

BALANÇO DE RADIAÇÃO EM DIFERENTES BIOMAS NO ESTADO DE SÃO PAULO MEDIANTE IMAGENS LANDSAT 5

Heliofábio Barros GOMES ¹, Bernardo Barbosa da SILVA ¹,
Enilson Palmeira CAVALCANTI ¹, Humberto Ribeiro da ROCHA ²

(1) Universidade Federal de Campina Grande. Avenida Aprígio Veloso, 882. CEP 58109-970. Campina Grande, PB.

Endereços eletrônicos: heliofab@hotmail.com; bernardo@dca.ufcg.edu.br; enilson@dca.ufcg.edu.br

(2) Universidade de São Paulo/IAG. Rua do Matão, 1226 – Cidade Universitária. CEP 05508-090. São Paulo, SP.

Endereço eletrônico: humberto@model.iag.usp.br

Introdução
Dados e Metodologia
Calibração Radiométrica
Reflectância Monocromática
Albedo Planetário ou Albedo do Topo da Atmosfera
Albedo da Superfície
Emissividades
Temperatura da Superfície
Radiação de Onda Longa Emitida
Radiação de Onda Longa Incidente
Radiação de Onda Curta Incidente
Saldo de Radiação (R_n)
Resultados e Discussão
Conclusões e Considerações Finais
Referências Bibliográficas

RESUMO – A quantificação do saldo de radiação à superfície – R_n se reveste de grande importância uma vez que o mesmo se constitui na principal fonte de energia do processo evapotranspirativo. O objetivo do presente trabalho foi a determinação do balanço de radiação mediante imagens do sensor *Thematic Mapper* - TM do satélite Landsat 5 e a utilização do algoritmo SEBAL/METRIC em áreas do município de Santa Rita do Passa Quatro - SP. Os dados de R_n obtidos com o SEBAL/METRIC foram comparados com medições obtidas em duas torres micrometeorológicas: uma no Cerrado e outra em área de cana-de-açúcar. Foram utilizadas imagens TM - Landsat 5, órbita 220 e ponto 75, de 22 de fevereiro e 16 de julho de 2005, a partir das quais se obteve a radiação espectral, seguida da refletividade, índices de vegetação, albedo, emissividade, temperatura da superfície e R_n . Foram realizadas correções atmosféricas do albedo planetário e geradas cartas de R_n . Os valores do R_n obtidos segundo o SEBAL/METRIC apresentaram valores semelhantes aos dados de superfície nas estações da cana-de-açúcar e cerrado, respectivamente. Conclui-se que a metodologia empregada na estimativa de R_n nas áreas selecionadas, alcançou valores muito consistentes.

Palavras-chave: Balanço de radiação, sensoriamento Remoto, SEBAL.

ABSTRACT – *H.B. Gomes, B.B. da Silva, E.P. Cavalcanti, H.R. da Rocha - Balance of radiation in different biomass the State of São Paulo on images Landsat 5.* The determination of the net radiation at surface - R_n is very important, since it is the main energy source for the evapotranspiration process. The objective of this study was the determination of radiation balance using images from Thematic Mapper - TM sensor of the satellite Landsat 5, according to SEBAL/METRIC algorithm in areas of Santa Rita do Passa Quatro - SP. The estimated R_n data were compared with R_n measured at two micrometeorological towers: one in cerrado and other in a sugar cane crop. Two TM - Landsat 5 images, orbit 220 and path 75, on February 22th and July 16th of 2005, were used, from which radiance, reflectance, vegetation indexes, albedo, emissivity, land surface temperature and R_n were determined. The estimated R_n values showed similar values with R_n measured at sugar cane and cerrado towers. It is concluded that the SEBAL/METRIC algorithm, for estimation of R_n in selected areas, reached values very consistent.

Keywords: radiation balance, remote sensing, SEBAL.

INTRODUÇÃO

Com o advento do Sensoriamento Remoto, se tornou possível o monitoramento espacial e temporal dos diversos biomas que constituem a superfície do nosso planeta e a identificação, em tempo real, de mudanças que venham a ocorrer nos mesmos, promovidas por processos naturais e/ou antrópicos (Bastiaanssen et al.,

1998). Nesse sentido, diversos sensores a bordo de satélites ambientais, a exemplo do Thematic Mapper - Landsat 5, AVHRR – NOAA, MODIS – Terra/Aqua, dentre outros, medem a radiação solar refletida e/ou emitida por alvos à superfície, o que propicia o cômputo de sua refletividade em diferentes faixas do espectro

eletromagnético e também da temperatura da superfície – T_s (Silva et al., 2005; Souza & Silva, 2005). A combinação dessas refletâncias compõe diversos índices de vegetação que são indicadores importantes da presença e vigor da vegetação, além do albedo. Este último e a T_s são dois importantes componentes do saldo de radiação à superfície e o seu monitoramento permite a identificação de mudanças no uso do solo, com consequências importantes para o ambiente e clima em escalas local e regional.

O saldo de radiação representa a síntese da contabilidade entre os fluxos de radiação eletromagnética de onda curta (faixa espectral de 0,3 a 4,0 μm) e de onda longa (faixa de 4,0 a 100,0 μm). A radiação de onda curta incidente é representada pela radiação solar global – R_s (W m^{-2}) e pela radiação solar refletida pela superfície – R_r (W m^{-2}); a razão entre R_r e R_s define o albedo da superfície; já a radiação de onda longa é representada pela radiação emitida pela atmosfera – R_{atm} (W m^{-2}), pela radiação emitida pela superfície – R_{em} (W m^{-2}) e pela R_{atm} que vem a ser refletida pela superfície $R_{\text{atm}, r}$ (W m^{-2}).

R_n exerce um papel fundamental no processo evapotranspirativo que em essência representa fluxo de massa entre a superfície e a atmosfera e, ao mesmo tempo, constitui uma fonte extraordinária de energia a diversos fenômenos meteorológicos, como os tornados e furacões. Uma tonelada de água que evapora a superfície transporta consigo cerca de 2,45 bilhões de Joules e por essa razão desempenha um papel importante no transporte de energia entre as diferentes regiões do planeta, atuando com moderador das condições de tempo e clima no nosso planeta.

O conhecimento do saldo de radiação é fundamental na estimativa das perdas de água por superfícies vegetadas, bem como é necessário para o planejamento de atividades agrícolas irrigadas. O saldo de radiação é obtido diretamente por meio de saldo radiômetros, que raramente são empregados em estações meteorológicas, mas tão somente em campanhas experimentais, vez que têm custo elevado e suas medições são válidas para áreas com pequena dimensão. No entanto, quando há necessidade de sua determinação sobre áreas heterogêneas e em escala regional, as imagens de satélite constituem uma alternativa de baixo custo e grande cobertura espacial.

Dada as limitações do emprego amplo de saldo radiômetros, diversas metodologias alternativas baseadas em sensores orbitais têm suprido essa

grande lacuna (Silva et al., 2005; Bisht et al., 2005; Bezerra et al., 2008).

Kjaersgaard et al. (2007) obtiveram R_n com base em dados de R_s e de outras variáveis meteorológicas. Nesse estudo, a estimativa diária do saldo de radiação foi realizada utilizando regressão linear simples (função apenas de R_s) e múltipla (função de R_s , temperaturas máxima e mínima e distância média relativa Terra-Sol) e modelos empíricos acoplados com a relação física de Stefan-Boltzmann (Souza & Silva, 2005; Souza et al., 2008).

Para se estimar o saldo de radiação e demais componentes do balanço de energia à superfície com imagens de satélites, alguns algoritmos têm sido formulados e o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), proposto por Bastiaanssen (1995), tem sido aplicado e validado em diferentes ambientes. No Brasil, podem ser destacados os trabalhos de Allen et al. (2007b), Di Pace (2004), Silva et al. (2005), Silva & Bezerra (2006) e Bezerra et al. (2008), muitos dos quais aplicados em áreas irrigadas do Semiárido brasileiro.

Dois variáveis indispensáveis à determinação do R_n utilizando o sensoriamento remoto orbital são o albedo (Silva et al., 2005) e a temperatura da superfície (Souza & Silva, 2005; Souza et al., 2008; Bezerra et al., 2008). Portanto, a determinação de R_n depende de imagens que propiciem o cômputo do albedo e T_s .

Em diversos países tem se registrado a substituição de partes expressivas de florestas e outros biomas, casos bem conhecidos no Brasil do Cerrado, Mata Atlântica, Caatinga e Floresta Amazônica, dentre outros, por áreas de pastagens ou agricultura intensiva. Essas substituições podem produzir profundas alterações ambientais e podem resultar em mudanças climáticas locais, regionais e até mesmo globais. Nesse sentido, o presente estudo tem por objetivo avaliar o balanço de radiação em parte da Bacia Hidrográfica do rio Mogi-Guaçu, particularmente focando em áreas compreendendo os biomas cana-de-açúcar e Cerrado, visando identificar alguns impactos ambientais que a substituição do Cerrado pode trazer ao clima dessas áreas. Para tanto, utilizou-se do algoritmo SEBAL/METRIC e imagens TM - Landsat 5 e dados complementares de duas estações micrometeorológicas que serviram para validação do algoritmo. Em geral o SEBAL tem sido empregado em regiões de clima árido ou semiárido, e muitas de suas parametrizações foram calibradas e validadas em tais condições.

DADOS E METODOLOGIA

A área de estudo compreende parte da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu, que inclui áreas do

município de Santa Rita do Passa Quatro – SP (21°42'37"S; 47°28'41"W; 748 m), conforme ilustrado

na Figura 1, indicando a posição da área em três níveis: nacional, estadual e regional. O referido município possui população estimada em torno de 27.171 habitantes e área de 754,94 km², respectivamente (Pivello et al., 1998).

A precipitação média anual de Santa Rita do Passa Quatro é de 1478 mm e as temperaturas médias mensais situam-se entre 17,6 °C no mês mais frio (julho) a 23,5 °C no mês mais quente (fevereiro). O clima da região enquadra-se na categoria Cwa segundo a classificação de Köppen (1948), ou seja, temperado, macrotérmico, moderadamente chuvoso e com inverno seco não rigoroso (Pires Neto et al., 2005).

A área selecionada para a pesquisa compreende parte dos municípios de Santa Rita do Passa Quatro, Luis Antônio e São Simão/SP, resultando em retângulo com as seguintes coordenadas: canto superior esquerdo (longitude 47°51'09''W e latitude 21°32'37''S) e canto inferior direito (longitude 47°34'32''W e latitude 21°43'24''S). Na Figura 2 está representada a área estudada, resultante de uma composição falsa cor RGB 5, 4, e 3, com destaque para as torres micrometeorológicas nos biomas Cerrado (A) e Cana-de-açúcar (B), área com vegetação irrigada (Eucalipto) (C), e Lagoa do Cortado (D). Foram utilizadas duas imagens TM - Landsat 5 na órbita 220 e ponto 075, obtidas às 9h30min (tempo legal) dos dias 22 de fevereiro e 16 de julho de 2005, selecionadas por não apresentar cobertura de nuvens sobre a região de estudo. Essas imagens

foram empilhadas e recortadas utilizando-se o *software* ERDAS 8.7, que resultou no retângulo da área estudada (Figura 2). O sensor TM mede a radiância espectral de cada pixel e os armazena em forma digital, cuja *intensidade* varia de 0 a 255 (8 bits).

Para a obtenção do *Balço de radiação à superfície* foram empregados vários modelos, utilizando-se como ferramenta de programação a função *Model Maker* do ERDAS 8.7, destinados às tarefas descritas a seguir. Empregou-se o algoritmo SEBAL/METRIC com as imagens TM - Landsat 5 e alguns dados de estações meteorológicas da região. Para validar o Rn foram consideradas medições de Rn conduzidas em saldo radiômetro (LI-200SA Pyranometer Sensor), em duas torres micrometeorológicas instaladas no cerrado e cana-de-açúcar.

As bases teóricas e computacionais do SEBAL estão descritas por Bastiaanssen et al. (1998) e detalhadas em Allen et al. (2002a). Os fundamentos usados no METRIC para obtenção de Rn são basicamente os mesmos usados SEBAL; no entanto, no METRIC foram adotadas correções propostas por Trezza (2002) e Tasumi (2003) que o tornam aplicável em áreas montanhosas, com pixels com considerável inclinação e que alteram os valores da refletividade de cada pixel, afetando o cômputo dos índices de vegetação, albedo e, conseqüentemente, do saldo de radiação. Na Figura 3 estão representadas as diferentes etapas do processamento do balanço de radiação.

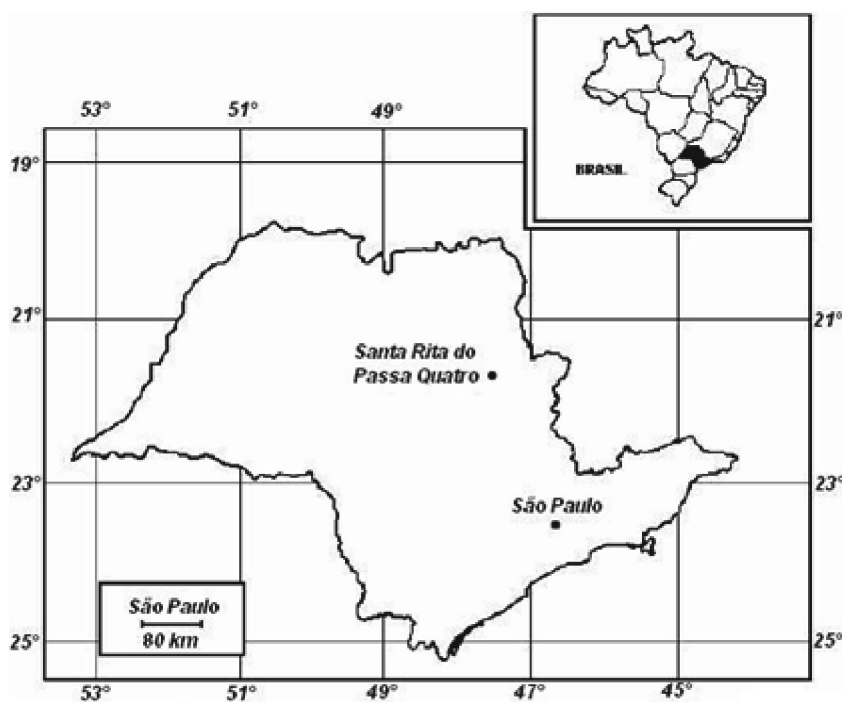


FIGURA 1. Localização da área de estudo em três níveis: nacional, estadual e regional.

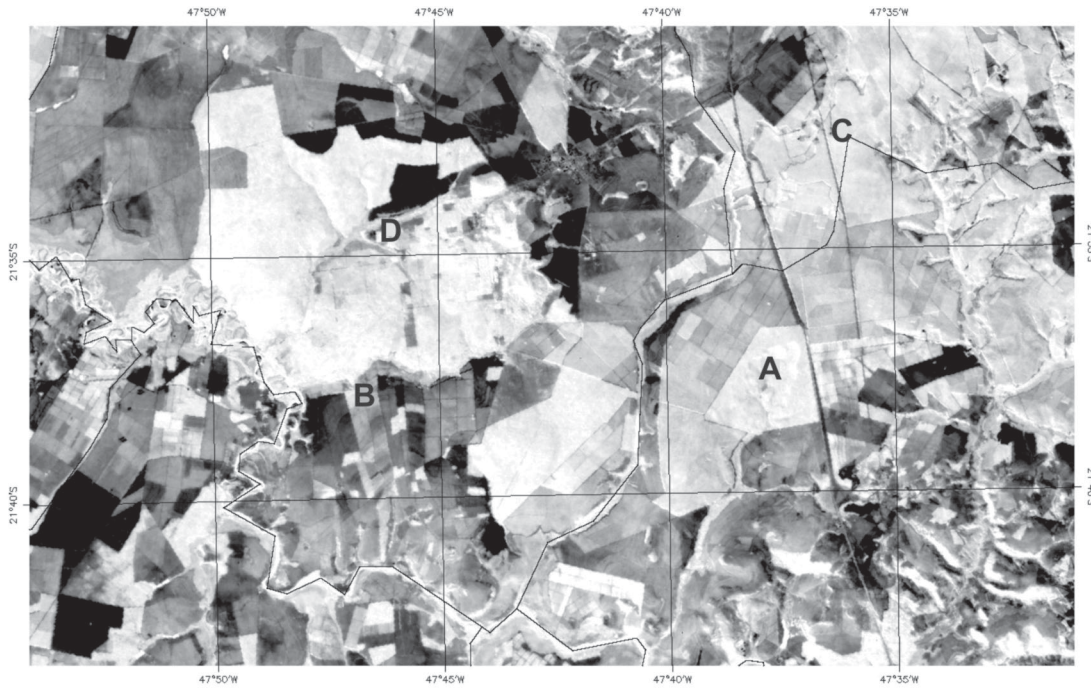


FIGURA 2. Recorte da imagem da área em estudo com combinações das bandas espectrais 5, 4, 3/RBG em composição falsa cor, realçando as torres micrometeorológicas nos biomas de cerrado (A), cana-de-açúcar (B), área irrigada (C) e lagoa do cortado (D).

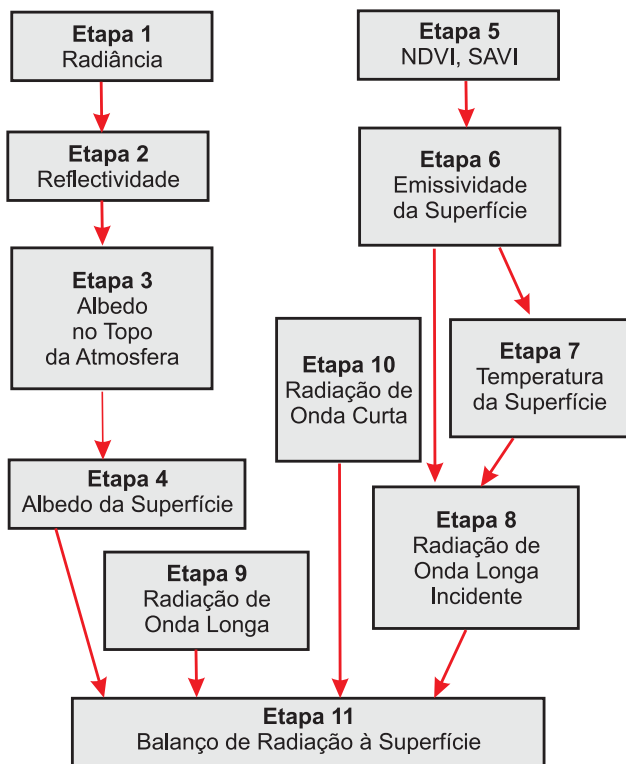


FIGURA 3. Diagrama das etapas do processamento do balanço de radiação à superfície.

CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA

Compreende a primeira etapa computacional do SEBAL e representa a conversão do número digital (ou intensidade) de cada pixel – DN (adimensional) em radiância espectral – L_{λ} ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), que é calculada pela seguinte expressão:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255} \right) \times DN + L_{MIN} \quad (1)$$

em que L_{MAX} e L_{MIN} são as constantes de calibração de cada uma das sete bandas do TM - Landsat 5 propostos por Chander & Markham (2003), apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Constantes de calibração do TM - Landsat 5.

Banda	L_{MIN}	L_{MAX}
$(W m^{-2} ster^{-1} \mu m^{-1})$		
1	-1,52	193,0
2	-2,84	365,0
3	-1,17	264,0
4	-1,51	221,0
5	-0,37	30,2
6	1,2378	15,303
7	-0,15	16,5

REFLECTÂNCIA MONOCROMÁTICA

A refletância monocromática (ρ_λ) é definida como a razão entre a radiação solar refletida e a radiação solar incidente em cada pixel, no domínio espectral de cada banda do TM – Landsat 5, o que em outras palavras representa a porção da radiação solar que é refletida por cada banda, sendo o seu cômputo obtido pela equação (Bastiaanssen et al. (1998); Allen et al., 2002; Silva et al., 2005):

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \cdot L_\lambda}{ESUN_\lambda \cdot \cos \theta \cdot d_r} \quad (2)$$

em que L_λ ($W m^{-2} sr^{-1} mm^{-1}$) é a radiância espectral; $ESUN_\lambda$ ($W m^{-2} mm^{-1}$) é a constante solar monocromática associada a cada banda do TM – Landsat 5 cujos valores estão apresentados na Tabela 2; θ é o ângulo zenital do Sol; e, d_r é o inverso do quadrado da distância Terra-Sol (Allen et al., 2002).

TABELA 2. Valores do $ESUN_\lambda$ ($W m^{-2} \mu m^{-1}$) válidos para o Landsat 5.

Banda	$ESUN_\lambda$ (W m-2)
1	1957,0
2	1826,0
3	1554,0
4	1036,0
5	215,0
7	80,67

ALBEDO PLANETÁRIO OU ALBEDO DO TOPO DA ATMOSFERA

O cálculo do albedo no topo da atmosfera - α_{toa} é feito através de uma combinação linear das refletâncias espectrais (ρ_λ) e dos coeficientes (ω_λ) de acordo com a equação:

$$\alpha_{\text{tos}} = \rho_1 \cdot \omega_1 + \rho_2 \cdot \omega_2 + \rho_3 \cdot \omega_3 + \rho_4 \cdot \omega_4 + \rho_5 \cdot \omega_5 + \rho_7 \cdot \omega_7 \quad (3)$$

em que os coeficientes são dependentes dos valores da irradiância solar - $ESUN_\lambda$ das bandas do TM – Landsat 5, segundo relação:

$$\omega_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\sum ESUN_\lambda} \quad (4)$$

ALBEDO DA SUPERFÍCIE

No SEBAL o albedo da superfície é obtido mediante correção atmosférica que considera a

transmitância - τ_{sw} e a refletância atmosférica - α em todo o domínio da radiação de onda curta, sendo determinado por meio da equação (Bastiaanssen, 1995; Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2002; Silva et al., 2005):

$$\omega_{\text{sup}} = \left(\frac{\omega_{\text{toa}} - a}{d} \right) \quad (5)$$

em que d é igual ao quadrado de τ_{sw} e este último pode ser obtido segundo equação proposta por Allen et al. (1998), qual seja:

$$\tau_{\text{sw}} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} z \quad (6)$$

em que z é a altitude de cada pixel.

No METRIC as correções atmosféricas são aplicadas a cada banda individualmente mediante proposta de Tasumi (2003), bem documentada em Allen et al. (2007), ocasião em que são computadas as transmitâncias e refletâncias atmosféricas de cada banda com código de transferência radiativa denominado MODTRAN (Berk et al., 1999); esse código analisa os impactos da umidade atmosférica, temperatura do ar e presença de aerossóis na absorção e espalhamento atmosféricos. A refletância da superfície, corrigido os efeitos atmosféricos, para a banda b - $\rho_{\text{sup},b}$ é estimada por (Tasumi, 2003; Allen et al., 2007):

$$\rho_{\text{sup},b} = \frac{\rho_{\text{toa},b} - \rho_{\text{atm},b}}{\tau_{\text{in},b} \cdot \tau_{\text{out},b}} \quad (7)$$

em que $\rho_{\text{toa},b}$ e $\rho_{\text{atm},b}$ representam as refletâncias de cada pixel e da própria atmosfera, respectivamente, ao nível do satélite.

Portanto, no topo da atmosfera; $\tau_{\text{in},b}$ é a transmitância atmosférica relativa a radiação solar incidente e $\tau_{\text{out},b}$ é a transmitância atmosférica relativa a radiação de onda curta refletida pela superfície, todos calculados individualmente para cada banda do satélite e dados por:

$$\tau_{\text{in},b} = C_1 \exp \left[\frac{C_2 P}{K_t \cos \theta_{\text{hor}}} - \frac{C_3 W + C_4}{\cos \theta_{\text{hor}}} \right] + C_5 \quad (8)$$

e

$$\tau_{\text{out},b} = C_1 \exp \left[\frac{C_2 P}{K_t \cos \eta} - \frac{C_3 W + C_4}{\cos \eta} \right] + C_5 \quad (9)$$

em que C_1 - C_5 são constantes que dependem do satélite e que foram calibradas mediante o MODTRAN (Tabela 3); η é o ângulo zenital do sensor, que é igual a zero para o TM – Landsat 5.

TABELA 3. Coeficientes para usar com imagens Landsat (Tasumi et al., 2008).

Coeficiente	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
C ₁	0,98700	2,319000	0,951000	0,375000	0,234000	0,365000
C ₂	-0,00071	-0,000160	-0,000330	-0,000480	-0,001010	-0,00097
C ₃	0,000036	0,000105	0,000280	0,005018	0,004336	0,004296
C ₄	0,088000	0,043700	0,087500	0,135500	0,056000	0,015500
C ₅	0,078900	-1,269700	0,101400	0,662100	0,775700	0,639000
C _b	0,640000	0,310000	0,286000	0,189000	0,274000	-0,186000
w _b	0,254000	0,149000	0,147000	0,311000	0,103000	0,036000

O parâmetro $\rho_{\text{atm},b}$ é obtido segundo expressão (Tasumi, 2003; Allen et al., 2007):

$$\rho_{a,b} = C_b(1 - \tau_{in,b}) \quad (10)$$

em que C_b se encontra representado na Tabela 3.

O albedo da superfície é, então, calculado pela equação a seguir:

$$\alpha_s = \sum_{b=1}^n [\rho_{s,b} \cdot w_b] \quad (11)$$

onde w_b é o fator de ponderação da equação anterior, calculado pela equação (5) e apresentado na Tabela 3.

O método para a obtenção do albedo pelo METRIC, com esses fatores de ponderação, é recomendado para sensores com ângulos de visada igual ou inferior a 20°. Todas as imagens Landsat têm ângulo de visada próximo do na (Tasumi et al., 2008).

EMISSIVIDADES

O cálculo da temperatura da superfície foi feito por meio da equação de Planck invertida, proposta para um corpo negro, para o qual a emissividade é igual a 1. Como cada pixel não constitui um corpo negro, há necessidade de se estabelecer a sua emissividade no domínio espectral da banda termal (ϵ_{NB}), para fins do cômputo da T_s , bem como no cômputo da radiação de onda longa emitida pela superfície, que nesse caso é considerada a emissividade da banda larga (ϵ_0) (4 – 100 μm).

O cômputo de ambas as emissividades foi feito através das seguintes equações (Allen et al., 2002; Trezza, 2002; Tasumi, 2003):

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331 IAF \quad (12)$$

e

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 IAF \quad (13)$$

em que IAF é o Índice de área foliar (m^2 / m^2) que representa a razão entre a área total de todas as folhas

contidas em dado pixel, pela área do pixel. Considerou-se $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$ quando $IAF > 3$ e para corpos de água $\epsilon_{NB} = 0,99$ e $\epsilon_0 = 0,985$, conforme proposto por Allen et al. (2002). O IAF, por sua vez, foi obtido em função do IVAS - Índice de vegetação com ajuste do solo, proposto por Huete (1988), segundo equação:

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - IVAS}{0,59}\right)}{0,91} \quad (14)$$

O IVAS foi obtido por:

$$IVAS = (1 + L)(\rho_4 + \rho_3)/(L + \rho_4 + \rho_3) \quad (15)$$

em que ρ_3 e ρ_4 são as refletâncias das bandas 3 e 4 do TM – Landsat 5, e L é um fator de ajuste do solo.

TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE

A obtenção da Temperatura da superfície - T_s (K), como mencionado anteriormente, foi feita através da equação de Planck invertida, que é função da radiância espectral da banda termal $L_{\lambda,6}$ e da emissividade ϵ_{NB} :

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{b,6}} + 1\right)} \quad (16)$$

onde $K_1 = 607,8 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ e $K_2 = 1261 \text{ K}$

RADIAÇÃO DE ONDA LONGA EMITIDA

O terceiro termo do balanço de radiação é representado pela radiação de onda longa emitida pela superfície - $R_{\text{ol,sup}}$ (W m^{-2}), que é obtida pela equação de Stefan-Boltzmann, em função da temperatura T_s e da emissividade da superfície - ϵ_0 , qual seja:

$$R_{\text{ol,sup}} = \epsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (17)$$

em que σ é constante de Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) e os outros termos já foram definidos.

RADIAÇÃO DE ONDA LONGA INCIDENTE

A radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície – $R_{ol,atm}$ ($W m^{-2}$) também foi calculada pela equação de Stefan-Boltzmann, em função da emissividade do ar – ϵ_a e da temperatura do ar – T_a , obtida em estação meteorológica na área de estudo:

$$R_{ol,atm} = \epsilon_a \sigma T_a^4 \quad (18)$$

e a emissividade do ar, por seu lado, foi obtido segundo modelo proposto por Bastiaanssen (1995), calibrado por Allen et al. (2002a):

$$\epsilon_a = 0,85.(\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (19)$$

em que τ_{sw} é a transmitância atmosférica média diária relativa à radiação de onda curta.

RADIAÇÃO DE ONDA CURTA INCIDENTE

A radiação de onda curta – $R_{oc,inc}$ corresponde à radiação solar que incidente em cada pixel por ocasião da passagem do satélite e de modo geral pode ser computado para cada pixel da cena segundo a equação (Allen et al., 2002; Trezza, 2002; Tasumi, 2003; Silva et al., 2005):

$$R_{oc,inc} = G_{sc} \times \cos \theta_{rel} \times d_r \times \tau_{sw} \quad (20)$$

em que G_{sc} é a constante solar ($1367 W m^{-2}$); τ_{sw} é a transmitância atmosférica; d_r é o inverso do quadrado da distância Terra-Sol e θ_{rel} é o ângulo de incidência solar.

A τ_{sw} foi calculada mediante função proposta pela ASCE-EWRI (2005):

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \exp \left[\frac{-0,00146P}{K_t \cos \theta_{hor}} - 0,075 \left(\frac{W}{\cos \theta_{hor}} \right)^{0,4} \right] \quad (21)$$

em que P é a pressão atmosférica (kPa); W a água precipitável na atmosfera (mm); q_{hor} o ângulo zenital do Sol; K_t o coeficiente de turbidez ($0 < K_t < 1,0$), onde $K_t = 1,0$ para ar limpo e $K_t = 0,5$ para turbidez extrema, poeira ou ar poluído (Allen et al., 2007a).

A pressão atmosférica – P (kPa) foi calculada por:

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (22)$$

sendo 293 a temperatura padrão do ar (K), como usada pela EWRI em suas padronizações da ET; z é a altitude local (m); e W (mm) é calculada usando a pressão de vapor – e_a (kPa) medida em uma estação meteorológica na área de estudo, de acordo com a equação (Garrison & Adler, 1990):

$$W = 0,14e_a P_{ar} + 2,1 \quad (23)$$

Para superfícies horizontalmente planas q_{rel} é equivalente ao ângulo zenital solar. No entanto, para superfícies inclinadas q_{rel} pode ser calculado pixel a pixel usando as informações da inclinação e aspecto derivados do Modelo de Elevação Digital (MED) e da equação proposta por Duffie & Beckman (1991):

$$\begin{aligned} \cos \theta_{rel} = & \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi)\cos(s) - \\ & \text{sen}(\delta)\cos(\phi)\text{sen}(s)\cos(\gamma) + \\ & \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(s)\cos(\varpi) + \\ & \cos(\delta)\text{sen}(\phi)\text{sen}(s)\cos(\gamma)\cos(\varpi) + \\ & \cos(\delta)\text{sen}(\gamma)\text{sen}(s)\text{sen}(\varpi) \end{aligned} \quad (24)$$

em que δ é a declinação do Sol (positivo no verão no Hemisfério Norte); ϕ a latitude do pixel (positivo para o Hemisfério Norte e negativo para o Hemisfério Sul); s a inclinação da superfície, onde $s = 0$ para superfície horizontal e $s = \pi/2$ rad para inclinação vertical (s é sempre positivo e representa a inclinação em qualquer direção); γ o ângulo do aspecto da superfície, onde $\gamma = 0$ para inclinações orientadas diretamente para o sul, $\gamma = -\pi/2$ rad para inclinações orientadas para leste, $\gamma = +\pi/2$ rad para inclinações voltadas para o oeste e $\gamma = +\pi$ rad para inclinações orientadas para o norte. O parâmetro ϖ é o ângulo horário, onde $\varpi = 0$ para o meio dia solar, ϖ é negativo pela manhã e positivo à tarde. Todas as funções trigonométricas estão em radianos.

Para uma superfície horizontal, onde a inclinação $s = 0$, a equação (23) reduz-se a:

$$\cos \theta_{hor} = \text{sen}(\delta) \text{sen}(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\varpi) \quad (25)$$

que corresponde ao cosseno do ângulo zenital solar.

SALDO DE RADIAÇÃO (R_n)

O saldo de radiação foi obtido pela seguinte equação:

$$R_n = (1-\alpha)R_{oc,inc} + R_{ol,atm} - R_{ol,emi} - (1-\epsilon_0)R_{ol,atm} \quad (26)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram escolhidos quatro alvos na cena estudada para uma análise mais detalhada das componentes do Balanço de Radiação e da acuidade da técnica: (A) área com bioma cerrado, (B) área cultivada com cana-de-açúcar, (C) área com vegetação irrigada, e (D) Lagoa do Cortado, todos os quatro alvos representados na Figura 2 e cujos resultados estão incluídos na Tabela 4. De acordo com a Tabela 4, observa-se que os valores do NDVI do Cerrado são superiores ao da cana-de-açúcar, enquanto o albedo do Cerrado é substancialmente menor que o da cana-de-açúcar. Essa condição de baixo albedo eleva o saldo de radiação de onda curta, com implicações em Rn, como será visto mais adiante. A emissividade da superfície (ϵ_0) dos alvos selecionados não apresentou qualquer diferença, com valor igual a 0,97 muito próximo, portanto, dos obtidos por Quaidrari et al. (2002) para áreas vegetadas (0,98).

Ainda de acordo com Quaidrari et al. (2002), a emissividade de solos descobertos varia de 0,92 a 0,96,

resultados que se aproximam bastante dos encontrados neste trabalho, que em manchas de solo descoberto variou de 0,91 a 0,93. Vários estudos sugerem que a emissividade pode ser a maior fonte de erros nas estimativas de temperatura da superfície – Ts usando imagens de satélite (Becker, 1987; Quaidrari et al., 2002). A Ts da cana-de-açúcar foi visivelmente superior a do Cerrado, que na imagem de julho registrou diferença de 4,1 °C. Ao utilizar o SEBAL em território americano, Morse et al. (2001) e Allen et al. (2002) arbitraram, para a emissividade dos solos descobertos, o valor de 0,965.

Na Tabela 5 estão representados o saldo de radiação – Rn ($W m^{-2}$) e a radiação de onda longa emitida ($W m^{-2}$) em pixels das áreas de Cerrado e cana-de-açúcar. Pode-se observar que os menores valores do Rn (maiores valores da radiação de onda longa) ocorreram na área com cultivos de cana-de-açúcar e os maiores (menores valores da radiação de onda longa) na Lagoa do Cortado.

TABELA 4. Parâmetros instantâneos obtidos em quatro alvos distintos, para os dias 22/02/2005 e 16/07/2005, nas áreas estudadas.

Parâmetros		A	B	C	D
		Cerrado	Cana-de-açúcar	Área irrigada	Lagoa do Cortado
NDVI	22/02/2005	0,71	0,65	0,78	-0,30
	16/07/2005	0,60	0,39	0,78	-0,28
Albedo	22/02/2005	11 %	18 %	11 %	4 %
	16/07/2005	12 %	20 %	13 %	6 %
Emissividade	22/02/2005	0,97	0,97	0,98	0,99
	16/07/2005	0,96	0,96	0,98	0,99
Temperatura	22/02/2005	25,2	26,9	24,1	25,4
	16/07/2005	20,9	25,0	20,0	17,9

TABELA 5. Componentes do balanço de radiação para quatro diferentes alvos, para o dia 22 de fevereiro e 16 de julho de 2005, na hora de passagem do satélite.

Alvo	Data da imagem TM	Rn ($W m^{-2}$)	R _{ol,emi} ($W m^{-2}$)
Cerrado	22 de fevereiro	628,5	435,4
	16 de julho	376,2	414,9
Cana-de-açúcar	22 de fevereiro	570,9	448,2
	16 de julho	309,9	435,3

Os valores da radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície - $R_{ol,atm}$ foram iguais a $452,2 \text{ Wm}^{-2}$ e $420,2 \text{ Wm}^{-2}$ para as imagens de fevereiro e julho do 2005, respectivamente. Os valores de $R_{ol,emi}$ na área de Cerrado foram iguais a $435,4 \text{ Wm}^{-2}$ e $414,9 \text{ Wm}^{-2}$, respectivamente às imagens de fevereiro e julho, portanto, menores que aqueles obtidos para áreas de cana-de-açúcar, com valores de $448,2 \text{ Wm}^{-2}$ e $435,3 \text{ Wm}^{-2}$, respectivamente aos meses de fevereiro e julho de 2005. Os valores de R_n , por sua vez, foram maiores nos pixels de Cerrado, o que pode ser atribuído a dois fatores: diferença entre os albedos dos alvos e à temperatura da superfície. Pode-se concluir preliminarmente que o aumento no albedo

diminui o saldo de radiação de onda curta e que o aumento da T_s faz diminuir o saldo de radiação - R_n . O aumento de T_s não pode ser explicado apenas pelo aumento do albedo, vez que reduziria o saldo de onda curta, mas haveria que se avaliar o comportamento dos fluxos de calor sensível e de calor latente para explicar mais consistentemente o aumento da T_s .

Na Figura 4 A e B estão representados os valores do saldo de radiação (R_n) para as datas estudadas, na qual as áreas mais claras indicam maiores valores de R_n . Os valores mínimo e máximo observados na cena foram: $375,1 \text{ Wm}^{-2}$ e $711,8 \text{ Wm}^{-2}$, em 22/02/05 e $207,9 \text{ Wm}^{-2}$ e $448,1 \text{ Wm}^{-2}$, em 16/07/05, respectivamente.

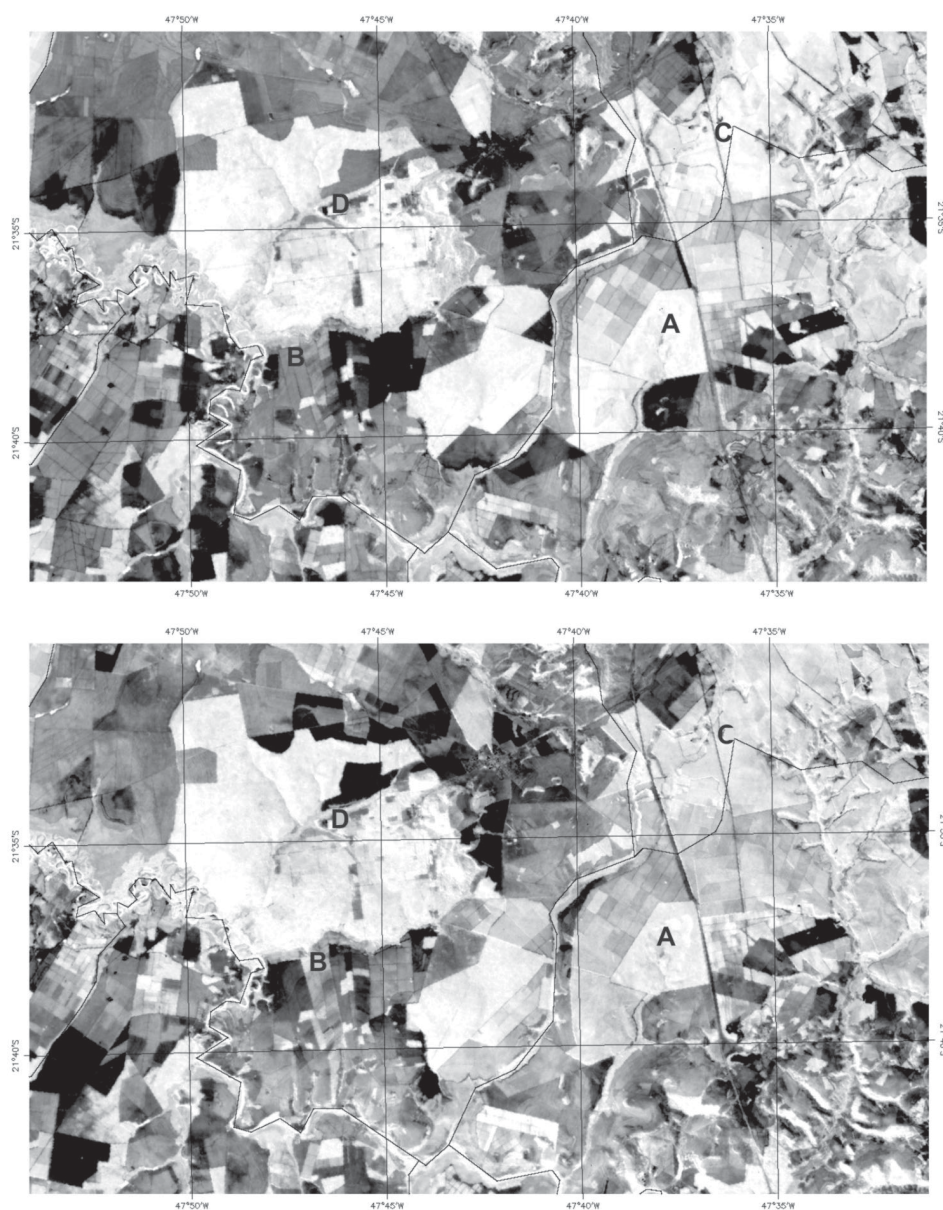


FIGURA 4 (A E B). Saldo de radiação na superfície (W.m^{-2}) para os dias 22/02/05 (a) e 16/07/05 (b), obtido através do sensor TM - Landsat 5. As regiões correspondem às áreas estudadas: (A) Cerrado, (B) Cana-de-açúcar, (C) Área irrigada e (D) Lagoa do Cortado.

Foram observadas mudanças significativas nos valores de Rn entre os meses estudados; essas mudanças podem ser explicadas fundamentalmente com resultantes da sazonalidade da radiação solar, ou seja, na quantidade de radiação de onda longa incidente nas áreas de estudo que em fevereiro é substancialmente superior aos valores que ocorrem no mês de julho, e também na resposta da vegetação à sua fenologia (caso da cana-de-açúcar) e distribuição intranual das precipitações pluviárias mensais. Pode-se observar que os menores valores de Rn ocorreram em áreas com grande exposição do solo, portanto, baixo NDVI, em áreas com cultivo de cana-de-açúcar em

fase fenológica inicial; os maiores valores de Rn, por seu turno, foram registrados em cursos e reservatórios de água, principalmente devido ao seu baixo albedo e temperatura, e nas áreas de Cerrado e plantios de eucalipto. Segundo Daughtry et al. (1990) o erro médio entre medições e estimativas de Rn com sensoriamento remoto são inferiores a 7%. Na Tabela 6 estão representados os valores do saldo de radiação obtidos pelo SEBAL/METRIC e os observados nas torres da cana-de-açúcar e cerrado. No dia 22/02/05 os erros relativos foram inferiores a 1%. Em 16/07/05 os erros foram superiores a 1% nos dois biomas destacados, evidenciando, assim, a precisão do algoritmo.

TABELA 6. Valores do saldo de radiação instantâneo – Rn (Wm^{-2}) dos biomas Cerrado e da cana-de-açúcar obtidos mediante SEBAL/METRIC e medições das torres micrometeorológicas, com respectivos erros relativos (%).

Data	Rn (Wm^{-2}) - Cerrado			Rn (Wm^{-2}) - Cana-de-açúcar		
	Estimado	Medido	Erro (%)	Estimado	Medido	Erro (%)
22/02/2005	638,0	640,6	0,4	570,0	566,0	0,7
16/07/2005	374,3	352,1	6,3	324,7	320,5	1,3

Na área de cultivo de cana-de-açúcar o Rn encontrado foi inferior ao da área do bioma Cerrado, $374,3 Wm^{-2}$. Na área do Cerrado o Rn variou entre $638,0 Wm^{-2}$ e $374,3 Wm^{-2}$. Valores semelhantes de Rn medidas na superfície, obtidos na estação micrometeorológica, em torno de $640,6 Wm^{-2}$ e $352,1 Wm^{-2}$ em fevereiro e julho/05, respectivamente.

Bastiaanssen (1998) obteve Rn variando de $400 Wm^{-2}$, em deserto, para $500 Wm^{-2}$, em oásis. Dubayah (1992) obteve Rn com correção de modelo de elevação digital igual a $654 Wm^{-2}$, e Rn não corrigido de $643 Wm^{-2}$, valores mais próximos aos do presente estudo e aos

de Bastiaanssen (1998). Porém, conforme resultados encontrados na Tabela 6, o saldo de radiação (Rn) da cana estudada em 22/02/05 foi ligeiramente maior que em 16/07/05, o que pode estar associado à ocorrência de chuva em dias próximos à passagem do Landsat na área estudada.

Como consequência, o albedo e a temperatura da superfície em 22/02/05 foram superiores aos observados em 16/07/05 na estação. O saldo de radiação no cerrado foi sistematicamente maior que sobre a cana-de-açúcar, apesar da irradiância solar incidente ter sido semelhante nas áreas.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A técnica do balanço de radiação com imagens de satélites produziu valores dos componentes do balanço de radiação sobre: cultivos de cana-de-açúcar e cerrado, na região de Santa Rita do Passa Quatro (SP), consistente com observações realizadas do balanço radiativo à superfície.

O algoritmo SEBAL/METRIC se apresenta como uma ferramenta importante para a obtenção da distribuição espaço-temporal no cálculo do Rn. Evidenciando que o mesmo pode ser aplicado de forma operacional, para grandes áreas, utilizando imagens de baixa resolução. Uma vez que, a única informação de superfície necessária para o cálculo do Rn é a temperatura próxima a superfície.

Os resultados evidenciaram a importância e precisão do SEBAL/METRIC para determinação dos componentes do balanço de radiação a superfície, não obstante as dimensões das áreas utilizadas na sua validação.

O saldo de radiação no cerrado foi sistematicamente maior que sobre cana e similar ao do eucalipto, apesar da irradiância solar incidente ter sido semelhante nas áreas. A média do albedo no cerrado foi de 12 %, e na cana 19 %, e no caso das áreas irrigadas foi similar ao do cerrado. O menor albedo e a menor temperatura diurna sobre o cerrado foram os principais responsáveis pela diferença do saldo de radiação entre o cerrado e a cana.

As comparações da temperatura do ar entre as áreas apontaram para uma temperatura máxima maior sobre a cana do que sobre o cerrado (em média de 1,3 a 2 °C), consistente com a partição de energia naquelas áreas. Já a temperatura mínima foi menor

na cana em relação ao cerrado (por 1,2 °C em média), devido em grande parte a maior velocidade do vento à noite sobre o cerrado. Dessa forma a amplitude térmica diária foi maior na cana em comparação ao cerrado.

AGRADECIMENTOS

Aos orientadores no curso de doutorado: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva e Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti, pelas sugestões. Ao programa de Pós-graduação em Meteorologia da UFCG pelo apoio concedido à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLEN, R.G. Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 122, p. 97-106, 1996.
2. ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) – *Advanced Training and Users Manual* – Idaho Implementation, version 1.0, 2002.
3. ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, p. 380-394, 2007 (a).
4. ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J.L.; BASTIAANSEN, W.G.M.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C.W. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, p. 395-406, 2007 (b).
5. ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**. Rome, Italy, 1998.
6. ASCE–EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. ASCE–EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Report, ASCE, **Reston**, Va. 2005.
7. BASTIAANSEN, W.G.M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Ph.D. Thesis, **Wageningen Agricultural**. University, Wageningen, Netherlands, 1995.
8. BASTIAANSEN, W.G.M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate. Ph.D. Dis., CIP Data Koninklijke Bibliotheek, **Den Haag, the Netherlands**, 272 p., 1998.
9. BASTIAANSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212/213, p. 198-212, 1998.
10. BECKER, F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 10, p. 1509-1522, 1987.
11. BERK, A.; ANDERSON, G.P.; BERNSTEIN, L.S.; ACHARYA, P.K.; DOTHE, H.; MATTHEW, M.W.; ADLER-GOLDEN, S.M.; CHETWYND JR., J.H.; RICHTSMEIER, S.C.; PUKALL, B.; ALLRED, C.L.; JEONG, L.S.; HOKE, M.L. MODTRAN4 Radiative Transfer Modeling for Atmospheric Correction. **SPIE Proceeding, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III**, v. 3756, p. 348-353, 1999.
12. BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B. DA; FERREIRA, N.J. Estimativa da evapotranspiração diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, p. 305-317, 2008.
13. BISHT, G.; VENTURINI, V.; ISLAM, S.; JIANG, L.E. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 52-567, 2005.
14. CHANDER, G. & MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 11, p. 2674-2677, 2003.
15. DAUGHTRY, C.S.T.; KUSTAS, W.P.; MORAN, M.S. Spectral estimates of net radiation and soil heat flux. **Remote Sensing of Environment**, v. 32, p. 111-124, 1990.
16. DI PACE, F.T. **Estimativa do Balanço de Radiação à Superfície Terrestre Utilizando Imagens TM - Landsat 5 e Modelo de Elevação Digital**. Campina Grande, 120 f. 2004. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande.
17. DUBAYAH, R. Estimating Net Solar Radiation using Landsat TM and Digital Elevation data. **Water Resources Research**, v. 28 (a), p. 2469-2484, 1992.
18. DUFFIE, J.A. & BECKMAN, J. **Solar engineering of thermal processes**. John Wiley & Sons, 2ª ed., p. 28-110, 1991.
19. GARRISON, J.D. & ADLER, G.P. Estimation of precipitable water over the United States for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. **Solar Energy**, v. 44, p. 225-241, 1990.
20. HUETE, A.R. A soil adjusted vegetation index – SAVI. **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988.
21. KJAERGAARD, J.H.; CUENCA, R.H.; PLAUBORG, F.L. Long-term comparisons of net radiation calculation schemes. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 123, p. 417-431, 2007.
22. KÖPPEN, W. **Climatologia**. México: Editora Fondo de Cultura Económica, 1ª ed., 207 p., 1948.
23. MORSE, A.; TASUMI, M.; ALLEN, R.G.; KRAMBER, W.J. Application of the SEBAL Methodology for Estimating

- Consumptive Use of Water and Streamflow Depletion in the Bear River Basin of Idaho through Remote Sensing – Final Report. **Idaho Department of Water Resources** – University of Idaho, 2000.
24. PIRES NETO, A.G.; ROCHA, H.R.; COOPER, M.; SHIDA, C.N. Caracterização física do Cerrado Pé-de-Gigante e uso das terras na região: 1. Fisiografia da região. In: V.R. PIVELLO & E.M. VARANDA (Eds.), **O cerrado do Pé-de-Gigante: Ecologia e Conservação – Parque Estadual de Vassununga**. Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente (SMA), São Paulo, p. 15-28, 2005.
25. PIVELLO, V.R.; BITENCOURT, M.D.; MANTOVANI, W.; MESQUITA JR., H.N.; BATALHA, M.A.; SHIDA, C. Proposta de zoneamento ecológico para a reserva de cerrado Pé-de-Gigante (Santa Rita do Passa Quatro, SP). **Revista Brasileira de Ecologia**, v. 2, p. 108-118, 1998.
26. QUAIDRARI, H.; GOWARD, S.N.; CZAJKOWSKI, KP.; SOBRINO, J.A.; VERMOTE, E. Land surface temperature estimation from AVHRR thermal infrared measurements: In assessment for the AVHRR land Pathfinder II data Set. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 114-128, 2002.
27. SILVA, B.B. & BEZERRA, M.V.C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, p. 1-10, 2006.
28. SILVA, B.B. DA; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. DE. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.
29. SOUZA, J.D. & SILVA, B.B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 1-10, 2005.
30. SOUZA, J.D., SILVA, B.B., CEBALLOS, J.C. Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 1, p. 31-44, 2008.
31. TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. Idaho, 2003. 357 p. PhD Thesis – Department Biological and Agricultural Engineering, University of Idaho.
32. TASUMI, M.; ALLEN, R.G.; TREZZA, R. Estimation of at surface reflectance and albedo from satellite for routine, operational calculation of land surface energy balance. **Journal of Hydrology**, v. 13, n. 2, p. 51-63, 2008.
33. TREZZA, R. **Evapotranspiration using a satellite-based Surface energy balance with Standardized ground control**. Logan, Utah, 2002. 247 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Biological and Agricultural Engineering) – Utah State University.

*Manuscrito Recebido em: 12 de abril de 2009
Revisado e Aceito em: 8 de setembro de 2009*