Projeto Canasat (<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>), conforme metodologia detalhada em Rudorff *et al.* (2010). Essa metodologia se baseia na interpretação visual de imagens TM/Landsat 5 adquiridas em fases específicas do calendário agrícola da cana-de-açúcar e permite identificar as áreas em reforma com cana de ano e meio, as áreas efetivamente reformadas com cana de ano e meio e as novas áreas de cultivo (ou expansão) e consequentemente determinar as áreas disponíveis para colheita na safra considerada. Por exemplo, para a identificação de novas áreas de cultivo no ano-safra 2007/2008 foram utilizadas imagens adquiridas em setembro/novembro de 2006, pois nesses meses já é possível identificar a resposta espectral característica do cultivo de cana-de-açúcar; e em abril de 2007, quando é possível certificar que as áreas identificadas previamente estarão disponíveis para colheita. Imagens de janeiro e março de 2007 foram utilizadas para identificar as áreas em reforma com cana de ano e meio, indisponíveis para colheita na safra em questão.

Esses dados foram obtidos sob forma de arquivos vetoriais e editados no programa ArcGIS 9.3 de modo a identificar se as áreas mapeadas como expansão em determinado ano-safra já haviam sido colhidas ou estavam ainda disponíveis para colheita nos dias avaliados (23/08/2006 e 16/08/2007). Cabe destacar que nessa etapa as áreas não foram separadas de acordo com seu estágio de desenvolvimento, sendo analisado somente se apresentavam resposta espectral típica da cana-de-açúcar. Ainda, se tomou cuidado para que nenhuma área de cana-de-açúcar estivesse coberta por nuvem. De porte dos polígonos editados foram efetuados recortes sobre as imagens de temperatura da superfície, índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), albedo, radiação infravermelha termal (IVT) incidente na superfície, radiação IVT emitida pela superfície e balanço de radiação, e extraídos os valores (mínimo, médio, máximo e desvio padrão) de cada variável. Tanto os recortes quanto os cálculos das estatísticas foram realizados no programa ENVI 4.7.

3.3 Modelo SEBAL

A Figura 2 ilustra os principais procedimentos para obtenção do balanço de radiação pelo modelo SEBAL, cuja implementação se deu no programa ERDAS 9.1. O balanço de radiação para o momento de passagem do sensor MODIS/Aqua ($\approx 13h30min$) foi estimado a partir da seguinte equação:

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

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 IVT

Tabela 1: Data das imagens MODIS, dia Juliano, horário, quadrado da distância relativa Terra-Sol (dr), declinação solar, ângulo zenital solar e cosseno do ângulo zenital solar no momento de passagem do satélite na área de estudo.

Data da imagem	Dia Juliano	Hora local	dr	Declinação solar ($^\circ$)	Ângulo zenital solar ($^\circ$)	Cosseno do ângulo zenital solar ($^\circ$)
23/08/2006	216	13:30:00	0,9723	11,3288	38,3134	0,7846
16/08/2007	228	13:30:00	0,9766	13,7070	40,2160	0,7636

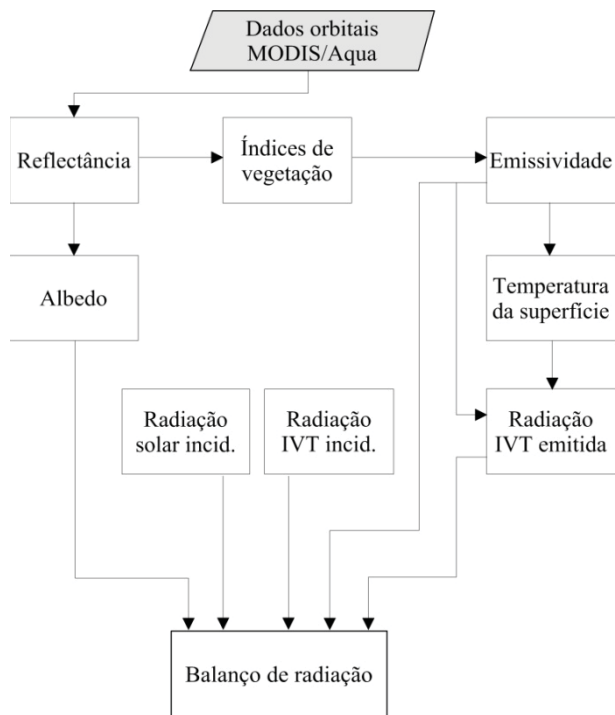


Fig. 2 - Fluxograma metodológico para determinação do balanço de radiação pelo modelo SEBAL.

incidente na superfície ($W m^{-2}$), $L \uparrow$ é a radiação IVT emitida pela superfície ($W m^{-2}$) e e_s é a emissividade da superfície.

As estimativas de albedo se deram de acordo com o estudo de 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 foi necessário calcular o NDVI, o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e o índice de área foliar (LAI). O NDVI foi obtido através da razão entre a diferença das reflectâncias nas faixas do infravermelho próximo e do vermelho pela soma das mesmas, de acordo com a Equação 3:

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (3)$$

em que r_1 e r_2 são as reflectâncias nas bandas 1 e 2 do sensor MODIS.

Para o cálculo do SAVI (HUETE, 1988), que é um índice que busca amenizar os efeitos do solo no NDVI, foi utilizada a Equação 4:

$$SAVI = \frac{(1 + \delta)\rho_2 - \rho_1}{\delta + \rho_2 + \rho_1} \quad (4)$$

em que δ é uma constante de ajuste, cujo valor mais comum encontrado na literatura é 0,5 (HUETE, 1988; BOEGH *et al.*, 2002).

Após o cálculo do NDVI e do SAVI, calculou-se o LAI através da Equação 5 (ALLEN *et al.*, 2002):

$$LAI = \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (5)$$

Assim, para o cômputo da emissividade da superfície a partir dos índices de vegetação, Allen *et al.* (2002) propuseram a aplicação da equação:

$$e_s = 0,95 + 0,01LAI \quad (6)$$

A Equação 6, entretanto, só é válida para os *pixels* que apresentarem NDVI maior que zero. Para os *pixels* com NDVI negativo, foi adotada $e_s = 0,985$ (ALLEN *et al.*, 2002).

A radiação solar incidente foi calculada através da expressão:

$$K \downarrow = \tau S_0 \left(\frac{d_m}{d}\right)^2 \cos \theta_z \quad (7)$$

em que S_0 corresponde a constante solar ($1367 W m^{-2}$), θ_z corresponde ao ângulo zenital solar (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 instante da passagem do satélite.

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

$$\tau = 0,75 + 2 \times 10^{-5} z \quad (8)$$

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:

$$L \downarrow = \epsilon_a \sigma T_a^4 \quad (9)$$

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

Como visto na Equação 9, um dos termos que se insere na equação de Stefan-Boltzmann é a emissividade da atmosfera, assim calculada:

$$\varepsilon_a = 0,85(-\ln \tau)^{0,09} \quad (10)$$

O cômputo da radiação IVT emitida pela superfície foi obtido utilizando-se a equação de Stefan-Boltzmann:

$$L \uparrow = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (11)$$

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

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 ilustra a distribuição espacial da temperatura da superfície no estado de São Paulo para os dias 23/08/2006 e 16/08/2007. Os valores médios das imagens foram de 34,5 °C (23/08/2006) e 32,7 °C (16/08/2007), o que representa uma redução de $\approx 5\%$ na imagem de 2007.

É possível observar um padrão semelhante na distribuição espacial da temperatura da superfície nos dois dias estudados. Nesse sentido, os maiores valores de temperatura estão localizados na porção oeste do estado, enquanto os menores valores concentram-se nas regiões central e leste. Esse padrão pode estar relacionado ao fato de que o centro e leste do estado possuem uma maior quantidade de remanescentes de vegetação arbórea em relação à região oeste do estado, que registra intensas mobilizações destinadas à implantação de ciclos produtivos variados (FRANCISCO, 2011) e onde as práticas agrícolas são mais acentuadas.

Na Figura 4 é apresentada a distribuição espacial do NDVI no estado de São Paulo para as duas datas avaliadas. Os valores médios de NDVI para as imagens de 2006 e 2007 foram 0,467 e 0,534, respectivamente, ou seja, verificou-se um aumento no valor médio na imagem de NDVI de $\approx 14\%$. Em ambas as imagens, os valores mais baixos de NDVI se referem aos corpos de água, enquanto os valores de maior magnitude estão relacionados a áreas de vegetação arbórea (tanto nos domínios de cerrado quanto de mata atlântica).

Observa-se que houve uma variação do NDVI nas duas datas, visto que grande parte dos valores na imagem de 16/08/2007 são superiores aos da imagem de 23/08/2006. De modo a entender essa variação foram analisadas medidas de precipitação obtidas em 38 estações meteorológicas distribuídas ao longo do estado de São Paulo. Essas medidas foram adquiridas através de boletins históricos decendiais disponibilizados pelo Sistema Agritempo. Dado o formato das informações, optou-se por utilizar medidas dos cinco períodos decendiais mais próximos a coleta de cada dado orbital. Como as imagens foram coletadas nos dias 23/08/2006 e 16/08/2007 escolheram-se, para ambos os anos em questão, os mesmos períodos decendiais, quais sejam: 1) 01/07 a 10/07; 2) 11/07 a 20/07; 3) 21/07 a 31/07; 4) 01/08 a 10/08; e 5) 11/08 a 20/08. A Figura 5 ilustra a precipitação média nas 38 estações para cada período decendial nos anos de 2006 e 2007.

Ao analisar as medidas de precipitação referentes a 2006 verifica-se que o mínimo

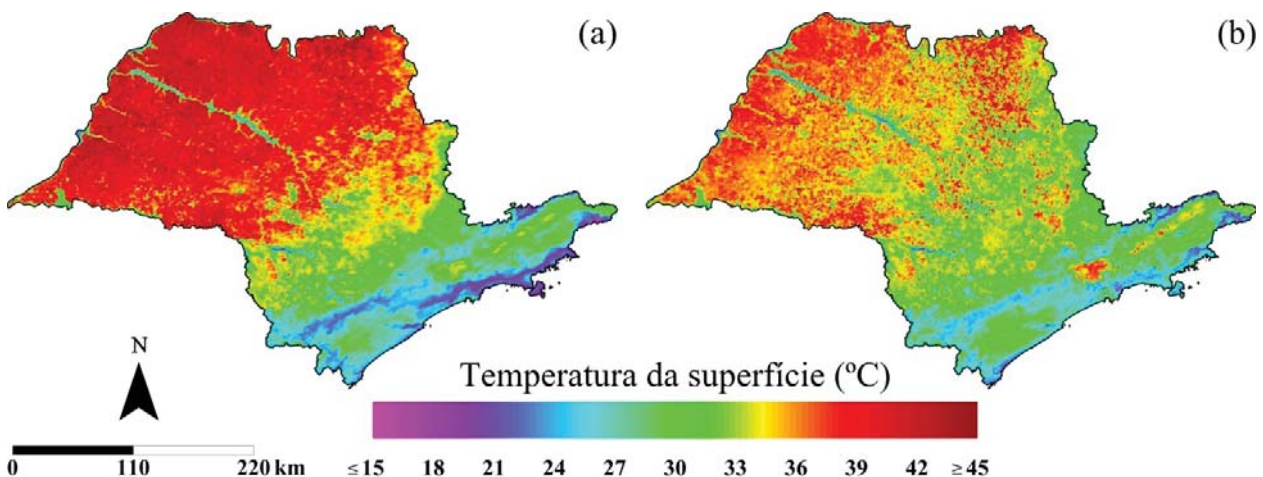


Fig. 3 - Distribuição espacial da temperatura da superfície no estado de São Paulo nos dias 23/08/2006 (a) e 16/08/2007 (b).

registrado foi de 3,13 mm, durante o período de 11/08 a 20/08, e o máximo foi de 14,78 mm entre 21/07 e 31/07. No ano de 2007 o mínimo registrado foi bastante inferior e correspondeu a 0,02 mm (período de 01/07 a 10/07), no entanto o máximo foi aproximadamente cinco vezes superior a medida mais alta verificada em 2006 e correspondeu a 70,43 mm (21/07 a 31/07). A precipitação média acumulada no período de 01/07/2006 a 20/08/2006 foi de 6,93 mm, enquanto no período de 01/07/2007 a 20/08/2007 foi de 24,13 mm ($\approx 248\%$ superior). Observando os meses de julho separadamente, verifica-se que em 2006 a precipitação média acumulada foi de 26,22 mm, e em 2007 foi de 113,96 mm. Com relação aos dois períodos decendiais do mês de agosto, observa-se que os valores de precipitação média acumulada foram de 4,23 mm em 2006 e de 3,36 mm em 2007.

Ao levar em consideração os valores de precipitação média acumulada nos cinco

períodos decendiais, em ambos os anos, verifica-se que em 16/08/2007 havia na área de estudo uma maior disponibilidade hídrica no sistema solo-vegetação-atmosfera em comparação a 23/08/2006. Neste sentido, é válido destacar que apesar dos dois períodos decendiais do mês de agosto de 2006 terem sido, em média, mais chuvosos que os dois períodos de agosto de 2007 ($\approx 21\%$), o mês de julho de 2007 apresentou um valor de precipitação média acumulada muito superior ($\approx 335\%$) ao mês julho de 2006. Assim, a alteração verificada nos valores de NDVI nas duas imagens deve-se ao fato da cobertura vegetal com maior disponibilidade hídrica diminuir sua reflectância na faixa espectral do visível e aumentar na faixa espectral do infravermelho próximo, resultando, dessa forma, em um aumento deste índice (DORIGO *et al.*, 2007).

A Figura 6 mostra a distribuição espacial do albedo para as datas de estudo. A média dos

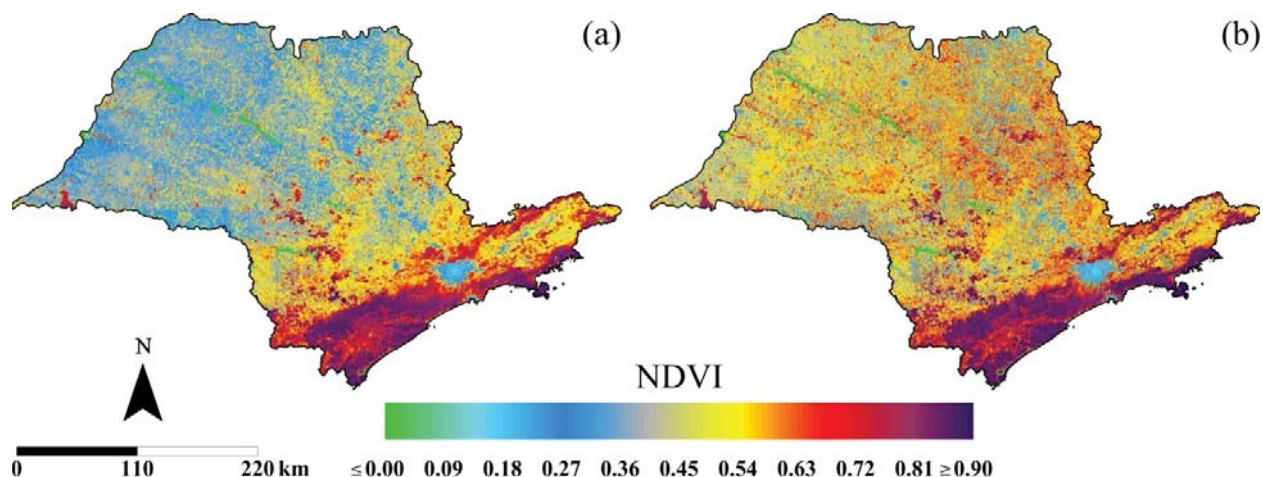


Fig. 4 - Distribuição espacial do NDVI no estado de São Paulo nos dias 23/08/2006 (a) e 16/08/2007 (b).

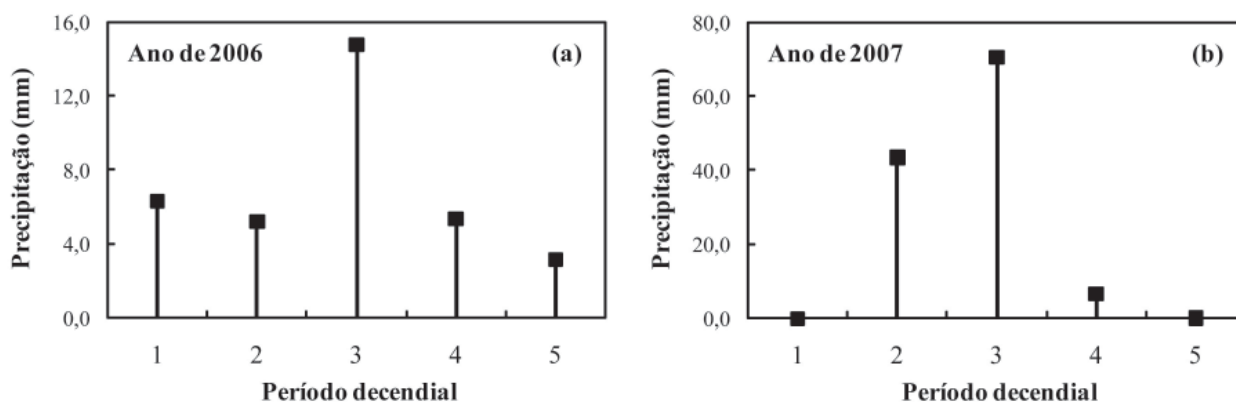


Fig. 5 - Precipitação média (mm) nas 38 estações meteorológicas localizadas no estado de São Paulo para cada período decendial (1) 01/07 a 10/07; 2) 11/07 a 20/07; 3) 21/07 a 31/07; 4) 01/08 a 10/08; e 5) 11/08 a 20/08) nos anos de 2006 (a) e 2007 (b).

valores de albedo no estado de São Paulo foi 0,176 em 23/08/2006 e 0,137 em 16/08/2007. Assim, verifica-se uma diminuição no valor médio na imagem de albedo em 16/08/2007 de $\approx 22\%$. A título de comparação, Mendonça (2007) encontrou valores médios em mapas de albedo variando entre 13% e 18%, bastante próximos aos obtidos nesta pesquisa. Nas imagens de albedo os menores valores estão associados aos corpos de água e áreas de vegetação arbórea, enquanto que os maiores referem-se a áreas de pastagem e solo com pouca vegetação.

Apesar das duas imagens serem de datas próximas, em cada um dos anos analisados, e apresentarem praticamente o mesmo ângulo zenital solar (Tabela 1) foi observada uma significativa diferença nos valores de albedo em todo estado. 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 grande 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. O esperado é que em períodos com maior disponibilidade hídrica ocorra uma redução do albedo da superfície. Neste sentido, a existência de valores mais baixos de albedo na imagem de 2007 pode estar relacionada ao fato de que, como visto anteriormente, havia uma maior umidade presente no sistema solo-vegetação-atmosfera em 16/08/2007 em comparação a 23/08/2006.

Com relação às imagens de balanço de radiação (R_n) (Figura 7), os valores médios foram de 537,0 e 556,2 $W m^{-2}$ para 23/08/2006 e 16/08/2007, respectivamente, evidenciando

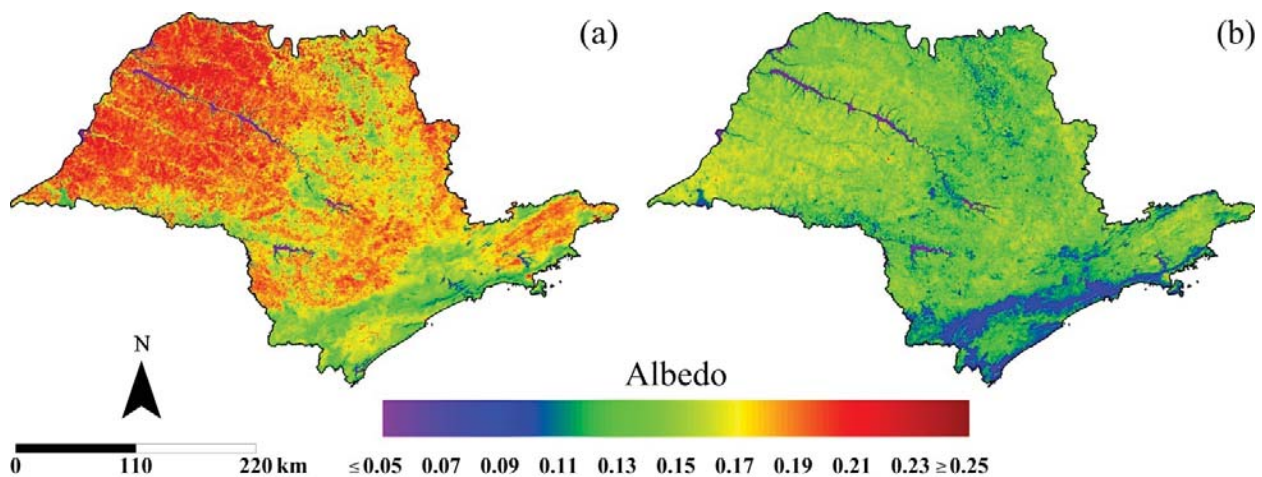


Fig. 6 - Distribuição espacial do albedo no estado de São Paulo nos dias 23/08/2006 (a) e 16/08/2007 (b).

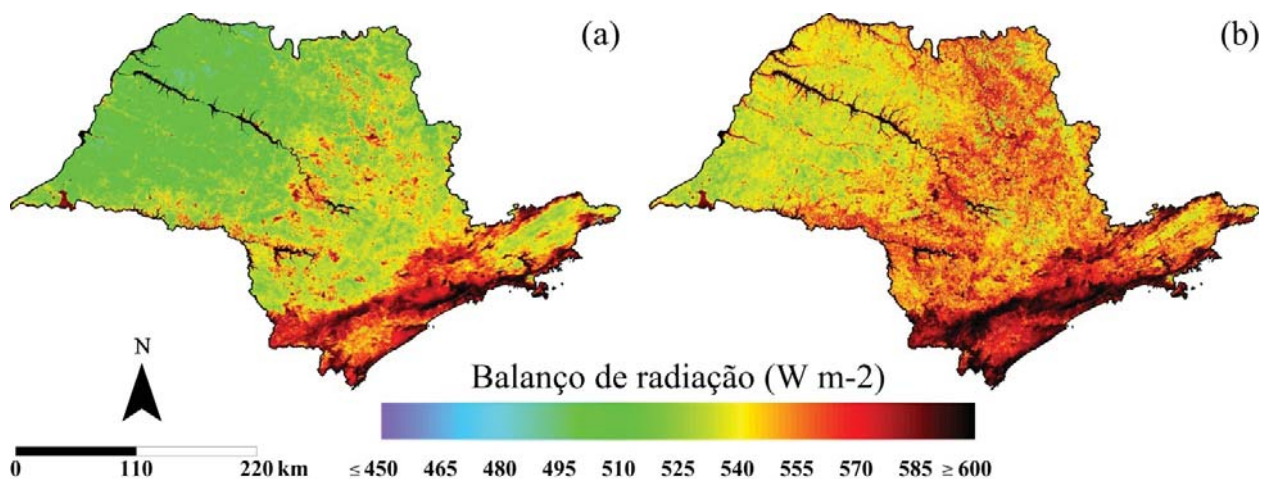


Fig. 7 - Distribuição espacial do balanço de radiação no estado de São Paulo nos dias 23/08/2006 (a) e 16/08/2007 (b).

um aumento no valor médio de R_n na imagem de 2007 da ordem de $\approx 4\%$. Bastiaanssen (2000), em um estudo na bacia de Gediz na Turquia, uma região com diversos tipos de uso e cobertura, encontrou valores de R_n variando entre 300 e 600 $W\ m^{-2}$. De maneira geral, verifica-se que áreas com maiores valores de R_n estão associadas a menores valores de albedo, enquanto áreas com menores valores de R_n estão associadas a valores mais elevados de albedo. Esse aspecto deixa clara a atuação das propriedades da superfície na reflexão da radiação solar, e sua relação com o total de energia disponibilizado à superfície para os processos de balanço de energia de uma região (BERBET e COSTA, 2003).

É importante salientar que, devido à indisponibilidade de dados *in situ* relacionados aos componentes do balanço de radiação para os dias trabalhados, não foi possível realizar a validação das estimativas geradas no presente estudo. Neste sentido, de acordo com Daughtry *et al.* (1990) o erro médio relativo entre medições e estimativas de R_n com sensoriamento remoto é inferior a 7%. Ainda, Oliveira e Moraes (2013), em um estudo utilizando imagens MODIS/Terra, encontraram na comparação das estimativas do modelo SEBAL com observações de superfície erros relativos variando entre 0,2 e 19,2%.

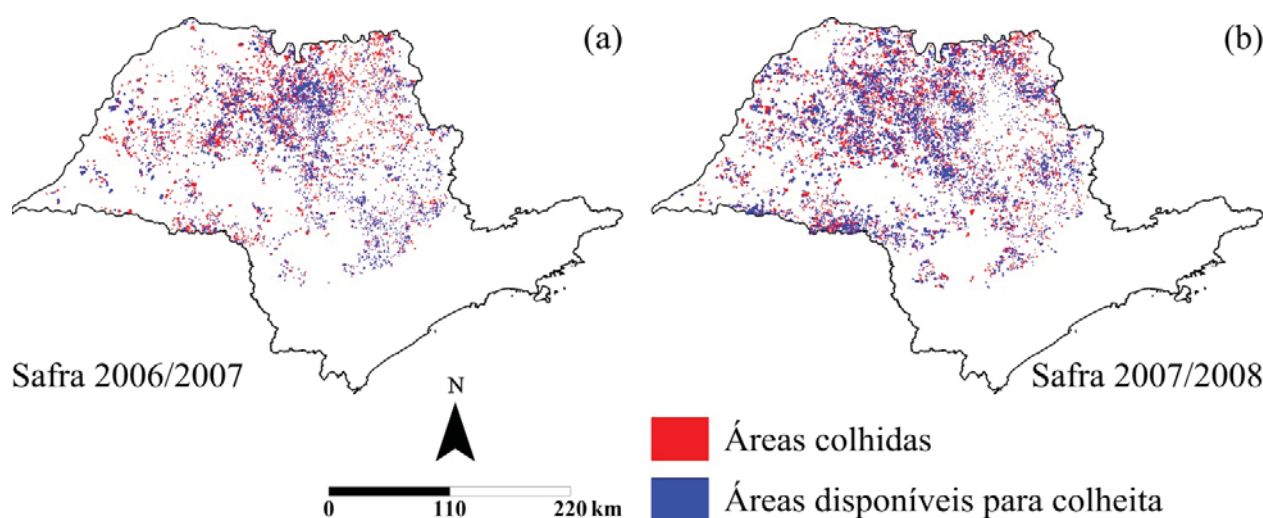
A Figura 8 ilustra as áreas de expansão do cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo nos anos-safra 2006/2007 e 2007/2008 e a Figura 9 apresenta o total de expansão do cultivo nas safras consideradas, bem como o

que estava ainda disponível para colheita nos dias 23/08/2006 (referente à safra 2006/2007) e 16/08/2007 (referente à safra 2007/2008).

Na safra 2006/2007 o total mapeado pelo Projeto Canasat como expansão foi de 305.603,00 hectares enquanto que no ano-safra 2007/2008 foi de 636.814,00 hectares, denotando um aumento de $\approx 108\%$. Após a edição dos polígonos das áreas de expansão verificou-se que em 23/08/2006 (safra 2006/2007) estavam ainda disponíveis para colheita 134.380,00 ha e em 16/08/2007 (safra 2007/2008) 278.570,00 ha. Salienta-se que a análise dos componentes do balanço radiativo se deu apenas para as áreas de cana-de-açúcar ainda disponíveis para colheita nos dias considerados.

Ao visualizar a Tabela 2 verifica-se que as variações de temperatura da superfície, NDVI, albedo e dos fluxos de energia superficiais nas áreas de cana-de-açúcar avaliadas acompanharam o esperado no que diz respeito às condições ambientais nos dias de estudo, dadas, como visto anteriormente, pela maior disponibilidade hídrica no sistema solo-vegetação-atmosfera em 16/08/2007.

O valor médio de temperatura da superfície nas áreas de expansão da cana-de-açúcar em 16/08/2007 foi 3,5 °C inferior ao verificado nas áreas de expansão em 23/08/2006, o que representa uma diferença de $\approx 9\%$. O NDVI apresentou valores médios de 0,468 (23/08/2006) e 0,589 (16/08/2007), sendo o valor da imagem de 2007 $\approx 26\%$ superior ao da imagem de 2006.



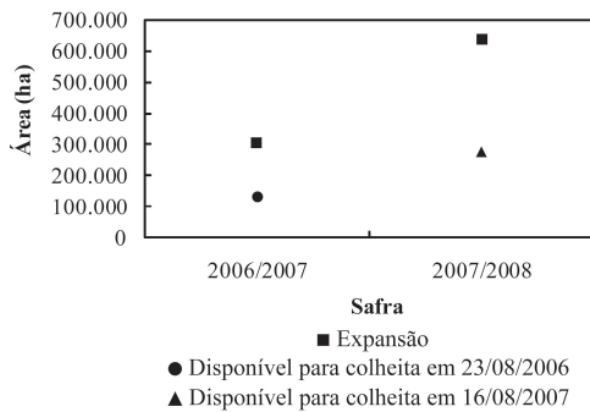


Fig. 9 - Expansão do cultivo da cana-de-açúcar nas safras 2006/2007 e 2007/2008 e áreas ainda disponíveis para colheita nos dias 23/08/2006 e 16/08/2007.

Ao se levar em consideração as duas datas, a média do NDVI para as áreas de expansão da cana-de-açúcar foi de 0,529.

Os valores de albedo variaram entre 0,043 e 0,273, sendo verificada uma diminuição de 0,042 ($\approx 22\%$) no valor médio em 16/08/2007 em comparação ao dia 23/08/2006. Na média para as duas datas, o albedo das áreas de cana de açúcar avaliadas correspondeu a 0,171. Os valores médios obtidos (0,192 e 0,150) estão de acordo com alguns estudos micrometeorológicos. Juaréz (2004) obteve para um cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, no mês de agosto de 2002, valores de albedo variando entre 0,16 e 0,20. Giongo *et al.* (2010a) encontraram para

agosto de 2005, em um cultivo de cana-de-açúcar no município de Santa Rita do Passa Quatro (SP), valores próximos a 0,187. No que diz respeito a estimativas por intermédio do modelo SEBAL, Gomes *et al.* (2009) obtiveram para o mês de julho de 2005 valores próximos a 0,20.

Os valores de radiação IVT incidente na superfície e emitida pela superfície variaram entre 335,3 e 436,7 $W m^{-2}$ (amplitude de 101,4 $W m^{-2}$), e entre 426,8 e 553,5 $W m^{-2}$ (amplitude de 126,7 $W m^{-2}$), respectivamente. Ao considerar a média para as duas datas, denota-se que a quantidade de radiação IVT emitida pela superfície foi $\approx 26\%$ superior a quantidade de radiação IVT incidente na superfície. Os valores médios de radiação IVT incidente na superfície e emitida pela superfície nas áreas avaliadas em 16/08/2007 foram $\approx 4\%$ inferiores aos das áreas analisadas em 23/08/2006. Neste sentido, o menor valor de temperatura da superfície verificado em 16/08/2007, em comparação ao dia 23/08/2006, por si só justifica o menor valor de radiação IVT emitida pela superfície (e consequentemente de radiação IVT incidente na superfície), já que esta variável é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura da superfície (conforme a lei de Stefan-Boltzmann).

O menor valor de R_n encontrado foi de 451,5 $W m^{-2}$ e o máximo de 633,8 $W m^{-2}$, ambos no dia 23/08/2006. Dessa forma, a imagem de 23/08/2006 apresentou a maior amplitude nos

Tabela 2. Valores médios de temperatura da superfície ($^{\circ}C$), NDVI, albedo, radiação IVT incidente na superfície ($W m^{-2}$), radiação IVT emitida pela superfície ($W m^{-2}$) e balanço de radiação ($W m^{-2}$) nas áreas de expansão do cultivo da cana-de-açúcar para os dias 23/08/2006 e 16/08/2007.

Parâmetro	Data	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Temperatura da superfície	23/08/2006	38,0	25,0	44,6	24,2
	16/08/2007	34,5	24,3	43,6	22,0
NDVI	23/08/2006	0,468	0,129	0,776	0,081
	16/08/2007	0,589	-0,060	0,912	0,102
Albedo	23/08/2006	0,192	0,064	0,273	0,018
	16/08/2007	0,150	0,043	0,228	0,016
Radiação IVT incidente	23/08/2006	401,5	338,6	436,7	12,4
	16/08/2007	383,8	335,3	430,8	11,0
Radiação IVT emitida	23/08/2006	508,1	428,1	553,5	15,5
	16/08/2007	486,3	426,8	544,0	13,6
Balanço de radiação	23/08/2006	520,0	451,5	633,8	15,8
	16/08/2007	543,2	481,0	630,7	13,3

valores de R_n , correspondendo a $182,3 \text{ W m}^{-2}$, enquanto a imagem de 16/08/2007 apresentou uma amplitude de $149,7 \text{ W m}^{-2}$. Ao observar os valores médios ($520,0$ e $543,2 \text{ W m}^{-2}$) verificase que o R_n foi $\approx 4\%$ superior para as áreas de expansão avaliadas em 16/08/2007, resultado que está provavelmente relacionado com os menores valores de albedo obtidos para essas áreas nessa data em comparação às áreas avaliadas em 23/08/2006. Neste sentido, o aumento do valor de R_n sugere um aumento no fluxo de calor latente (energia destinada aos processos evaporativos) e uma diminuição no fluxo de calor sensível (energia destinada ao aquecimento do ar próximo à superfície).

Os valores médios obtidos são próximos aos observados por Ruhoff *et al.* (2008), para agosto de 2001, que variaram entre 510 e 550 W m^{-2} . No entanto, os valores obtidos são discrepantes ao comparar com o estudo de Giongo *et al.* (2010b), que observaram para o mês de agosto de 2005 medidas da ordem de $354,9$ e $390,5 \text{ W m}^{-2}$. Cabe salientar que essa discrepância pode estar relacionada tanto a diferenças entre os estádios efetivos de desenvolvimento da cultura em ambos os estudos, quanto a presença de nebulosidade no momento da aquisição das informações de superfície. Lira (2008) utilizando o modelo SEBAL/METRIC encontrou para julho de 2006, em um cultivo de cana-de-açúcar no vale do rio São Francisco, valores próximos a 560 W m^{-2} .

5. CONCLUSÕES

A utilização de dados orbitais de moderada resolução espacial MODIS/Aqua complementados com informações pontuais obtidas em superfície, por meio do modelo SEBAL, possibilitou a análise do comportamento dos diferentes componentes do balanço de radiação em áreas de expansão do cultivo da cana-de-açúcar nas safras 2006/2007 e 2007/2008 no estado de São Paulo.

Os valores das variáveis estimadas pelo modelo SEBAL responderam às alterações biofísicas e à intensidade pluviométrica nos dias que antecederam a coleta dos dados orbitais. Neste sentido, a análise de medidas de precipitação ao longo do estado de São Paulo demonstrou que em 16/08/2007 (referente à safra 2007/2008) havia uma maior umidade

presente no sistema solo-vegetação-atmosfera em comparação ao dia 23/08/2006 (referente à safra 2006/2007). Assim, nas áreas avaliadas em 16/08/2007 os valores de temperatura da superfície, albedo e radiação IVT incidente na superfície e emitida pela superfície foram $\approx 9\%$, 22% e 4% inferiores aos das áreas avaliadas em 23/08/2006, enquanto o NDVI e o balanço de radiação foram $\approx 26\%$ e 4% superiores. Ainda, é válido salientar que os valores obtidos para as áreas de cana-de-açúcar foram, de modo geral, concordantes com estudos observacionais realizados no estado de São Paulo em períodos semelhantes.

Os resultados obtidos evidenciam o potencial da metodologia para estudos envolvendo o desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica. Dessa forma, sugere-se a utilização de um maior número de imagens de sensoriamento remoto cobrindo diferentes fases de crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar.

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 (FAPESP) (Processo: 08/56252-0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALA, K. O.; CASTRO, S. S. Dinâmica de uso do solo da expansão sucroalcooleira na microrregião Meia Ponte, estado de Goiás, Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, n. 4, p. 661-674, 2010.

ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T; FREITAS, R. M.; AGUIAR, D. A.; SUGAWARA, L. M.; MELLO, M. P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, v. 4, n. 4, p. 574-585, 2012.

AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; RUDORFF, B. F. T. Monitoramento do modo de colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo - Brasil por meio de imagens de sensores orbitais em dois anos-safra. **Revista Selper**, v. 30, n. 1, p. 34-43, 2010.

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.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, n. 1-2, p. 87-100, 2000.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; ALLEN, R. G. SEBAL for spatially distributed ET under actual management and growing conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 1, p. 85-93, 2005.
- BERBET, M. L. C.; COSTA, M. H. Climate change after tropical deforestation: seasonal variability of surface albedo and its effects on precipitation change. **Journal of Climate**, v. 16, n.12, p. 2099-2104, 2003.
- BHATTARAI, N.; DOUGHERTY, M.; MARZEN, L. J.; KALIN, L. Validation of evaporation estimates from a modified Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) model in the south-eastern United States. **Remote Sensing Letters**, v. 3, n. 6, p. 511-519, 2012.
- BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEN, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, n. 2-3, p. 329-343, 2002.
- BURBA, G. G.; VERMA, S. B. Seasonal and interannual variability in evapotranspiration of native tallgrass prairie and cultivated wheat ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 135, n. 1-4, p. 190-201, 2005.
- DAUGHTRY, C. S. T.; KUSTAS, W. P.; MORAN, M. S.; PINTER, P. J. JR.; JACKSON R. D.; BROWN, P. W.; NICHOLS, W. D.; GAY, L. W. Spectral estimates of net radiation and soil heat flux. **Remote Sensing of Environment**, v. 32, n. 2-3, p. 111-124, 1990.
- DORIGO, W. A.; ZURITA-MILLA, R.; DE WIT, A. J. W.; BRAZILE, J.; SINGH, R.; SCHAEPMAN, M. E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 9, n. 2, p. 165-193, 2007.
- DU J.; SONG K.; WANG Z.; ZHANG B.; LIU, D. Evapotranspiration estimation based on MODIS products and Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL) model in Sanjiang Plain, Northeast China. **Chinese Geographical Science**, v. 23, n. 1, p. 73-9, 2013.
- FRANCISCO, A. B. A erosão de solos no Extremo Oeste Paulista e seus impactos no campo e na cidade. **Revista Geomae**, v. 2, n. 2, p. 57-68, 2011.
- GIONGO, P. R.; MOURA, G. B. A.; SILVA, A. P. N.; MEDEIROS, S. R. R. Uso de sensoriamento remoto para estimar o saldo de radiação em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 18, n. 1, p. 8-21, 2010b.
- GIONGO, P. R.; MOURA, G. B. A.; SILVA, B. B.; ROCHA, H. R.; MEDEIROS, S. R. R.; NAZARENO, A. C. Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 279-287, 2010a.
- GOMES, H. B.; SILVA, B. B.; CAVALCANTI, E. P.; ROCHA, H. R. Balanço de radiação em diferentes biomas no Estado de São Paulo mediante imagens Landsat 5. **Revista Geociências**, v. 28, n. 2, p. 153-164, 2009.
- HUETE, A. R. A Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema IBGE de Recuperação Automática**, 2011. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 03 jun. 2013.
- JUÁREZ, R. I. N. **Variabilidade climática**

- regional e controle da vegetação no sudeste: um estudo de observações sobre cerrado e cana-de-açúcar e modelagem numérica da atmosfera.** 2004. 163 p. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- LEITE, M. R.; BRITO, J. L. S. Avaliação de desempenho do algoritmo SEBAL na modelagem térmica da bacia do rio Vieira no norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 1, p. 161-174, 2012.
- LIANG, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 2, p. 213-238, 2001.
- LIRA, V. M. **Obtenção de parâmetros biofísicos e evapotranspiração da cana-de-açúcar mediante imagens orbitais na região do sub médio São Francisco.** 2008. 161 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.
- LOARIE, S. R.; LOBELL, D. B.; ASNER, G. P.; MU, Q.; FIELD, C. B. Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 2, p. 105-109, 2011.
- MENDONÇA, J. C. **Estimação da evapotranspiração regional utilizando imagens digitais orbitais na região Norte Fluminense, RJ.** 2007. 167 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2007.
- OLIVEIRA, G.; MORAES, E. C. Validação do balanço de radiação obtido a partir de dados MODIS/TERRA na Amazônia com medidas de superfície do LBA. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 3, p. 353-364, 2013.
- PAPADAVID, G.; HADJIMITSIS, D. Adaptation of SEBAL for estimating groundnuts evapotranspiration, in Cyprus. **South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics**, v. 1, n. 2, p. 59-70, 2012.
- 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.
- ROJAS, F.; SCHOWENGERDT, R. A.; BIGGAR, S. F. Early results on the characterization of the Terra MODIS spatial response. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 50-61, 2002.
- 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.
- RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ROCHA, H. R.; MALHI, Y. S. A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical Savannas. **Remote Sensing**, v. 4, n. 3, p. 703-725, 2012.
- TANG, R.; LI, Z. L.; JIAD, Y.; LID, C.; CHEN, K. S.; SUN, X.; LOU, J. Evaluating one- and two-source energy balance models in estimating surface evapotranspiration from Landsat-derived surface temperature and field measurements. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 9-10, p. 3299-3313, 2013.
- YANG, Y.; SHANG, S.; JIANG, L. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 164, n. 1, p. 112-122, 2012.