

Saldo de radiação por meio de imagens orbitais na região de Botucatu-SP

Roberto Filgueiras¹
Ramilos Rodrigues de Brito¹
Victor Costa Leda¹
Jannaylton Éverton Oliveira Santos¹
Antonio Ribeiro da Cunha¹
Célia Regina Lopes Zimback¹

¹Departamento de Solos e Recursos Ambientais – Faculdade de Ciências Agrônômicas –
UNESP – Campus de Botucatu
{betofilgueiras, victorleda, czimback} @gmail.com; ramilos@hotmail.com
eng.js@hotmail.com.br; arcunha@fca.unesp.br;

Abstract. The net radiation at the surface is the energy available to trigger various meteorological and environmental phenomena. The net radiation is the algebraic difference between the flow of short-wave radiation, and the flow of long-wave radiation. The components of the radiation balance can be measured by several methods and equipment, but when the objective is realize monitoring spatial temporal, they become problematic, since it would need a network of weather stations to cover areas with large tracts territorial, making the process impossible, both operationally and economically. Thus, monitoring by remote sensing techniques, along with processing of satellite pictures, mathematical operations of bands coupled with algorithms, are of prime importance in these cases. The present study aimed to estimate the net radiation, for two dates consecutives (298 and 314) of the passage of the Landsat-5 / TM for the year 2001 to the region of Botucatu. The Net radiation was obtained using the methodology of the SEBAL algorithm, and compared with data from a weather station located on faculty of Agricultural Sciences of UNESP. It was observed that the net radiation ranged from 97.06 W m⁻² at 762.83 W m⁻², with an average value of 609.80 W m⁻² for the day 298. The behavior of the net radiation, for the day 314 ranged from 23.04 W m⁻² at 780.20 W m⁻², with an average value of 597.70 W m⁻². The large range of values observed is due mainly to the large surface heterogeneity present on area of study.

Palavras-chave: image processing, radiation balance, SEBAL, processamento de imagens, balanço de radiação, SEBAL.

1 Introdução

O saldo de radiação representa a energia disponível para os processos, após sofrer as trocas radiativas, sendo a diferença entre os fluxos das radiações incidentes e refletidas pela superfície (Cunha *et al.* 2002). Este é um parâmetro que indica o fornecimento de energia para os processos físicos, químicos, biológicos e meteorológicos de ocorrência no planeta (Batista, 2011). Existem várias formas de mensurar o saldo de radiação (Cunha *et al.* 2008) e metodologias que estimam com precisão em condição de campo, no entanto, estes métodos considerados convencionais, não possuem a capacidade de considerar a heterogeneidade da superfície.

Quando deseja-se observar o comportamento espaço temporal do saldo de radiação, há a necessidade de estimá-lo por meio de sensoriamento remoto, o que possibilita o conhecimento do comportamento do fenômeno para diferentes épocas do ano e superfícies da terra. Considerando que o saldo de radiação está inserido no balanço de energia, para a estimativa de seus parâmetros de maneira espacializada, as técnicas por meio de imagens orbitais, acopladas com algoritmos, tornam-se potenciais e indispensáveis. Um dos algoritmos mais difundidos para esta estimativa é o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) por considerar a variabilidade espacial de elementos micrometeorológicos ao longo da superfície (Di Pace, 2010).

Além da capacidade de reconhecer as diferenças entre as superfícies e retratar estas diferenças nas estimativas dos parâmetros, o sensoriamento remoto ainda detém uma enorme

vantagem operacional e econômica, frente aos métodos pontuais que são realizados em campo. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo estimar o saldo de radiação pelo algoritmo SEBAL, para duas datas de imagens Landsat-5/TM, para a região de Botucatu-SP, e comparar os resultados obtidos nas imagens orbitais com os mensurados em estação meteorológica.

2 Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

A área de estudo abrange parte dos municípios de Areiópolis, Pratânia, Itatinga, Pardinho, Conchas, Anhembi, Bofete e Piracicaba, totalizando uma área de 270.000 ha, sendo esta limitada pelas coordenadas *Universal Transverse de Mercator* (UTM): 739.755 m E e 799.725 m E; 7.493.845 m S e 7.448.875 m S, zona 22 S, DATUM WGS-84 (Figura 1).

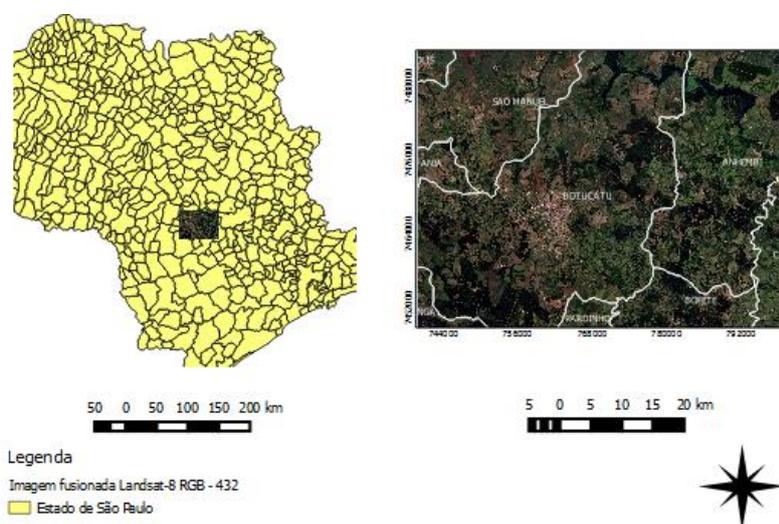


Figura 1 - Localização espacial da área de estudo.

De acordo com Cunha e Martins (2009), o clima da região é caracterizado como Cfa (temperado quente – mesotérmico, úmido, com uma temperatura média anual de 20,3 °C e uma precipitação média anual de 1.428 mm).

2.2 Obtenção do Saldo de Radiação

As imagens utilizadas no estudo foram adquiridas de maneira gratuita no site *glovis.usgs.gov*. As imagens são dos dias 25/10/2001 (298) e 10/11/2001 (314), selecionadas por corresponderem a períodos de medições de saldo radiômetro em campo, e por apresentarem baixa cobertura de nuvens. A validação do registro das imagens foi realizada utilizando uma imagem Landsat *Geocover* de 2005. Após esta etapa, foi realizada a correção atmosférica das cenas empregando a planilha desenvolvida por Gürtler (2005), seguindo a metodologia da subtração do objeto escuro desenvolvida por Chaves (1988). As equações geradas na planilha foram manipuladas no software livre Spring 5.1.8 por meio da linguagem LEGAL, obtendo desta forma a calibração radiométrica simultaneamente à correção atmosférica. Após a geração dos parâmetros, as cartas foram finalizadas no software livre Quantum Gis 2.2.0.

O início do procedimento começa com a transformação dos níveis de cinza das imagens, em valores de radiância espectral, passo este denominado de calibração radiométrica (Equação 1).

$$L\lambda_i = a_i + \frac{b_i + a_i}{255} \times ND \quad (1)$$

As radiâncias espectrais máxima e mínima de cada banda são representadas pelas letras a_i e b_i , respectivamente (Tabela 1), e ND a intensidade do pixel (número inteiro de 0 a 255).

Tabela 1 - Coeficientes de calibração e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera do satélite LANDSAT-5/TM utilizados na determinação da radiância.

Bandas	Comprimento de onda (μm)	Coeficientes de calibração ($\text{wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)		Irradiância espectral no topo da atmosfera ($\text{wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)
		a	b	
1 (azul)	0,45-0,52	-1,5	152,1	1957
2 (verde)	0,52-0,60	-2,8	296,8	1829
3 (vermelho)	0,63-0,69	-1,2	204,3	1557
4 (IV próximo)	0,76-0,79	-1,5	206,2	1047
5 (IV médio)	1,55-1,75	-0,37	27,19	219,3
6 (IV termal)	10,4-12,5	1,238	15,303	-
7 (IV médio)	2,08-2,35	-0,15	14,38	74,52

Fonte: Adaptada de CHANDERS; MARKHAM (2003).

Tendo os dados de radiância espectral é possível calcular a refletância monocromática (Equação 2), a qual representa a quantidade de energia incidente no pixel que é refletida pelo mesmo. Esta pode ser calculada seguindo equação proposta por Bastiaassen (1995).

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L\lambda_i}{K\lambda_i \cdot \cos Z \cdot dr} \quad (2)$$

Vale ressaltar, que é necessário obter os valores de refletância, sem a interferência atmosférica. Por isso, foi realizado a correção atmosférica antes desses passos. Porém, na obtenção do albedo não é necessário utilizar a refletância corrigida, visto que o algoritmo SEBAL apresenta uma correção para os efeitos atmosféricos, específico para a estimativa do albedo à superfície.

O albedo planetário é determinado seguindo uma combinação linear entre a refletância de cada banda com uma constante para as mesmas (Equação 3).

$$a_{toa} = 0.293 \rho_1 + 0.274 \rho_2 + 0.233 \rho_3 + 0.157 \rho_4 + 0.033 \rho_5 + 0.011 \rho_7 \quad (3)$$

Para amenizar os efeitos da atmosfera no cálculo do albedo da superfície, leva-se em consideração a refletância da atmosfera e a transmitância da mesma (Equação 4).

$$a = \frac{a_{toa} - ap}{\tau_{sw}^2} \quad (4)$$

Após a refletância corrigida, iniciou-se a obtenção dos índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF). Estes índices são utilizados para estimar os parâmetros necessários na obtenção da temperatura da superfície. Para estimativa destes parâmetros foi utilizado a metodologia do SEBAL, conforme Bastiaassen *et al.* (1995) e Allen *et al.* (2002).

$$NDVI = \frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v} \quad (5)$$

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{iv} - \rho_v)}{(L + \rho_{iv} + \rho_v)} \quad (6)$$

$$IAF = \frac{-\ln\left(\frac{0.69-NDVI}{0.59}\right)}{0.91} \quad (7)$$

A emissividade termal (ε_{NB}) e emissividade radiativa (ε_o), conforme Allen *et al.*(2002):

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331.IAF \quad (8)$$

$$\varepsilon_o = 0,95 + 0,01.IAF \quad (9)$$

As equações acima (eq.8 e eq.9) são válidas para $NDVI > 0$ e $IAF < 3$. Para valores de $IAF \geq 3$, $\varepsilon_{NB} = \varepsilon_o = 0,98$. Para $NDVI < 0$, $\varepsilon_{NB} = 0,99$ e $\varepsilon_o = 0,985$. Determinando esses parâmetros, calcula-se a temperatura da superfície (Equação 10), parâmetro este que depende da radiância espectral da banda 6 e da emissividade da banda estreita. A expressão encontra valores de temperatura à superfície em Kelvin (K).

$$Ts = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{nb} \cdot K_1 + 1}{Rad_{b6}}\right)} \quad (10)$$

Sendo K_1 e K_2 constantes de calibração da banda termal, Rad_{b6} a radiância da banda termal e, ε_{nb} a emissividade da banda estreita. (ALLEN *et al.*, 2002). Calculado a temperatura da superfície, estimou-se a radiação de onda longa emitida segundo (Bastiaassen, 1995; Allen *et al.*, 2002).

$$RL\uparrow = \varepsilon_o \cdot \sigma \cdot Ts^4 \quad (11)$$

Em que ε_o e Ts representam a emissividade e a temperatura da superfície, e σ a constante de Stefan Boltzmann. A radiação de onda curta incidente ($R_s\downarrow$) foi estimada segundo Allen *et al.* (2002).

$$R_s\downarrow = S \cdot \cos.Z \cdot dr \cdot \tau_{sw}^2 \quad (12)$$

Sendo S a constante solar (1.367 W m^{-2}); Z o ângulo zenital solar; dr o inverso quadrado da distância média Terra-Sol em determinado dia do ano (DJ) e τ_{sw} é transmissividade atmosférica. A radiação de onda longa incidente ($RL\downarrow$), assim como, a radiação de onda curta incidente foi considerada constante para toda a área de estudo.

$$RL\downarrow = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (13)$$

Em que: ε_a é a emissividade atmosférica; σ a constante de Stefan Boltzman e T_a a temperatura do ar (K). E por fim determinou o saldo de radiação à superfície, segundo a equação (Allen *et al.*, 2002):

$$R_n = R_s\downarrow - aR_s\downarrow + RL\downarrow - RL\uparrow - (1-\varepsilon_o)RL\downarrow \quad (14)$$

Sendo $R_s\downarrow$ a radiação de onda curta incidente à superfície; a o albedo corrigido da superfície; $RL\downarrow$ a radiação de onda longa emitida pela atmosfera; $RL\uparrow$ a radiação de onda longa emitida pela superfície; ε_o a emissividade do pixel.

3 Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta as cartas de albedo à superfície para os dias 298 e 314 de 2001, as quais apresentam média de 0,1705; 0,1787; e moda de 0,1782; 0,1888, respectivamente. Giongo *et al.* (2009) encontraram valores médios de albedo de 0,126 e 0,156 para os dias 325 e 149, respectivamente, na região de Santa Rita do Passa Quatro-SP. Lima *et al.* (2009) obtiveram para a região do Triângulo Mineiro valor médio de albedo de 0,1320, para o dia 16 de agosto de 2008.

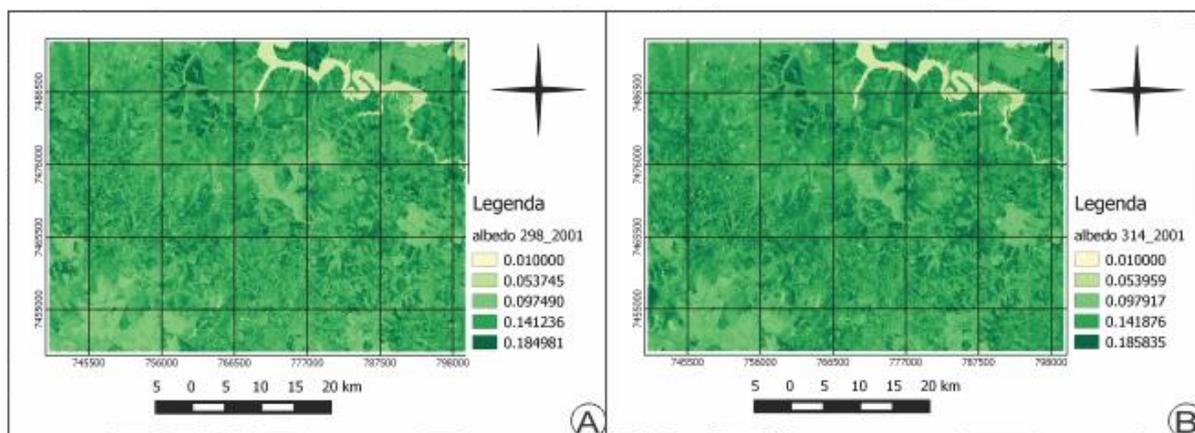


Figura 2 - Carta de albedo da superfície, referente aos dias 298 (A) e 314 (B) do ano de 2001, para a área de estudo.

Os menores valores de albedo à superfície, 0,03 a 0,07, foram encontrados sobre os corpos de água (Figura 2), destacados na porção inicial dos histogramas A e B (Figura 3), para os dias estudados. O pico de menores valores de albedo encontrados em ambas as imagens, deve-se a representatividade espacial da represa de Barra Bonita presente na área de estudo. Lima *et al.* (2009) encontraram valores de 0,01 a 0,07 para superfícies hídricas. Já Gomes *et al.* (2009) estimaram valores de albedo de 0,04 e 0,06, para os dias 22/02/2005 e 16/07/2005, respectivamente, para superfície da Lagoa do Cortado no estado de São Paulo.

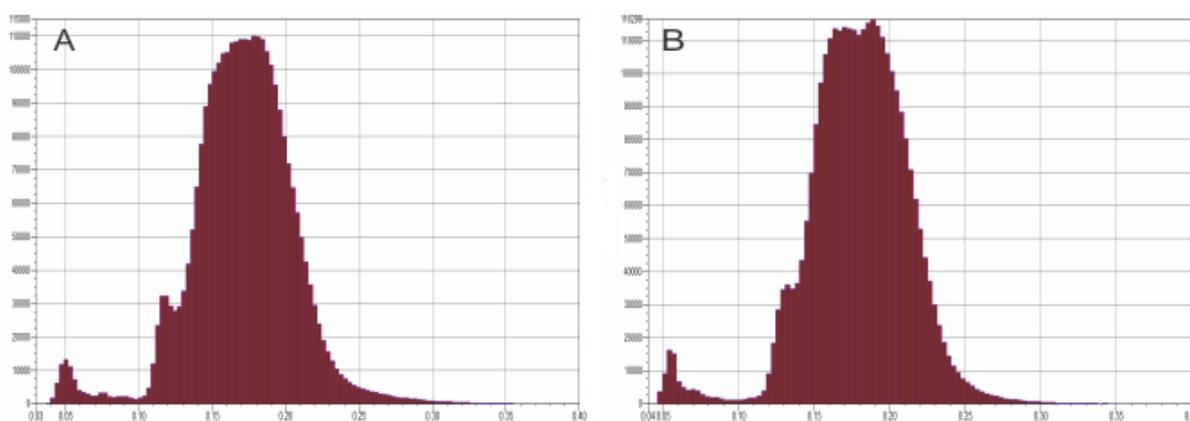


Figura 3 - Histogramas das imagens de albedo da superfície para o dia 298 (A) e 314 (B) do ano de 2001.

A Figura 4 representa as cartas de temperatura da superfície para as datas. Para o dia 298 foi estimado valores de temperatura da superfície mínimo e máximo de 295 K e 315 K, respectivamente. Para a data posterior encontrou-se valores de temperatura da superfície variando de 289 K à 314 K, representando valor mínimo e máximo, respectivamente. A média e a moda da temperatura da superfície, ao longo da área de estudo para o dia 298 foram de 303

K e 302 K, respectivamente. No dia 314 encontrou-se média e moda de 303 K e 302 K, respectivamente.

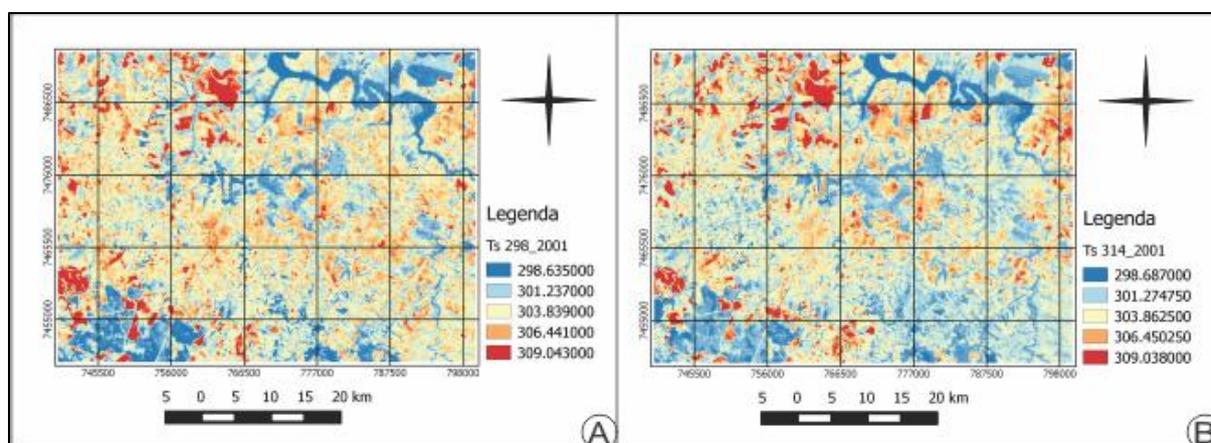


Figura 4 - Carta de temperatura da superfície, referente aos dias 298 (A) e 314 (B) do ano de 2001, para a área de estudo.

A Figura 5, apresenta a amplitude e frequência dos valores encontrados para o saldo de radiação (Rn) nos dias 298 e 314. Os valores de Rn apresentaram uma amplitude de 97,06 W m⁻² à 762,83 W m⁻² e 23,04 W m⁻² à 780,20 W m⁻² para os dias 298 e 314, respectivamente. A média e a moda do Rn encontrado para a área de estudo, foram de 609,80 W m⁻²; 597,70 W m⁻² e 623,13 W m⁻²; 607,30 W m⁻², para os dias 298 e 314, respectivamente. Observa-se um pico de maiores valores de Rn nas duas datas (Figura 5), sendo que estes são referentes à superfície de corpos de água, principalmente, a represa de Barra Bonita, localizada na porção superior da imagem. Os valores mais elevados de Rn em superfícies hídricas são explicados devido a uma maior absorção da radiação incidente, apresentando apenas um pequeno pico de refletância na região do azul, portanto, o saldo da radiação na água tende a ser mais elevado.

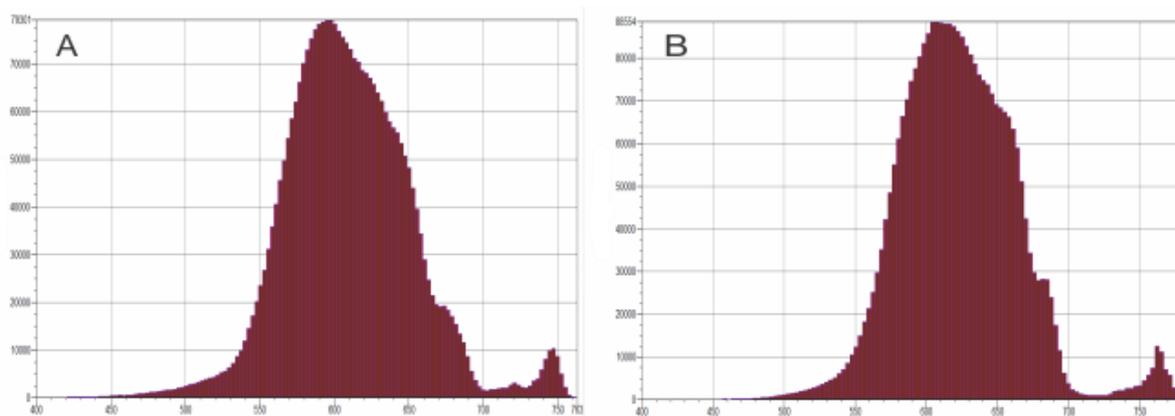


Figura 5-Histogramas da imagem de Rn dos dias 298 (A) e 314 (B) do ano de 2001.

A Figura 6 apresenta a carta do Rn à superfície, referente aos dias 298 (A) e 314 (B). Observou-se que 95% dos valores do parâmetro oscilaram entre 439,09 W m⁻² a 762,83 W m⁻² e 468,42 W m⁻² a 780,20 W m⁻², para os dias 298 e 314, respectivamente. Gomes *et al.* (2009) encontraram valores de Rn máximo e mínimo de 711,8 W m⁻² a 375,1 W m⁻², respectivamente.

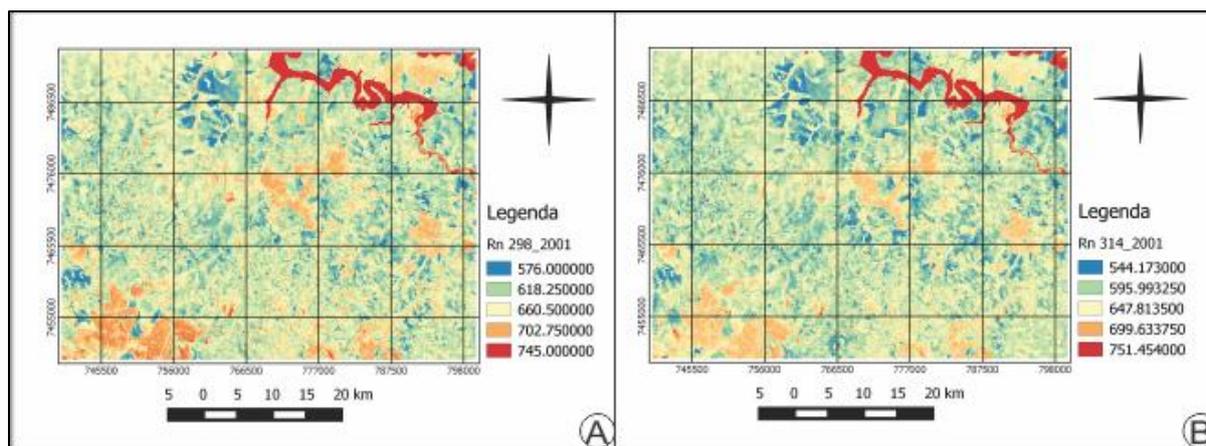


Figura 6- Carta do Rn à superfície, referente aos dias 298 (A) e 314 (B) do ano de 2001, para a área de estudo.

A Tabela 1 apresenta o Rn mensurado pela estação meteorológica (área de estudo), o valor do Rn estimado por meio das imagens de satélite para o pixel referente a estação meteorológica, e o erro relativo e absoluto entre as observações.

Tabela 2 - Medidas de temperatura do ar e Rn mensurados na estação meteorológicas, Rn estimado por imagens orbitais, erro relativo (ER) e absoluto (EA).

Dia Juliano	T _{ar}	Rn campo (W m ⁻²)	Rn satélite (W m ⁻²)	ER (%)	EA (W m ⁻²)
298	20,64	604,57	571,77	5,42	32,80
314	25,51	593,39	589,39	0,67	4,00

De acordo com Gusmão *et al.* (2012) o saldo radiômetro apresenta um erro, relativo ao instrumento, de aproximadamente 2,5 %, e o campo de visão variará num raio de 5 a 15 m de acordo com a altura, podendo equivaler a um pixel de uma imagem com resolução espacial de 30 m. Gusmão *et al.* (2012) encontraram erros relativos, entre a mensuração em campo com a estimativa do satélite de 0,1 a 4,8%.

4 Conclusões

A metodologia do algoritmo SEBAL para a determinação do saldo de radiação por meio de imagens do satélite Landsat-5/TM, para a região de Botucatu-SP, mostrou-se extremamente eficaz devido aos erros relativamente baixos;

A grande amplitude de valores de saldo de radiação para as duas datas estudadas, deve-se principalmente, a grande heterogeneidade da superfície de estudo;

Valores baixos de albedo e altos de saldo de radiação são devido à alta capacidade da água de absorver a radiação incidente.

Referências Bibliográficas

Allen, R.G.; Tasumi, M.; Trezza, R.; Waters, R.; Bastiaassen, W. **Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)** - Advanced training and User's Manual. Kimberly: Idaho Implementation, 2002. 98 p.

Bastiaansen, W.G.M. Regionalization of Surface Flux Densities and Moisture Indicators in Composite Terrain – **A Remote Sensing Approach under Clear Skies in Mediterranean Climates**. Thesis, Land bouw universite it Wageningen, Netherlands, 273, 1995.

Batista, W.R.M. **Balço de Radiação e Evapotranspiração na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré-SE Mediante Imagens Orbitais**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Agroecossistemas, Departamento de Núcleo de Pós-graduação e Estudos em Recursos Naturais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, 2011.

Chavez, P.S. Na Improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.24, p.459-479, 1988.

Cunha, A. R.; martins, D. Classificação Climática para os Municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, v.14, n.1, p.1-11, 2009.

Cunha, A.R.; Escobedo, J.F.; Klosowski, E.S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.6, p.735-743, 2002.

Cunha, A. R.; Volpe, C.V.; Escobedo, J. F. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (FAO-56) com saldo de radiação medido por diferentes sensores. **Agronomia Tropical**, v.58, n.1, p.81-84, 2008.

Di Pace, E.L. et al. Estimativa do saldo de radiação instantânea à superfície terrestre, através de imagens TM- Landsat 5 e o modelo de elevação digital. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET), 16, 2010, Belém. **Anais...** Brasília: INMET, 2010.

Giongo, P.R. et al. 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, 2009.

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. **Geociências**, v.28, p.153-164, 2009.

GÜRTLER, S. et al. PLANILHA ELETRÔNICA PARA O CÁLCULO DA REFLECTÂNCIA EM IMAGENS TME ETM+ LANDSAT. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.2, n.57, p.162-167, 2005.

Gusmão, A.C.V.L. et al. Determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.10, p.1107-1114, 2012.

Lima, E.P. et al. Estimativa do balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagem do Landsat 5 – TM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14, 2009, Natal. **Anais...** São José Dos Campos: INPE, 2009. p.255-262.