

Determinação do balanço de radiação com auxílio de imagens orbitais na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré, Sergipe

The radiation balance in Jacaré River Basin – By Orbital

W. R. M. Batista¹; A. O. A. Netto²; B. B. Silva³; A. I. F. Sousa²; A. N. Vasco⁴

¹*Programa de Pós-graduação em Agroecossistemas, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-SE, Brasil*

²*Departamento de Engenharia Agrônômica, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-SE, Brasil*

³*Universidade Federal de Pernambuco, 50670-901, Recife-PE, Brasil*

⁴*Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-SE, Brasil*

anderovasco@yahoo.com.br

(Recebido em 25 de setembro de 2012; aceito em 30 de abril de 2013)

O sensoriamento remoto tem se mostrado eficaz na avaliação de fluxos de energia e de propriedades biofísicas de superfícies vegetadas em escala regional. O presente trabalho objetivou determinar o balanço de radiação da bacia hidrográfica do rio Jacaré, usando parte do algoritmo Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) e imagens do satélite Landsat 5 - TM dos dias 17/10/1999 e 07/12/2006. Houve a realização das seguintes etapas: calibração radiométrica, reflectância, albedos planetário e da superfície, transmissividade atmosférica, índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação ajustado para a influência do solo (SAVI), índice de área foliar (IAF), emissividades, temperatura da superfície, radiações de onda longa e curta descendente, radiação de onda longa ascendente, saldo de radiação e fluxo de calor no solo. Os resultados mostraram alterações pouco acentuadas entre os alvos pontuais estudados – caatinga, cultivo irrigado e mata atlântica; no entanto, na análise geral das cenas, diferenças consideráveis no albedo foram identificadas. Vale evidenciar que o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) apresentou intensas variações entre os dois momentos estudados. O valor médio resultante da contabilização total do saldo de radiação à superfície (Rn) foi de 585,1 W/m² para o ano de 1999 e de 578,7 W/m² para 2006, portanto um pouco maior para o ano de 1999. A metodologia proposta para determinação do balanço de radiação na bacia hidrográfica do rio Jacaré se mostrou consistente, uma vez que os resultados obtidos foram compatíveis com informações reportadas na literatura e com produtos gerados a partir de imagens orbitais para locais similares à realidade constatada na área de estudo.

Palavras-chave: Balanço de energia; bacia hidrográfica; SEBAL

Remote sensing has been proven effective in the evaluation of energy flows and biophysical properties of vegetated surfaces on a regional scale. This paper aimed to determine the radiation balance of the Jacaré river basin, State of Sergipe, Brazil, by using part of SEBAL algorithm - Surface Energy Balance Algorithm for Land - and satellite images of Landsat-5 TM, of 17/10/1999 and 07/12/2006. The following jobs were developed: radiometric calibration, reflectance, planetary and surface albedo, atmospheric transmissivity, normalized difference vegetation index (NDVI), soil-adjusted vegetation index (SAVI), leaf area index (LAI), emissivities, surface temperature, long-wave and short-wave radiations, balance of radiation and flow of heat in the ground. Results showed very slight changes between the targets investigated - caatinga, irrigated cultivation and Atlantic Forest, however, in the general analysis of orbital scenes, substantial differences in albedo were identified. It is worth highlight that the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) showed intense variations between both periods. The average surface radiation (Rn) was 585.1 W/m² for 1999 and 578.7 W/m² for 2006, so a little higher for the year of 1999. The methodology used to determine the radiation balance in the Jacaré river basin proved to be consistent, since the results obtained were compatible with data from specific literature for places like the study area.

Keywords: Energy balance; Hydrological basin; SEBAL

1. INTRODUÇÃO

Com o advento cada vez mais frequente das novas tecnologias, o sensoriamento remoto vem se tornando um importante aliado ao aprimoramento na gestão e planejamento dos recursos naturais. Atualmente, com o desenvolvimento dos produtos de sensoriamento remoto, foram desenvolvidas técnicas de estimativa do balanço de radiação na superfície, dos fluxos de calor e da evapotranspiração através de imagens de satélite. A grande vantagem desses métodos é permitir estimativas em escala regional, tornando-se ferramentas de grande utilidade para o manejo racional da irrigação na bacia hidrográfica [15;16].

Dentre as técnicas que podem ser consideradas nesse contexto, o sensoriamento remoto é uma das que possuem um grande potencial de aplicação, pois representa um avanço significativo no levantamento de dados, no monitoramento e no planejamento agrícola e ambiental [8].

Os dados gerados por sensoriamento remoto são potencialmente úteis na legislação, planejamento e alocação de recursos hídricos, avaliação de impactos ambientais e avaliação do desempenho de sistemas de irrigação. Além disso, podem prover informações sobre uso e ocupação da terra, dimensão de áreas irrigadas, desenvolvimento de biomassa, previsão de colheita, escoamento superficial, balanço de radiação, energia e evapotranspiração [3].

Para o processamento dessas informações, com o objetivo de revelar aspectos ou informações importantes para o planejamento hidroagrícola, faz-se necessário o uso de ferramentas auxiliares, a exemplo dos modelos matemáticos e demais sistemas de informações geográficas, que garantem precisão e agilidade na tomada de decisão.

Medições dos componentes do balanço de radiação e dos fluxos de vapor d'água e de calor sensível numa bacia hidrográfica são essenciais para o entendimento dos processos que alteram esse ecossistema no ciclo de água local, regional e global. Esses dados também são necessários aos estudos de modelagem sobre as respostas do regime hidrológico da bacia às variações das condições ambientais.

O balanço de radiação em determinada superfície representa a contabilização líquida entre toda energia radiante recebida e perdida pela superfície. O saldo de radiação constitui-se da soma algébrica dos balanços de radiação de ondas curtas e longas, considerando-se positivos os fluxos incidentes e negativos aqueles emitidos pela superfície [13]. O conhecimento desses processos é essencial, dada sua forte influência no ciclo hidrológico, o que proporciona alterações relevantes no regime climático e no entendimento de outros fenômenos atmosféricos, a exemplo dos processos de aquecimento e resfriamento do ar e do solo, do metabolismo das plantas e animais e na transferência de vapor d'água da superfície para atmosfera em diferentes regiões do globo terrestre.

Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho foi determinar os componentes do balanço de radiação e identificar possíveis mudanças na área da bacia hidrográfica do rio Jacaré, em dois períodos distintos, por meio de técnicas e produtos de sensoriamento remoto e de dados complementares de superfície.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1- Área de estudo

A área selecionada (Figura 1) para a pesquisa corresponde à bacia hidrográfica do rio Jacaré, a qual abrange parte dos municípios de Poço Redondo e Canindé do São Francisco, no Estado de Sergipe. O rio Jacaré é um afluente da margem direita do rio São Francisco e faz parte do baixo São Francisco Sergipano.

A hidrografia do rio Jacaré orienta-se no sentido N-NE e é formada por vários tributários, dentre eles destacam-se o Riacho Novo, o Córrego Santa Maria e o Riacho do Brás, sendo este último, o mais importante da margem esquerda. Com relação à margem direita do Rio Jacaré, destacam-se os Riachos do Boqueirão, o Riacho da Guia, o Riacho São Clemente e o Riacho Craibeiro, com características fisiográficas semelhantes.

O rio Jacaré tem uma extensão de 73,5 Km, a área da bacia é de 943,98 Km², o perímetro da área é de 142,77 Km, o desnível entre a nascente e a foz é de 270 m, a declividade média da bacia é de 4,8 m/Km, declividade na foz é maior que 20%, o índice de forma é igual a 0,53 e o índice de compacidade é igual a 1,3. Tais índices indicam suscetibilidade a enchentes e inundações, segundo a literatura consultada [13].

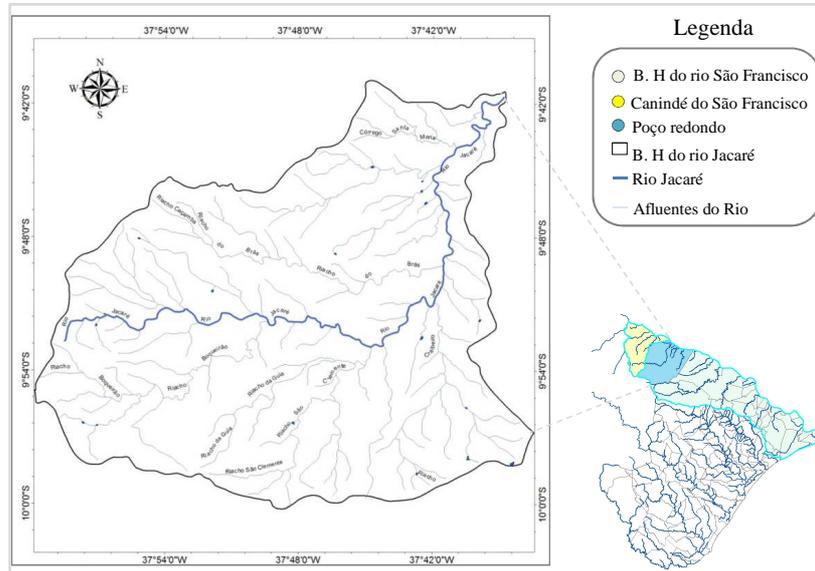


Figura 1: Bacia hidrográfica do rio Jacaré e seus afluentes principais. Fonte: Atlas Digital sobre Recursos Hídricos do Estado de Sergipe – 2004.

A vegetação nativa dominante na área da Bacia hidrográfica do rio Jacaré é a caatinga hiperxerófila. Verifica-se nesta formação vegetal a presença de indivíduos de porte arbóreo, isoladamente ou em pequenos grupos, com predominância de arbustos e árvores baixas e um grande número de cactáceas e bromeliáceas [14]. Os solos da Bacia hidrográfica do rio Jacaré são rasos, pouco permeáveis, apresentando afloramentos rochosos na superfície e no perfil, o que contribui para restrições do seu uso e propensão à erosão e salinização. Os solos identificados na região foram o Neossolo Litólico, o Planossolo, o Vertissolo e o Luvisolo.

Na área de estudo, o regime pluviométrico é do tipo mediterrâneo, tendo um período seco de primavera-verão com déficit hídrico elevado, que aumenta de sudeste para noroeste. A estação seca é de sete a oito meses, e a chuvosa de cerca de quatro meses [12](Figura 2). Segundo a classificação climática de GAUSSEN, o clima da Subárea é do tipo 3aTh – mediterrâneo quente ou nordestino, de seca acentuada no verão e segundo KOPPEN, Bssh' – clima muito quente, semiárido, tipo estepe, com estação chuvosa no inverno. O índice xerotérmico oscila entre 100 e 150, com 7 a 8 meses considerados mais secos e cerca de 4 meses de período chuvoso.

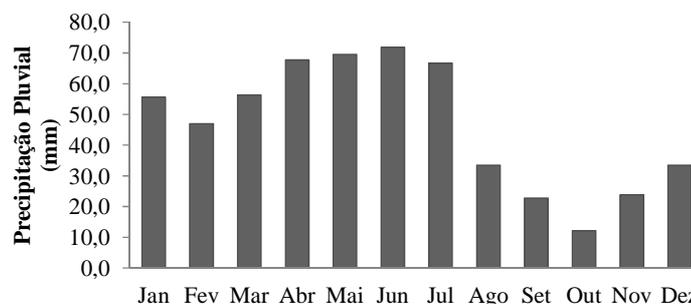


Figura 2: Normal climatológica da precipitação pluviométrica média mensal do município de Poço Redondo - SE, região do Baixo São Francisco no período de 1963 a 2010. Fonte: (DEAGRO).

2.1. Base de Dados

Foram utilizadas imagens adquiridas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) nos sete canais espectrais do Mapeador Temático – TM, do satélite Landsat 5, correspondentes aos dias 17 de outubro de 1999 e 07 de dezembro de 2006 (Tabela 1) e informações meteorológicas (temperatura do ar, umidade relativa, radiação global e velocidade do vento) de uma estação automática pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), situada no Centro de Formação Dom Brandão de Castro (latitude 09°50'28" Sul, longitude 37°40'13" Oeste e 260 m de altitude).

O satélite mede a radiância espectral dos alvos e armazena tais dados sob a forma de números digitais (ND), com intensidade dos níveis de cinza variando de 0 a 255 (8 bits), no caso do TM - Landsat 5. A partir dos dados brutos do satélite e de operadores matemáticos é possível encontrar os parâmetros físicos da superfície, como o albedo, a temperatura e o NDVI. Neste sentido, para obtenção do balanço de radiação na superfície foi utilizada a ferramenta de programação Model Maker do ERDAS Imagine v. 9.2. A montagem final do layout foi feito no programa ArcGIS v. 9.3. Na Figura 3 estão representadas as diferentes etapas de processamento do balanço de radiação.

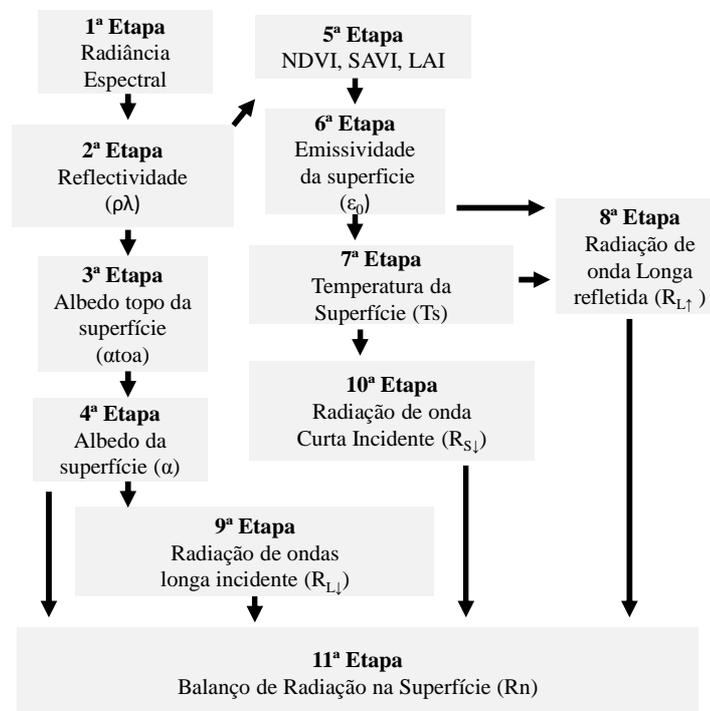


Figura 3: Diagrama das etapas do processamento do balanço de radiação à superfície.

2.2. Métodos

Com base no valor da intensidade de cada pixel foram efetuados os seguintes cálculos: calibração radiométrica, determinação da reflectância planetária (exceto para o canal 6), quantificação do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), e a partir desses resultados, calculou-se o albedo superficial, temperatura radiométrica e saldo de radiação (Rn) [1; 3; 4; 15].

A radiância espectral de cada banda (L_{λ_i}) representa a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, do satélite Landsat, para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7; para a banda 6, essa radiância representa a energia emitida por cada pixel e pode ser obtida pela equação [11].

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

Em que DN é o número digital de cada pixel da imagem, LMAX e LMIN são as constantes de calibração espectral do sensor, cujos valores para o Landsat 5-TM e utilizados neste estudo[6]. A reflectância monocromática de cada banda ($\rho\lambda$), definida como a razão entre o fluxo de radiação solar refletido e o fluxo de radiação solar incidente, foi obtida segundo a seguinte equação [1;15].

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

Em que L_λ é a radiância espectral, computada na 1ª Etapa; $ESUN_\lambda$ é a constante solar monocromática associada a cada banda do TM – Landsat 5 (Tabela 1), θ é o ângulo zenital do Sol; e d_r é o inverso do quadrado da distância Terra-Sol, que é obtida pela equação 3.

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(DA \frac{2\pi}{365}\right) \quad (3)$$

Em que DA é o dia do ano em que foram obtidos os dados radiométricos. Os valores correspondentes ao dia da geração das imagens, bem como o d_r e o $\cos \theta$, para os respectivos dias são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: Datas das imagens, seus respectivos dias Juliano (DJ), inverso da distância relativa terra-sol (d_r) e cosseno do ângulo zenital ($\cos \theta$).

Data da imagem	DJ	d_r	Cos θ
17/10/1999	290	1.009	0,867
07/12/2006	341	1.030	0,876

O cálculo do albedo no topo da atmosfera foi obtido por meio de uma combinação linear das reflectâncias espectrais ($\rho\lambda$), calculados na 2ª Etapa, e o coeficiente de regressão ($\varpi\lambda$), para cada banda de acordo com a equação 4.

$$\alpha_{toa} = (\varpi_1 \times \rho_1) + (\varpi_2 \times \rho_2) + (\varpi_3 \times \rho_3) + (\varpi_4 \times \rho_4) + (\varpi_5 \times \rho_5) + (\varpi_7 \times \rho_7) \quad (4)$$

Os coeficientes de regressão linear da equação anterior ($\varpi_1, \varpi_2, \dots, \varpi_7$), são calculados pela equação 5.

$$\varpi_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\sum ESUN_\lambda} \quad (5)$$

Para o Landsat 5-TM, os valores de $\varpi\lambda$, são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2: Coeficientes de regressão linear de cada banda para o cômputo do albedo do topo da atmosfera.

	ϖ_1	ϖ_2	ϖ_3	ϖ_4	ϖ_5	ϖ_6	ϖ_7
Landsat 5-TM	0,293	0,274	0,233	0,157	0,033	-	0,011

Fonte: [1]

No algoritmo SEBAL, o albedo da superfície é obtido mediante a 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 [1;2;4;5;9;13].

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path_radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad (6)$$

Em que α_{toa} é o albedo planetário, computado na 3ª etapa, $\alpha_{path_radiance}$ é a porção da radiação solar refletida pela atmosfera, que neste trabalho foi considerada igual a 0,03 [5], e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica, definida como a fração da radiação solar incidente, transmitida pela atmosfera e que representa o seu efeito de absorção e reflexão [1]. A transmissividade atmosférica foi computada em função da altitude local (z), conforme a equação:

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} \times Z \quad (7)$$

Para o local estudado $z = 188$ m, o que implicou em transmissividade (τ_{sw}) = 0,754.

O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), que é um indicativo das condições, da densidade e porte da vegetação, foi obtido através da razão entre a diferença das reflectâncias do infravermelho próximo (ρ_4) e do vermelho (ρ_3) e a soma das mesmas reflectâncias conforme equação [1].

$$NDVI = (\rho_4 - \rho_3) / (\rho_4 + \rho_3) \quad (8)$$

O índice de vegetação ajustado às condições do solo (SAVI) é um índice de vegetação que visa amenizar os efeitos de “background” do solo e foi obtido através da equação (Huete, 1988):

$$SAVI = (1 + L)(\rho_4 - \rho_3) / (L + \rho_4 + \rho_3) \quad (9)$$

Em que L é um fator de ajuste ao solo; o qual nesse estudo foi considerado igual a 0,1. O IAF, que representa a razão entre a área total de todas as folhas contidas em dado pixel pela área do pixel, foi obtido pela seguinte equação[1].

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (10)$$

Como cada pixel não emite radiação eletromagnética como um corpo negro, surge a necessidade de introduzir a emissividade de cada pixel (ϵ_{NB}) no domínio espectral da banda termal do TM – Landsat 5 (10,4 a 12,5 μm) e considerar a emissividade de banda larga (ϵ_0) no cálculo da radiação de onda longa emitida por cada pixel. As emissividades ϵ_0 e ϵ_{NB} podem ser obtidas para $NDVI > 0$ e $IAF < 3$ com base nas seguintes equações:

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331 \cdot IAF \quad (11)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot IAF \quad (12)$$

Foram considerados $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$ quando $IAF \geq 3$, e para $NDVI < 0$, no caso de corpos d’água, considerou-se $\epsilon_{NB} = 0,99$ e $\epsilon_0 = 0,985$, de acordo com [1]. Para a obtenção da temperatura da superfície (T_s , K), foi aplicada a equação de Planck invertida, que é obtida em função da radiância espectral da banda termal $L_{\lambda,6}$ e da emissividade ϵ_{NB} .

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (13)$$

Em que K_1 e K_2 são constantes iguais a 607,76 $\text{W m}^2 \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ e 1260,56 K, respectivamente.

A radiação de onda longa emitida por cada pixel ($R_{L\uparrow}$) e a radiação de onda longa incidente, emitida pela atmosfera na direção da superfície ($R_{L\downarrow}$), foram obtidas através das equações:

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \text{ (W/m}^2\text{)} \tag{14}$$

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \text{ (W/m}^2\text{)} \tag{15}$$

Em que ϵ_0 é a emissividade de cada pixel, σ é a constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^{-4}$), T_s é a temperatura da superfície (K), T_a é a temperatura do ar, medida pela estação automática do INPE e ϵ_a é a emissividade atmosférica, obtida por: $\epsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln \tau_{sw})^{0,09}$ [1;2].

A radiação de onda curta incidente – $R_{S\downarrow}$, corresponde à radiação solar que incide em cada pixel por ocasião da passagem do satélite e de modo geral pode ser computado para cada pixel da cena segundo a equação de [1;16;17;18].

$$R_{S\downarrow} = G_{SC} \times \cos \theta \times d_r \times \tau_{sw} \tag{16}$$

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 $\cos \theta$ é o ângulo de incidência solar.

Tabela 3: Valores da radiação de onda curta incidente à superfície nas datas estudadas

Datas estudadas	$R_{S\downarrow}$ (W/m ²)
17/10/1999	902,5
07/12/2006	930,7

O balanço de radiação à superfície foi obtido através da expressão 17 [1;2;11;16].

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \tag{17}$$

em que: $R_{S\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente, α é o albedo corrigido de cada pixel, $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel, $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida por cada pixel e ϵ_0 é a emissividade de cada pixel. As densidades de fluxos $R_{L\uparrow}$, $R_{L\downarrow}$, $R_{S\downarrow}$, e R_n são expressas em W/m^2 .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O saldo de radiação (R_n) para os dias 17/10/1999 e 07/12/2006 para bacia hidrográfica do rio Jacaré, que abrange o município de Poço Redondo e parte de Canindé do São Francisco, no Estado de Sergipe, encontra-se representado nas Figuras 4a e 4b, respectivamente.

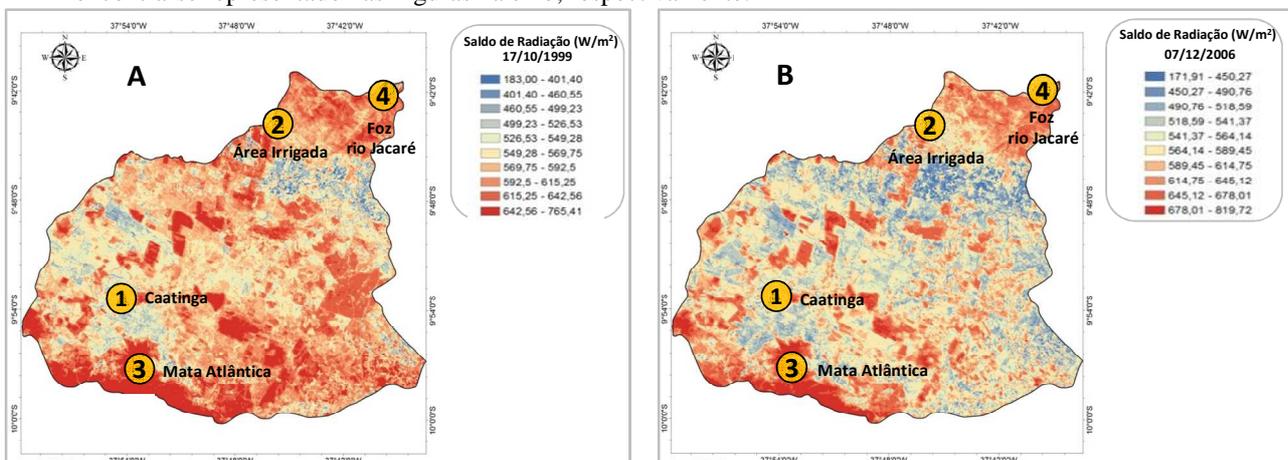


Figura 4: Mapas do saldo radiação a superfície (R_n) W/m^2 na bacia hidrográfica do rio Jacaré para 1999 (A), e 2006 (B).

As áreas com tonalidade em vermelho escuro, em ambas as cartas, representam valores do balanço de radiação superiores a $640,0 \text{ W/m}^2$, e correspondem às áreas com cobertura vegetal usualmente mais densa, áreas com boa disponibilidade hídrica, alguns pequenos reservatórios de água e lagos. As áreas com tonalidade em azul escuro correspondem às áreas sem vegetação, e se concentram em sua maioria na porção superior em ambas as imagens apresentando valores inferiores a $402,0 \text{ W/m}^2$ para a cena de 1999 e menores que $451,0 \text{ W/m}^2$ para a cena de 2006. As tonalidades azul-claro e amarelo-claro representam áreas com baixa cobertura vegetativa e áreas de caatinga densa, respectivamente.

Pela análise da Tabela 4, é possível constatar que a média geral dos valores do balanço de radiação para toda a cena foi menor na imagem de 2006 e maior na imagem de 1999. Foram encontrados valores médios de $615,0 \text{ W/m}^2$ e $583,9 \text{ W/m}^2$, respectivamente para as datas 04/12/2000 e 04/10/2001, áreas de vegetação nativa e parte da área urbana dos municípios de Petrolina, PE e Juazeiro, BA abrangendo parte do Lago de Sobradinho, áreas irrigadas do Projeto Senador Nilo Coelho [15].

Tabela 4: Valores do saldo radiação (R_n), mínimo, máximo e médio para os dias 17/10/1999 e 07/12/2006, para a bacia hidrográfica do rio Jacaré.

Parâmetro		Valor Mínimo	Valor Médio	Valor Máximo
R_n (W/m^2)	17/10/1999	183,0	585,1	765,4
	07/12/2006	171,9	578,7	819,7

Observou-se, nessas duas imagens, um comportamento similar na estimativa do saldo de radiação (R_n) em relação às características dos alvos, nos dois anos estudados. Porém a cena para o dia 17/10/1999 apresentou uma melhor distribuição e uma maior frequência de ocorrência de pixels nas classes com tonalidade vermelha e suas derivações quando comparada com a imagem de 2006. Esses resultados podem ter sido influenciados pelo regime particular de precipitação observado nesses anos.

Na Tabela 5 constam os respectivos valores pontuais para a variável saldo de radiação (R_n) para os dois anos estudados comparando com quatro alvos da cena Landsat 5 - TM.

Tabela 5: Parâmetro saldo radiação instantâneo determinado usando o Algoritmo SEBAL, para quatro diferentes alvos, para os dias 17 de outubro de 1999 e 07 de dezembro de 2006, na bacia hidrográfica do rio Jacaré.

Parâmetro		1	2	3	4
		Caatinga	Cultivo Irrigado	Mata Atlântica	Foz do Rio Jacaré
R_n (W/m^2)	17/10/1999	544,9	622,8	635,0	674,7
	07/12/2006	570,5	639,8	666,7	777,6

De acordo com a Tabela 5, o valor do saldo de radiação para o alvo vegetação rala (caatinga) foi igual a $544,9$ e $570,5 \text{ W/m}^2$ e inferior aos valores encontrados para área de cultivo irrigado (B), $622,8$ e $639,8 \text{ W/m}^2$, para os anos de 1999 e 2006, respectivamente. No caso da área ocupada por Mata Atlântica (C), os valores observados foram de $635,0$ e $666,7 \text{ W/m}^2$, portanto inferiores aos encontrados para o alvo foz do rio Jacaré (D), onde houve a ocorrência dos maiores valores entre os alvos analisados, $674,7$ e $777,5 \text{ W/m}^2$. Os menores registros entre os alvos foram identificados para áreas com vegetação rala (caatinga) e solo desnudo.

Pesquisas realizadas em região próxima ao município de Petrolina-PE indicam balanço de radiação entre $765,0 \text{ W/m}^2$ a $810,0 \text{ W/m}^2$ em áreas sobre o curso do rio São Francisco para uma cena do dia 12/10/2004 [9]. No entanto, para área do projeto de irrigação Jaguaribe-Apodi, localizado no estado do Ceará, foram encontrados valores do balanço de radiação médio de $629,0 \text{ W/m}^2$, $586,0 \text{ W/m}^2$, $551,0 \text{ W/m}^2$, e $561,0 \text{ W/m}^2$ para cenas dos dias 24/10/2005, 28/01/2006, 23/07/2006 e 08/08/2006, respectivamente. Outros estudos indicam valores do balanço de radiação em corpos d'água e áreas recentemente irrigadas entre $690,0$ a $750,0 \text{ W/m}^2$; em pixels com alta biomassa sem déficit de água, tais valores variam de $600,0$ a $650,0 \text{ W/m}^2$ e para solos descobertos, de $500,0$ a $550,0 \text{ W/m}^2$ [7].

Os histogramas de frequência mostram que a variação do saldo de radiação à superfície obtido na bacia hidrográfica do rio Jacaré variou de 183,0 a 765,4 W/m² para o ano de 1999 e de 171,9 a 819,7 W/m² para o ano de 2006. Entretanto, o intervalo mais frequente foi de 569,75 a 592,5 W/m² e representou 18,5 % dos pixels totais da cena para o ano de 1999, já para o ano de 2006, o intervalo mais frequente foi de 564,1 a 589,4 W/m² e representou 21,7% dos pixels totais da cena.

4. CONCLUSÃO

A metodologia proposta para determinação do balanço de radiação na bacia hidrográfica do rio Jacaré se mostrou consistente, uma vez que os resultados obtidos foram compatíveis com informações reportadas na literatura e com produtos gerados a partir de imagens orbitais para locais similares à realidade constatada na área de estudo. Portanto, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto em imagens orbitais de média resolução permitiu identificar e avaliar variações no fluxo do saldo de radiação, em duas datas diferentes o que contribuiu para identificação de mudanças na área de estudo, na escala regional.

-
1. ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) – Advanced Training and Users Manual – Idaho Implementation, version 1.0, 2002a.
 2. BASTIAANSSEN, W.G.M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 237p., 1995.
 3. BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) Formulation. *Journal of Hydrology*, v.212-213, pp.198-212 (1998a).
 4. BASTIAANSSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F. ROENRINK, G. J. VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology*, v. 212–213, p.213-229. 1998b.
 5. BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, v. 229, pp.87-100, 2000.
 6. 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. 2003.
 7. CHAVEZ, J.L.; GOWDA, P.H.; MAREK, T.H.; NEW, L.L. Evapotranspiration mapping using METRIC™ for region with highly advective conditions. In: *ASABE Annual International Meeting, 2007, Minneapolis*. Anais... Minneapolis: ASABE, 2007.
 8. EPIPHANIO, J.C.N.; LEONARDI, L.; FORMAGGIO, A.R. Relações entre parâmetros culturais resposta espectral de cafezais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.29, n.3, p.379-386, 1994.
 9. FOLHES, M. T., SOARES, J. V., RENNO, C. D., CORREIA, A. H. Estimativa de fluxos de energia por meio do modelo METRIC em região semi-árida. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis*. Anais... Florianópolis: INPE, 2007. P. 3349-3356
 10. MARKHAM, B. L.; BARKER, L. L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, v.8, n.3, p.517-523, 1987.
 11. 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. Boise: Department of Water Resources/University of Idaho, 2000, 98p.
 12. PINTO, J.E.S. (1998). Os reflexos da seca no estado de Sergipe. NPGeo/UFS, São Cristóvão.
 13. SANTANA, J. L. S. de; AGUIAR NETTO, A. O. ; MELLO JUNIOR, A. V.. Impacto da precipitação e de vazão máximas em obras de infra-estrutura em uma sub-bacia do semi-árido de Sergipe. In: *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo*. Anais. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007. p. 1-15.
 14. SANTOS, L. G. C. Diagnóstico dos Remanescentes de Mata Ciliar no Baixo São Francisco Sergipano afetado pela erosão marginal e a compreensão dos ribeirinhos sobre a degradação vegetal. Dissertação de mestrado – São Cristóvão/SE, 2001.

15. SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.2, p.243-252, 2005.
16. SILVA, B. B. da; 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. 174-186, 2006.
17. TASUMI, M. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. Idaho: University of Idaho, 2003. 378p. PhD thesis.
18. TREZZA, R. Evapotranspiration using a satellite-based Surface energy balance with Standardized ground control. 247f. Thesis (Doctor of Philosophy in Biological and Agricultural Engineering). Utah State University. Logan, Utah, 2002.