

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/3: 641-654  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **ESTIMATIVAS DO SALDO DE RADIAÇÃO INSTANTÂNEO NO ENTORNO DO RESERVATÓRIO DE ITAPARICA – PE COM USO DE IMAGENS ORBITAIS**

*Estimations of Instantaneous Net Radiation on the Surroundings of  
Itaparica's Reservoir – PE with Orbital Images*

**Rafaella Chrystiane de Moura Matos<sup>1</sup>, Ana Lúcia Bezerra Candeias<sup>2</sup>  
& José Roberto Gonçalves de Azevedo<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**

**Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Civil**

Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, 6º andar - Cidade Universitária, CEP: 50741-530, Recife/PE, Brasil  
rafaella.matos@gmail.com; jrga@ufpe.br

**<sup>2</sup>Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**

**Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Cartográfica**

Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n - 2º andar – DECart - Cidade Universitária, CEP: 50740-530, Recife/PE, Brasil  
analucia@ufpe.br

*Recebido em 14 de Outubro, 2015/ Aceito em 8 de Abril, 2016*

*Received on October 14, 2015/ Accepted on April 8, 2016*

### **RESUMO**

Neste trabalho buscou-se determinar o saldo de radiação ( $R_n$ ) instantâneo na região semiárida que abrange o entorno do reservatório de Itaparica – PE, Brasil, utilizando os princípios do algoritmo SEBAL e 13 imagens do satélite Landsat 5 - TM. O recorte selecionado para o estudo cobre além do próprio reservatório, o perímetro irrigado de Apolônio Sales, a área urbana do município de Petrolândia, bem como áreas de solo exposto e de vegetação nativa. Determinou-se neste trabalho albedo da superfície e índices de vegetação para cada pixel. A radiação de onda longa emitida foi obtida em função da emissividade e da temperatura de superfície de cada pixel, a radiação de onda longa incidente da atmosfera foi calculada em função da emissividade atmosférica e da temperatura do ar medida em estação meteorológica, e a radiação de onda curta incidente foi calculada em condição de céu claro. Com base nestes dados, foi calculado então  $R_n$  para cada uma das 13 imagens, cujo valor médio variou entre 423,98 e 608,79 W/m<sup>2</sup> para os dias 31/07/2003 e 05/04/2007 respectivamente. Esta variação se mostrou fortemente influenciada pela vegetação, sendo os maiores valores apresentados em áreas de maior cobertura vegetal e os menores valores nas áreas de solo exposto.

**Palavras chaves:** Balanço de radiação, SEBAL, Reservatório de Itaparica.

### **ABSTRACT**

In this paper we sought to determine the components of the instant net radiation ( $R_n$ ) in the semiarid region that covers the surrounding Itaparica's reservoir - PE, Brazil, using the SEBAL algorithm and 13 Landsat 5 - TM satellite imagery. The cut selection from the images for the study were made in a way covering the reservoir itself and also the irrigated perimeter of Apolônio Sales, the urban area of the municipality of Petrolândia, as well as areas of bare soil and native vegetation. It was determined in this study surface albedo and vegetation indexes for each pixel. The long wave radi-

ation emitted was obtained as a function of emissivity and surface temperature for each pixel, the incident long-wave radiation from the atmosphere was calculated according to the air emissivity and the measured air temperature in the weather station, and the incident short wave radiation was estimated at clear sky condition. Based on these data, it was then calculated Rn for each one of the 13 images whose average ranged between 423.98 and 608.79 W/m<sup>2</sup> for the days 07/31/2003 and 04/05//2007 respectively. This variation proved strongly influenced by vegetation, with the highest values reported in areas of greater vegetation cover and the lowest values in the areas of exposed soil.

**Keywords:** Net Radiation, SEBAL, Itaparica's Reservoir.

## 1. INTRODUÇÃO

Alterações climáticas naturais e modificações no meio ambiente por meio de ações antropogênicas, afetam profundamente o ciclo hidrológico. Como exemplo para o segundo caso pode-se citar o desmatamento, o qual contribui também para o aumento das emissões dos gases do efeito estufa, alteram os ciclos geomorfológico e bioquímico dos rios e afetam culturas anuais e pastagens perenes, que apresentam redução na densidade e na profundidade de suas raízes, no índice de área foliar, na duração da temporada de crescimento, resultando em menor evapotranspiração em comparação a vegetação natural mais diversa que foi substituída (COE *et al.*, 2011). Estas ações humanas sobre a vegetação estão fortemente associadas ao aumento da temperatura e variação da precipitação principalmente em regiões áridas e semiáridas, como o Nordeste do Brasil (NICÁCIO, 2008).

De acordo com Marengo (2006), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) previu um aumento de 1,0 a 4,0 °C na região nordeste do Brasil até 2100. No caso desta previsão se concretizar, não será mais possível reverter esse processo, portanto estratégias relacionadas ao bom uso do solo precisam ser e vem sendo desenvolvidas e adaptadas para que se possa enfrentar os desafios relacionados a estas transformações, de forma a garantir estabilidade econômica, social e ambiental nesta região. Planejamento e gestão adequada dos recursos hídricos são partes essenciais dessas estratégias, pois a falta de um bom plano pode causar deficiência da produtividade agrícola resultante das alterações nos componentes do ciclo hidrológico, tais como precipitação, evapotranspiração (ET), entre outros.

Quantificar o saldo de radiação, o qual consiste na quantidade de energia disponível para ser utilizada em processos de aquecimento

do ar e do solo, na fotossíntese e no fluxo de calor latente, é de grande importância para a estimativa da ET e consequente avaliação dos déficits hídricos, o que constitui um grave problema às atividades agropecuárias em regiões semiáridas. Embora o Brasil seja coberto por duas grandes redes meteorológicas, como as do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a do Centro de Previsão e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), muitas regiões ainda não são cobertas pelas mesmas, levando a ausência de informações relevantes sobre esta variável.

O *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), desenvolvido por Bastiaanssen (1995), é um modelo baseado em imagens de satélites que tem sido amplamente utilizado para obtenção de resultados importantes como valores de saldo de radiação (Rn), fluxo de calor no solo (G) e ET auxiliando assim no gerenciamento e monitoramento de recursos naturais. Este algoritmo vem sendo aplicado com sucesso em diversas regiões no mundo. No Brasil Leivas *et al.* (2007a) estimaram o balanço de energia à superfície na região ecoclimática da Depressão Central em Eldorado do Sul – RS, utilizando produtos do sensor ASTER. Andrade (2008) utilizou este algoritmo para obter fluxos de energia à superfície e na determinação da ET em Conquista, município do triângulo mineiro. Para compensar a deficiência de informações espaciais relacionadas ao Rn, Santos *et al.* (2011) realizou o mesmo procedimento para analisar a performance do SEBAL em condições tropicais úmidas no estado de Rondônia. Esta técnica foi utilizada pela primeira vez na região da bacia do rio São Francisco por Bastiaanssen *et al.* (2001) permitindo a extrapolação de fluxos de água locais e produtividade hídrica na bacia, seguidos por diversas outras pesquisas, tais como as de Nicácio (2008), Silva (2009) e Dantas (2013).

Este trabalho tem como objetivo a determinação do saldo de radiação instantâneo



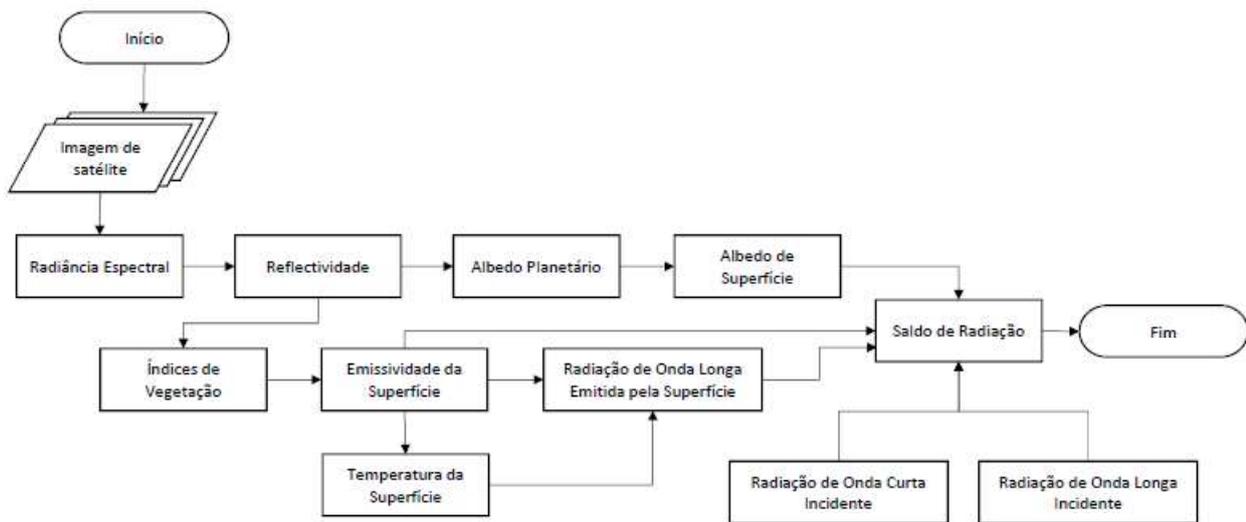


Fig. 2 - Fluxograma das etapas para estimativa do Rn. Adaptado de Allen *et al.* (2002).

### 3.1.1 Aquisição das imagens e pré-processamento

Foram utilizadas nesta pesquisa 13 imagens do sensor TM (*Thematic Mapper*) a bordo do satélite Landsat 5 na órbita/ponto 216/66 para os dias 31 de julho de 2003, 06 e 22 de dezembro de 2003, 08 e 24 de dezembro de 2004, 24 de outubro de 2005, 12 de novembro de 2006, 06 de abril de 2007, 14 de setembro de 2008, 01 de novembro de 2008, 04 e 20 de novembro de 2009 e 06 de outubro de 2010. Estas imagens foram escolhidas por se apresentarem com menor cobertura de nuvens.

As imagens foram registradas a partir do uso da correção geométrica polinomial de 1ª ordem a partir de imagem Geocover 2000 utilizada como referência, sendo em seguida recortadas de acordo com os limites da área de estudo utilizada nesta pesquisa. A partir destes procedimentos de pré-processamento, aplicou-se então a metodologia para estimativa do Rn com auxílio do software de processamento de imagens ERDAS imagine 9.1. Ao final foram elaborados mapas de Rn com o software ArcGIS 10.1.

### 3.1.2 Radiância espectral

A partir das imagens obtidas, foi realizada a calibração radiométrica, procedimento que consiste em transformar o número digital (ND) de cada pixel de uma imagem em radiância espectral ( $L_{\lambda i}$ ), elemento este que caracteriza a

energia solar refletida por cada pixel por uma unidade de área, ângulo sólido e comprimento de onda.

Esta etapa foi realizada para cada uma das sete bandas do sensor TM do satélite Landsat 5, de acordo com a equação 1, proposta por Markham & Bakker (1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \left( \frac{b_i + a_i}{255} \right) \times ND \quad (1)$$

onde:

$a_i$  é o coeficiente de calibração correspondente a radiância mínima para cada banda, em  $W.m^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ;

$b_i$  é o coeficiente de calibração correspondente a radiância máxima para cada banda, em;

ND é o número digital de cada pixel da imagem.

Os valores de  $a$  e  $b$  do sensor TM do Landsat 5, com intervalos de comprimento de onda em e a irradiância espectral no topo da atmosfera em  $W.m^{-2}\mu m^{-1}$  são representados nas Tabela 1 e 2.

Os valores de coeficiente de calibração apresentados foram sugeridos por Chander et.al. (2009).

### 3.1.3 Reflectividade

O cálculo da reflectância monocromática ( $\rho_{\lambda i}$ ) foi realizado para cada banda do sensor, o valor é resultante da razão entre o fluxo de radiação solar refletida e o fluxo de radiação solar

Tabela 1: Bandas do sensor TM/Landsat 5 de 01 de março de 1984 até 04 de maio de 2003

| Bandas         | Comprimento de onda<br>( $\mu\text{m}$ ) | Coeficiente de Calibração<br>( $W.m^{-2}sr^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ) |        | Irradiância<br>Espectral no<br>Topo da<br>Atmosfera<br>( $W.m^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ ) |
|----------------|--|--|--------|---|
|                |  | A  | b      |   |
| 1 (Azul)       | 0,45 – 0,52                              | -1,52  | 152,10 | 1957  |
| 2 (Verde)      | 0,52 – 0,60                              | -2,84  | 296,81 | 1826  |
| 3 (Vermelho)   | 0,63 – 0,69                              | -1,17  | 204,30 | 1554  |
| 4 (IV-próximo) | 0,76 – 0,79                              | -1,51  | 206,20 | 1036  |
| 5 (IV-médio)   | 1,55 – 1,75                              | -0,37  | 27,19  | 215,0   |
| 6 (IV-termal)  | 10,4 – 12,5                              | 1,2378   | 15,303 | -   |
| 7 (IV0médio)   | 2,08 – 2,35                              | -0,15  | 14,38  | 80,67   |

Tabela 2: Bandas do sensor TM/ Landsat 5 a partir de 05 de maio de 2003

| Bandas         | Comprimento de onda<br>( $\mu\text{m}$ ) | Coeficiente de Calibração<br>( $W.m^{-2}sr^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ) |        | Irradiância<br>Espectral no<br>Topo da<br>Atmosfera<br>( $W.m^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ ) |
|----------------|--|--|--------|---|
|                |  | A  | B      |   |
| 1 (Azul)       | 0,45 – 0,52                              | -1,52  | 193,0  | 1957  |
| 2 (Verde)      | 0,52 – 0,60                              | -2,84  | 365,0  | 1826  |
| 3 (Vermelho)   | 0,63 – 0,69                              | -1,17  | 264,0  | 1554  |
| 4 (IV-próximo) | 0,76 – 0,79                              | -1,51  | 221,0  | 1036  |
| 5 (IV-médio)   | 1,55 – 1,75                              | -0,37  | 30,2   | 215,0   |
| 6 (IV-termal)  | 10,4 – 12,5                              | 1,2378   | 15,303 | -   |
| 7 (IV0médio)   | 2,08 – 2,35                              | -0,15  | 16,5   | 80,67   |

incidente, com base na equação 2, proposta por Bastiaanssen (1995):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \times L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} \times \cos Z \times dr} \quad (2)$$

onde:

$L_{\lambda i}$  é a radiância espectral para cada banda em  $W.m^{-2}sr^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ;

$K_{\lambda i}$  é a irradiância solar espectral no topo da atmosfera para cada banda em , descritas nas tabelas 1 e 2;

Z é o ângulo zenital solar, obtido no próprio catálogo de imagens do INPE;

dr é o quadrado da razão entre a distância Terra-Sol ( $r_o$ ) em um determinado dia do ano (DAS ou Dia Sequencial do Ano).

O cálculo de dr é apresentado na equação 3, encontrada em Iqbal (1983):

$$dr = 1 + 0,0033 \cos \left( DSA \times \frac{2\pi}{365} \right) \quad (3)$$

onde:

DSA é o Dia Sequencial do Ano.

### 3.1.4 Albedo de Superfície

O albedo de superfície ( $\alpha_{sup}$ ) é o albedo corrigido para os efeitos atmosféricos, obtidos pela equação 4, como apresentada por Bastiaanssen (1995):

$$\alpha_{sup} = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw^2}} \quad (4)$$

onde:

$\alpha_{toa}$  é o albedo planetário;

$\alpha_p$  é a reflectância atmosférica que varia entre 0,025 e 0,04, mas de acordo com Bastiaanssen (2000) para o SEBAL foi recomendado o valor 0,03;

$\tau_{sw^2}$  é a transmissividade atmosférica.

O albedo planetário ( $\alpha_{toa}$ ) é o albedo que não foi ajustado à transmissividade atmosférica e este foi substituído a partir da combinação linear

das reflectâncias monocromáticas de acordo com a equação 5:

$$\alpha_{toa} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,157\rho_4 + 0,033\rho_5 + 0,011\rho_7 \quad (5)$$

onde  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$ ,  $\rho_4$ ,  $\rho_5$  e  $\rho_7$  são as reflectâncias monocromáticas das bandas 1, 2, 3, 4, 5, e 7.

A transmissividade atmosférica ( $\tau_{sw}$ ) para condições de céu claro, foi obtida de acordo com a equação 6, apresentada por Allen *et al.* (2007):

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \exp \left[ -\frac{0,0014P}{k_t \cos \theta_{hor}} - 0,075 \left( \frac{W}{\cos \theta_{hor}} \right)^{0,4} \right] \quad (6)$$

onde:

$\theta_{hor}$  é o ângulo zenital solar obtido;

P é a pressão atmosférica média (kPa);

$K_t$  é o coeficiente de turbidez da atmosfera, que de acordo com Allen (1996) é igual a 1 para céu claro e 0,5 para turbidez extrema;

W é a água precipitável em mm, calculada de acordo com a equação 7 apresentada por Garrison & Adler (1990):

$$W = 0,14e_a P_{air} + 2,1 \quad (7)$$

A pressão atmosférica é obtida de acordo com a equação 8 (ASCR-EWRI, 2005):

$$P = 101,3 \times \left( \frac{T_a - 0,0065z}{T_a} \right)^{5,26} \quad (8)$$

onde  $T_a$  é a temperatura do ar em Kelvin e z é a altitude.

### 3.1.5 Índices de Vegetação

Para posterior cálculo do saldo de radiação instantâneo e análise da distribuição desta variável em diferentes coberturas do solo, é necessário calcular os índices de vegetação na área de estudo.

O NDVI ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*) é um dos índices de vegetação mais utilizados em trabalhos científicos por facilitar a interpretação das imagens devido a sua variação finita (-1 a +1). Vários estudos mostram correlações significativas deste índice com as variáveis biofísicas da vegetação. Este índice foi

obtido conforme a equação 9 (TUCKER, 1979):

$$NDVI = \frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v} \quad (9)$$

onde  $\rho_{iv}$  corresponde a faixa do infravermelho próximo e  $\rho_v$  corresponde a faixa do vermelho do sensor TM.

SAVI ou Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Sol O (*Soil Adjusted Vegetation Index*) é um índice utilizado para suavizar os efeitos de “background” do solo, este é calculado em função do tipo de solo de acordo com a equação 10 (HUETE, 1988; HUETE & WARRICK, 1990):

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{iv} - \rho_v)}{(L + \rho_{iv} + \rho_v)} \quad (10)$$

onde L consiste em um fator de ajuste em função do tipo do solo, embora o valor mais frequente utilizado seja L=0,5, para aplicações na região ocidental dos Estados Unidos tem-se utilizado o valor de 0,1 (TASUMI, 2003).

O IAF ou Índice de Área Foliar (*Leaf Area Index*) é um indicador da biomassa em cada pixel da imagem que é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizado por essa vegetação, este índice foi computado a partir da equação 11 apresentada por Allen *et al.* (2002):

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{iv} - \rho_v)}{(L + \rho_{iv} + \rho_v)} \quad (11)$$

### 3.1.6 Temperatura da Superfície (Ts)

Segundo Bastiaanssen & Bakker (2000) a temperatura pode ser determinada a partir de medidas de radiancia não corrigidas da banda termal  $L_{\lambda,6}$  do sensor TM/Landsat 5 de acordo com a equação 12:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left( \frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1 \right)} \quad (12)$$

onde  $k_1$  e  $k_2$  são constantes de calibração da banda termal do Landsat 5 – TM de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3: Constantes de calibração da banda do termal TM

| Constantes | $K_1$<br>( $Wm^{-2}.sr\mu m^{-1}$ ) | $K_2$ (Kelvin) |
|------------|-------------------------------------|----------------|
| Landsat 5  | 607,76                              | 1260,56        |

$\epsilon_{NB}$  é a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal, que pode ser obtido de acordo com a equação 13 (ALLEN *et al.*, 2002):

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033.IAF \quad (13)$$

### 3.1.7 Radiação de Onda Longa Emitida e Incidente

A estimativa do fluxo de radiação de onda longa possui várias aplicações em áreas como hidrologia, meteorologia, agronomia e estudos de desertificação. França *et al.* (2000) estimaram o fluxo de onda longa a superfície para identificação de ilhas de calor na região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro.

A radiação de onda longa emitida ( $R_{ol,emi}$ ) dada em  $W.m^{-2}$  foi calculada em função da emissividade ( $\epsilon_0$ ) e da temperatura da superfície em Kelvin ( $T_{sup}$ ), utilizando a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}K^{-4}$ ), como mostra a equação 14:

$$R_{ol,emi} = \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_{sup} \quad (14)$$

Para o cálculo da emissividade no domínio da banda larga ( $\epsilon_0$ ), que consiste na razão entre a energia irradiada por uma superfície a uma determinada temperatura e a energia irradiada por um corpo negro, utilizou-se a equação 15, proposta por Allen *et al.* (2002):

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01.IAF \quad (15)$$

Deve-se considerar, no entanto que tanto para o cálculo de  $\epsilon_{NB}$  (equação 13) quanto para o cálculo de (equação 7), foi aplicado um filtro para fixação dos valores das emissividades recomendado por Allen *et al.* (2002) onde pixels em que o IAF sejam maior ou igual a 3,  $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$  e para corpos d'água, ou seja, áreas com NDVI menor que 0,  $\epsilon_{NB} = 0,99$  e  $\epsilon_0 = 0,985$ .

O cálculo da radiação de onda longa incidente ( $R_{ol,emi}$ ) dada em  $W.m^{-2}$ , que consiste

na densidade do fluxo de radiação de onda longa que a atmosfera emite em direção a superfície, se dá de forma muito similar ao cálculo de  $R_{ol,emi}$ , a diferença se dá em relação ao uso da emissividade atmosférica ( $\epsilon_a$ ) e da temperatura utilizada, que neste caso consiste na temperatura do ar em Kelvin ( $T_a$ ) obtida a partir do banco de dados do CPTEC/INPE com informações coletadas em estações meteorológicas, conforme apresentado na equação 16:

$$R_{ol,atm} = \epsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (16)$$

Para o cálculo de  $\epsilon_a$  foi utilizada a equação 17, proposta por Allen *et al.*, (2002):

$$\epsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln \tau_{sw}) \quad (17)$$

### 3.1.8 Radiação de Onda Curta Incidente

A radiação de onda curta incidente ( $R_n = R_{sol,inc}$ ) à superfície, que consiste no fluxo de radiação solar direta e difusa que atinge a superfície terrestre, tem o Sol como principal fonte, pode ser medida através de piranômetros.

### 3.1.9 Saldo de Radiação

Com os elementos citados anteriormente calculados, foi realizado o procedimento para o cálculo do saldo de radiação ( $R_n$ ), que consiste na quantidade de energia radiante disponibilizada à superfície. Para esta estimativa, foi utilizada a equação 18 a seguir:

$$R_n = R_{sol,inc} (1 - \alpha_{sup}) - R_{ol,emi} + R_{ol,atm} - (1 - \epsilon_0) R_{ol,atm} \quad (18)$$

onde  $\alpha_{sup}$  é o albedo de superfície corrigido para os efeitos atmosféricos obtido de acordo com equação 4 apresentada.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção foram avaliados os resultados instantâneos obtidos por meio do algoritmo SEBAL através da verificação dos mapas gerados.

Também foi realizada uma análise para cada um dos quatro pontos selecionados (Figura 3). Nos tópicos a seguir são então discutidos os resultados obtidos através do uso do sensor TM-Landsat 5 na área de estudo.

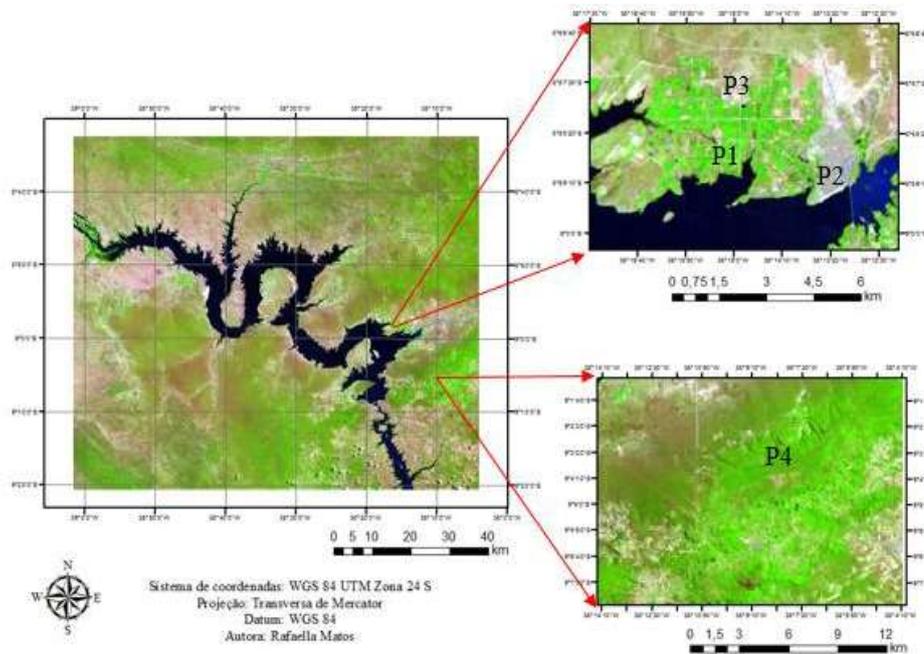


Fig. 3 - Pontos (P1, P2, P3 e P4) distribuídos na cena.

#### 4.1 Albedo de Superfície

A Tabela 4 apresenta os valores mínimo, máximo, médio e moda do albedo de superfície na do reservatório de Itaparica e seu entorno obtidos digitalmente através dos mapas do albedo de superfície para as 13 imagens utilizadas. Observa-se pela referida tabela variações do albedo em relação as datas apresentadas com um valor mínimo de 0,001 e máximo de 1,359.

Áreas com presença de água (leito do rio São Francisco) e sombras das nuvens apresentaram albedo inferiores a 10%, compreendendo a classe de valores mais baixos de albedo de superfície.

Em Bastiaanssen (2000) o albedo na água apresentou valores entre 3 e 10%, em Silva, Silva e Gomes (2010) foram encontrados valores similares, inferiores a 9% para os corpos d'água, em Silva *et al.* (2013) os corpos d'água também se apresentaram inferiores a 10% em uma área também de semiárido. Em Bezerra *et al.* (2014) valores próximos a zero (<0,05) foram encontrados nas áreas de sombras das nuvens.

Nos pontos seleccionados (P1, P2, P3 e P4) verificou-se que o albedo nas áreas vegetadas (P1 e P4) são menores do que nas áreas antropizadas (P2) e áreas de solo exposto (P3).

Tabela 4: Valores mínimo, máximo, média e moda do albedo de superfície na área de estudo

|            | Mínimo | Máximo | Média  | Moda   |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| 31/07/2003 | 0,013  | 1,359  | 0,206  | 0,176  |
| 06/12/2003 | 0,039  | 1,136  | 0,252  | 0,215  |
| 22/12/2003 | 0,021  | 0,828  | 0,250  | 0,213  |
| 08/12/2004 | 0,001  | 1,129  | 0,231  | 0,199  |
| 24/12/2004 | 0,027  | 0,761  | 0,233  | 0,229  |
| 22/09/2005 | 0,064  | 1,087  | 0,225  | 0,216  |
| 12/11/2006 | 0,018  | 1,064  | 0,250  | 0,222  |
| 05/04/2007 | 0016   | 1,016  | 0,200  | 0,169  |
| 14/09/2008 | 0,029  | 1,156  | 0,214  | 0,183  |
| 01/11/2008 | 0,026  | 0,803  | 0,230  | 0,205  |
| 13/06/2009 | 0,212  | 1,222  | 0,208  | 0,177  |
| 04/11/2009 | 0,019  | 1,208  | 0,216  | 0,192  |
|            | 0,020  | 0,725  | 00,205 | 00,191 |

O albedo nas áreas irrigadas (P1) se apresentou entre 10 a 20%, chegando a 30% nos dias 08/12/2004, 01/11/2008 e 04/11/2009. Em Silva *et al.* (2013), para uma área irrigada foram encontrados valores entre 16 e 40%, em Silva *et al.* (2002) o perímetro irrigado apresentou albedo igual a 15%, em Khaldi *et al.* (2011) este resultado variou entre 15 e 19%.

Na área urbana do município de Petrolândia (P2) o albedo apresentou valores entre 20 e 40%. A Tabela 5 adaptada de Taha (1997) mostra os valores de albedo em algumas cidades ao redor do mundo.

Tabela 5: Albedo em áreas urbanas

| Área urbana          | Albedo      |
|----------------------|-------------|
| Los Angeles (EUA)    | 0,20        |
| Madison (EUA)        | 0,15 – 0,18 |
| Adelaide (Austrália) | 0,27        |

Fonte: Adaptado de Taha (1997).

Na área de solo exposto (P3) o albedo apresentou valores entre 20 a 40%. Em Gomes *et al.* (2009) estes valores se apresentaram em torno de 24 e 27%, já Bezerra *et al.* (2014) o albedo em área de solo exposto apresentou valores entre 30 e 35%.

Valores em torno de 10 e 20% foram encontrados na área de vegetação nativa selecionada no topo das chapadas (P4). Em Leivas *et al.* (2007b) o albedo em área vegetada foi igual a 23%, em Dantas *et al.* (2010) o albedo na vegetação nativa variou entre 20 e 22%.

As nuvens apresentaram albedo com valores acima de 50%, em Bezerra *et al.* (2014) estes valores se apresentaram entre 40 e 45%.

O albedo de superfície apresentou os menores valores para corpos d'água e áreas vegetadas, seguidos pelas áreas urbanas e solo exposto, apresentando consistência com a literatura disponível sobre o assunto.

#### 4.2 Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada

A Tabela 6 apresenta os valores mínimo, máximo, médio e moda do NDVI na área do reservatório de Itaparica e seu entorno obtidos digitalmente através dos mapas de NDVI para as 13 imagens utilizadas.

Tabela 6: Valores mínimo, máximo, média e moda do NDVI na área de estudo

|            | Mínimo | Máximo | Média | Moda |
|------------|--------|--------|-------|------|
| 31/07/2003 | -1,76  | 0,84   | 0,18  | 0,20 |
| 06/12/2003 | -1,65  | 0,77   | 0,14  | 0,14 |
| 22/12/2003 | -1,76  | 0,83   | 0,14  | 0,15 |
| 08/12/2004 | -1,76  | 0,89   | 0,20  | 0,16 |
| 24/12/2004 | -1,65  | 0,83   | 0,19  | 0,16 |
| 22/09/2005 | -0,61  | 0,74   | 0,17  | 0,15 |
| 12/11/2006 | -1,77  | 0,87   | 0,15  | 0,14 |
| 05/04/2007 | -1,76  | 0,87   | 0,34  | 0,39 |
| 14/09/2008 | -1,92  | 0,80   | 0,20  | 0,17 |
| 01/11/2008 | -1,50  | 0,85   | 0,17  | 0,18 |
| 13/06/2009 | -1,76  | 0,87   | 0,41  | 0,56 |
| 04/11/2009 | -1,76  | 0,81   | 0,26  | 0,21 |
| 06/10/2010 | -1,76  | 0,84   | 0,18  | 0,16 |

Os valores acima de 0,40 compreenderam principalmente a vegetação mais densa, além das áreas irrigadas (P1) também apresentaram estes valores a vegetação nativa no topo das chapadas (P4). Isto ocorre principalmente em decorrência da resposta espectral da cultura ser mais elevada na banda 2 do sensor TM correspondente a faixa espectral do visível e na banda 4 referente a faixa do infravermelho próximo (LIRA *et al.*, 2009).

Observou-se uma alta predominância desses valores na imagem referente ao dia 05/04/2007, integrante da estação chuvosa e período em que há o aumento da área foliar da vegetação, para esta data a moda foi igual a 3,9.

Também foi verificado que na imagem referente ao dia 13/06/2009 ocorreu um aumento expressivo da vegetação, cuja moda apresenta-se igual a 0,56. Este mês não faz parte da estação chuvosa, no entanto este fato pode ser explicado pela precipitação de 1,4 mm que aconteceu alguns dias antes da passagem do sensor, informação essa obtida a partir da análise da distribuição da precipitação no período estudado.

Em Rodrigues *et al.* (2009) valores acima de 0,4 foram encontrados nas áreas cobertas por matas ciliares preservadas e em espécies nativas com alta densidade foliar, em Ferreira (2012) o perímetro irrigado também apresentou valores superiores a 0,40, em Sá *et al.* (2010) foram encontrados valores de até 0,8070 em áreas de florestas densas no topo da Chapada do Araripe.

Na área urbana do município de Petrolândia (P2) os valores de NDVI encontraram-se entre 0,10 e 0,30. Em Rodrigues *et al.* (2009) valores abaixo de 0,30 representam áreas de baixa cobertura vegetal, SÁ *et al.* (2010) identificou valores entre 0,1185 e 0,2670 em áreas urbanas.

A área de solo exposto (P3) apresentou NDVI inferior a 0,1, compatível com áreas de vegetação rala ou solo exposto. Em Borges, Oliveira e Silva (2010) estes valores foram inferiores a 0,2. Os valores de NDVI para a água apresentam-se menores que 0,10 e as nuvens acima de 0,3.

O NDVI apresentou informações inversamente proporcionais às do albedo, sendo maior em áreas vegetadas e reduzindo de acordo com a redução da vegetação. Pode-se observar que a precipitação pode influenciar fortemente a dinâmica da vegetação no local, de modo que mesmo se tratando da estação seca, ao chover uma determinada quantidade acarreta em considerável aumento da área foliar da vegetação.

#### 4.3 Saldo de Radiação

A Tabela 7 apresenta os valores mínimo, máximo, médio e moda do saldo de radiação na área do reservatório de Itaparica e seu entorno obtidos digitalmente através dos mapas de Rn para as 13 imagens utilizadas.

O saldo de radiação é influenciado diretamente pela estação do ano, que influencia

também na radiação solar global e na condição da vegetação.

A combinação de importantes elementos da superfície é determinante para os resultados de saldo de radiação, dentre estes elementos pode-se citar albedo e NDVI.

Os maiores saldos de radiação se apresentaram no leito do rio, com valores superiores a 650 W, com exceção da imagem 4(a) preferente ao dia 31/07/2003. A água possui elevada capacidade de armazenamento de energia devido ao seu alto calor específico.

Elevados saldos de radiação se apresentaram nos pontos P1 e P4, áreas com maior altitude e vegetação mais intensa tendem a apresentar elevados valores de Rn, apresentando-se principalmente na faixa entre 400 e 650 W no ponto P1 e acima de 650 W no ponto P4.

Os menores registros de Rn foram identificados no ponto P3 (solo exposto), se apresentando principalmente entre 300 e 400 W, estes valores são similares aos encontrados por Borges, Oliveira e Silva (2010). Isto pode ser explicado pelo fato de locais com pouca ou nenhuma vegetação apresentarem albedo elevado, o que torna maior a emissão da radiação terrestre e por consequência menor o saldo de radiação.

No entanto deve-se considerar que baixos valores de Rn (inferiores a 300 W) também são encontrados nas sombras das nuvens presentes nas imagens devido o albedo nessas áreas serem subestimados.

Tabela 7: Valores mínimo, máximo, média e moda do rn na área de estudo

|            | Mínimo  | Máximo | Média  | Moda   |
|------------|---------|--------|--------|--------|
| 31/07/2003 | -257,33 | 614,68 | 423,98 | 430,74 |
| 06/12/2003 | -89,24  | 769,23 | 523,32 | 547,90 |
| 22/12/2003 | 34,37   | 736,98 | 498,15 | 520,16 |
| 08/12/2004 | -141,56 | 780,17 | 533,62 | 535,33 |
| 24/12/2004 | 81,62   | 752,85 | 515,41 | 529,11 |
| 22/09/2005 | -73,64  | 766,65 | 579,36 | 592,84 |
| 12/11/2006 | -67,19  | 844,39 | 586,92 | 609,37 |
| 05/04/2007 | -34,23  | 809,74 | 608,79 | 628,42 |
| 14/09/2008 | -126,91 | 751,28 | 548,81 | 555,75 |
| 01/11/2008 | 58,47   | 816,0  | 566,42 | 580,40 |
| 13/06/2009 | -145,68 | 636,02 | 478,38 | 495,56 |
| 04/11/2009 | -26,82  | 802,98 | 572,44 | 595,53 |
| 06/10/2010 | 167,63  | 803,5  | 575,75 | 572,50 |

O saldo de radiação é fortemente influenciado pela vegetação, sendo diretamente proporcional ao NDVI, desta forma verifica-se a presença de valores mais elevados nas áreas

de maior cobertura vegetal e menor nas áreas de solo exposto.

A figura 4 apresenta um dos mapas gerados de Rn em uma das treze imagens selecionadas.

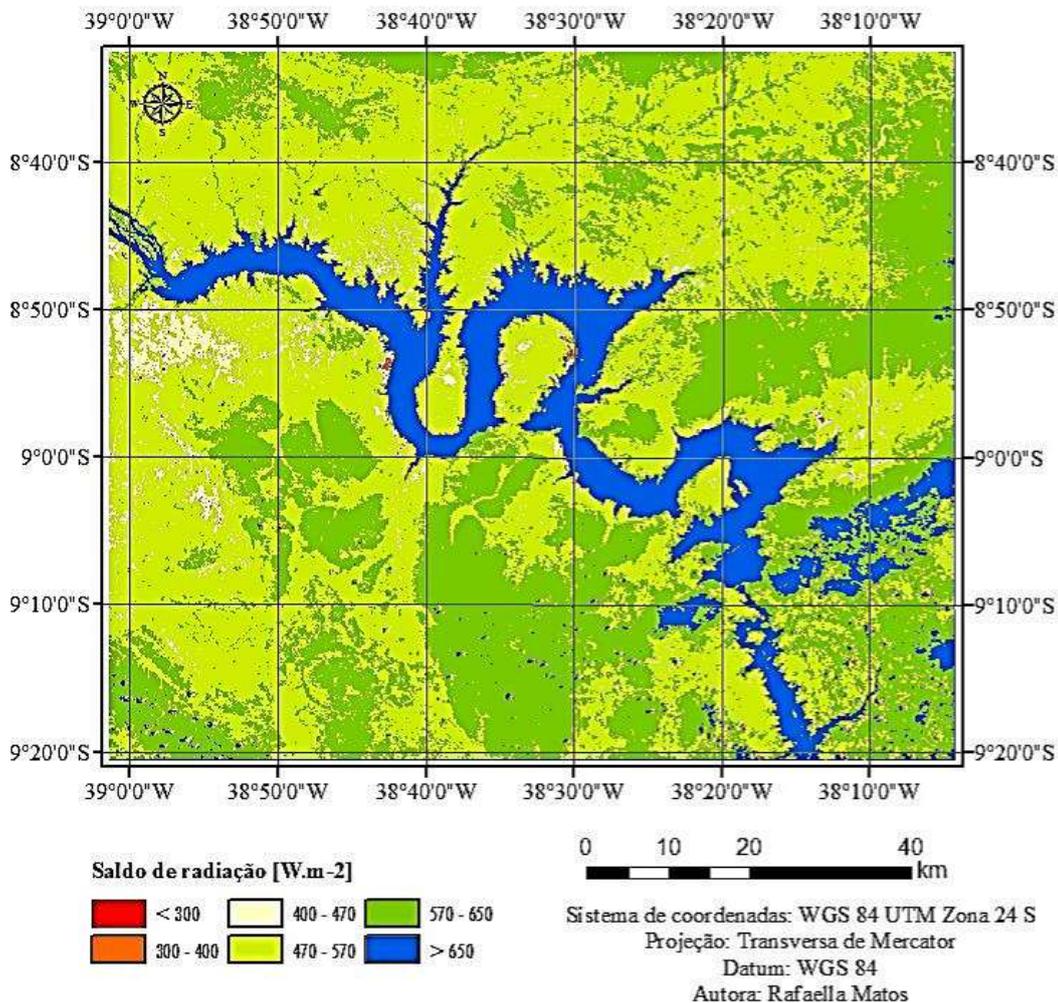


Fig. 4 - Mapa do saldo de radiação (W.m<sup>-2</sup>) 06/10/2010.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados relacionados aos componentes estimados a partir do algoritmo SEBAL (albedo de superfície, NDVI e saldo de radiação) apresentaram grande variabilidade em função do uso do solo, como foi visto pela apresentação dos resultados em quatro diferentes pontos dentro da área (área irrigada, área urbana, solo exposto e vegetação nativa), pode-se verificar também que esta variação também se deu em resposta a estação do ano e ocorrência de chuvas, que não apresentam uma distribuição uniforme.

O algoritmo SEBAL mostrou-se capaz em relação a disponibilização de componentes do balanço de energia, de modo a evidenciar a variabilidade espacial dos componentes do

balanço em diferentes condições do solo, além de possibilitar a observação quantitativa destes.

Uma adequada rede de estações dentro da área de interesse possibilitaria uma validação ainda mais confiável do algoritmo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos e ao projeto INNOVATE (*INterplay between the multiple use of water reservoirs via inNOVative coupling of substance cycles in Aquatic and Terrestrial Ecosystems*) aprovado pelo MCT e

pelo Ministério Alemão de Educação e Pesquisa – BMBF.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. **Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation.** *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 122, n. 2, p. 97-106, 1996.

ALLEN, R. G.; BASTIAANSEN, W. G. M.; WATERS, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **Surface energy balance algorithms for land (SEBAL), Idaho implementation – Advanced training and user’s manual.** v. 1.0, 2002. 97 p.

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*, p. 380-394, 2007.

ANDRADE, R. G. **Aplicação do algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da cana-de-açúcar.** Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 135. 2008.

ASCR-EWRI. **The ASCE Standardized reference evapotranspiration equation.** 2005.

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.** *Landbouwniversiteit Wageningen*. Wageningen, p. 272. 1995. (ISBN 90-5485-465-0).

BASTIAANSEN, W. G. M. **SEBAL – based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey.** *Journal of Hydrology*, v. 229, p. 87-100, 2000.

BASTIAANSEN, W. G. M.; BAKKER, M. **Use of satellite data in agricultural water management.** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2000. 81 p.

BASTIAANSEN, W. G.; BRITO, R. A. L.; BOS, M. G.; SOUZA, R. A.; CAVALCANTI, E. B.; BAKKER, M. M. **Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil.** *Irrigation and Drainage Systems*, v. 15, p. 53-79, 2001.

BEZERRA, A. R. G.; SILVA, M. A. V.; MATOS, R. E.; PINHEIRO, A. C. T.; MOSCON, E. S. **Componentes do balanço de energia da soja estimada por meio de imagens via satélite.** *Revista Agro@ambiente On-line*, v. 8, n. 1, p. 59-65, 2014. ISSN 1982-8470.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; SILVA, B. B. **Mapeamento e quantificação de parâmetros biofísicos e radiação líquida em área de algodoeiro irrigado.** *Ciência e Agrotecnologia*, v. 34, n. 2, p. 485-493, 2010.

CARVALHO, RENATA M. C.; SOBRAL, M. C.; SILVA, J. A. A.; MELO, GUSTAVO L. **Environmental indicators for irrigation projects: Determining and applying an indicator for the perception of family farming sustainability.** In: GUNKEL, G.; SILVA, J. A. A.; SOBRAL, M. C. **Sustainable Management of Water and Land in Semi-arid Areas.** 1ª. ed. Recife: Editora Universitária, 2013. Cap. 4, p. 205-227.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. **Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors.** *Remote Sensing of Environment*, 113, p. 893-903. 2009.

COE, M. T.; LATRUBESSE, E. M.; FERREIRA, M. E.; AMSLER, M. L. **The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil.** *Biogeochemistry*, v. 105, n. 1-3, p. 119-131, 23 fevereiro 2011.

DANTAS, M. J. F. **Evapotranspiração na sub-bacia do Riacho Jardim – CE, por sensoriamento remoto.** Universidade Estadual Paulista. p. 107. 2013.

FERREIRA, J. M. S., FERREIRA, H. S., SILVA, H. A., S., A. M., GALVÍNIO, J. D. **Análise Espaço-Temporal da Dinâmica da Vegetação de Caatinga no Município de Petrolina - PE.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 4, p. 904-922, 2012. ISSN 1984-2295.

FRANÇA, J. R. A.; PERES, L. F.; ANTÔNIO, R. A. **Análise do Fluxo Médio de Radiação de Onda Longa Emitida pela Superfície Terrestre Usando NOAA-AVHRR: Aplicação**

- na Determinação de Ilhas de Calor na Área Metropolitana da Cidade do Rio de Janeiro.** XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. [S.l.]: [s.n.]. 2000.
- GARRISON, J. D.; ADLER, G. P. Estimation of precipitable water over the United State for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. **Solar Energy**, v. 44, n. 4, p. 225-241, 1990.
- GOMES, H. F.; 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, n. 2, p. 153-164, 2009.
- HUETE, A. R. **A soil adjusted vegetation index (SAVI).** Remote Sensing of Environment. v. 25, p. 53-70. 1988.
- IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation.** Toronto: Academic Press Canada, 1983. 390 p.
- KHALDI, A.; HAMIMED, A.; MEDERBAL, K.; SEDDINI, A. Obtaining evapotranspiration and surface energy fluxes with remotely sensed data to improve agricultural water management. **African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development**, 11, n. 1, 2011. 4558-4581.
- LEIVAS, J.; GUSSO, A.; FONTANA, D. C.; BERLATO, M. **Estimativa do balanço de radiação na superfície a partir de imagens do satélite ASTER.** p. 255-262. Florianópolis: INPE. 2007a.
- LEIVAS, J.; FONTANA, D.; BERLATO, M.; CARDOSO, L. **Variação diária do albedo sobre uma superfície vegetada e sobre um lago na estação experimental da UFRGS - RS.** XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Aracajú, 2007b.
- LIRA, V. M.; SILVA, B. B.; NETO, J. D.; FARIAS, M. S. S.; BEZERRA, M. V. C.; FRANCO, E. S.; CENTENO, C. R. M. Análise espectral de índices de vegetação em área irrigada com cana-de-açúcar. **Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 113-120, 2009.
- MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI.** Brasília, p. 212. 2006. (ISBN 85-7738-038-6).
- 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.
- NICÁCIO, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco.** UFRJ. Rio de Janeiro, p. 320. 2008.
- RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M.; TEIXEIRA, A. S.; SILVA, B. B. Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 3, p. 452-465, 2009.
- SILVA, B. B.; FEITOSA, J. R.; MOURA, M. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; FILHO, J. F. C. Determinação do albedo do perímetro irrigado senador Nilo Coelho com técnicas de sensoriamento remoto e imagens Landsat 5- TM. **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia.** Foz do Iguaçu, 2002. p. 2897-2902.
- SILVA, M. G.; OLIVEIRA, J. B.; LÊDO, E. R.F.; ARAÚJO, E. M.; ARAÚJO, E. M. Estimativa da ETo pelos métodos Penman-Monteith FAO 56 e Hargreaves-Samani a partir de dados de Tx e Tn para Sobral e Tauá no Ceará. **Revista ACTA Tecnológica**, v. 5, n. 2, p. 53-68, 2010.
- SILVA, M. T.; SILVA, V. P. R.; SOUSA, E. P.; OLIVEIRA, S. D. **Variabilidade espaço temporal do albedo da superfície no semiárido pernambucano com base em imagens do TM/Landsat 5.** XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Foz do Iguaçu: INPE. 2013. p. 7468-7475.
- SILVA, S. T. A. **Mapeamento da evapotranspiração na bacia hidrográfica do baixo Jaguaribe usando técnicas de sensoriamento remoto.** Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 119. 2009.
- SOBRAL, M. C.; CARVALHO, C. O.; FIGUEIREDO, R. C. **Management of environmental risks from multipurpose use of reservoirs in semi-arid areas of São Francisco river.** In: GUNKEL, G.; SOBRAL, M. C. **Reservoirs and River Basins Management:**

**Exchange of Experience from Brazil, Portugal and Germany.** Universitätsverlag der TU Berlin, 2007. p. 279.

TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, v. 25, p. 99-103, 1997.

TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery.** University of Idaho. 2003.

TUCKER, C.J. **Red and Photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation.** Remote Sensing of Environment, v.8, 127-150. 1979