

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/6: 1203-1216
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

DETERMINAÇÃO DE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE E ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO USANDO IMAGENS LANDSAT E DADOS OBSERVADOS

Determination of Surface Temperature and Estimation of Net Radiation and Evapotranspiration Based on Landsat Imagery and Observed Data

**Alexandro Medeiros Silva¹, Richarde Marques da Silva¹
& Bernardo Barbosa da Silva²**

¹Universidade Federal da Paraíba – UFPB
Departamento de Geociências – Centro de Ciências Exatas e da Natureza
Cidade Universitária, João Pessoa/PB, CEP: 58059-900, Brasil
medeiros_alexandro@hotmail.com, richarde@geociencias.ufpb.br

³Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Departamento de Engenharia Civil – Centro de Tecnologia e Geociências
Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, CEP: 50741-530, Recife/PE, Brazil
bbdasilva.ufpe@gmail.com

Recebido em 30 de Junho, 2014/ Aceito em 05 de Junho, 2015
Received on June 30, 2014/ Accepted on June 05, 2015

RESUMO

Esse estudo determinou a temperatura da superfície, saldo de radiação e evapotranspiração em uma porção do semiárido da Paraíba. Neste trabalho, dados estimados de temperatura na superfície (T_s) e dados de temperatura observados do solo em três profundidades (2, 5 e 10 cm) foram analisados para estimar o saldo de radiação (R_n) e a evapotranspiração (ETP), mediante imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM)/LANDSAT 5 e o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* – SEBAL. Os dados observados foram coletados na estação climatológica localizada no município de São João do Cariri, região semiárida no Estado da Paraíba. Os resultados da comparação entre as temperaturas observadas e estimadas foi obtida para os valores estimados e a temperatura do solo em 5 cm de profundidade ($R^2 = 0,61$). Para a realização desse estudo foram utilizadas doze imagens para estimar temperatura da superfície, R_n e ETP. Dessas imagens, cinco sem cobertura de nuvens das datas 17/12/2004, 07/03/2005, 29/07/2005, 18/09/2006 e 28/10/2009, foram utilizadas para o mapeamento da distribuição da temperatura da superfície, R_n e ETP. Os resultados dos valores médios de temperatura da superfície variaram entre 21,86 e 34,76°C, R_n entre 532,22 e 732,66 W/m² e ETP de 3,99 a 6,64 mm/dia. Conclui-se que a determinação de temperatura da superfície, R_n e ETP sobre diferentes usos do solo na área de estudo alcançaram valores muito consistentes, mostrando-se uma metodologia satisfatória quando comparado com observações realizadas em campo.

Palavras chaves: Modelagem, Uso do Solo, Temperatura.

ABSTRACT

This study aimed to determinate the surface temperature, net radiation and evapotranspiration in the semiarid of Paraíba State. In this paper, land surface temperature data (T_s) and observed land temperature in three depths (2, 5 e 10 cm)

were analyzed for estimation the net radiation (R_n) and evapotranspiration (ETP), based on images of Thematic Mapper (TM)/LANDSAT 5 and from Surface Energy Balance Algorithm for Land – SEBAL. The observed data of one meteorological station located in the semiarid region of Paraíba State were used. The results o comparison between the estimated and observed temperatures was obtained for estimated values and the land surface temperature 5 cm depth ($R^2 = 0.61$). Twelve images were used to conduct this study to estimate the surface temperature, R_n and ETP. These images, five without cloud cover for the dates of 17/12/2004, 07/03/2005, 29/07/2005, 18/09/2006 and 28/10/2009 were used to mapping of surface temperature, R_n and ETP. The results showed that surface temperature values ranged between 21.86 and 34.76°C, R_n ranged between 532.22 and 732.66 W/m², and ETP between 3.99 and 6.64 mm/day. It is concluded that the methodology used in the determination of surface temperature, R_n and ETP in the selected areas, achieved very consistent values, showing a satisfactory methodology. The algorithm SEBAL determined, satisfactorily, the values of surface temperature, R_n and ETP on study area, consistent with observations made in the field.

Keywords: Modeling, Land Use, Temperature.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, técnicas de Sensoriamento Remoto têm assumido grande importância no monitoramento de diversos fenômenos meteorológicos e ambientais, pois oferecem grande suporte às previsões de tempo e um melhor entendimento do comportamento de variáveis climáticas e de parâmetros biofísicos da superfície terrestre, como: temperatura da superfície, fluxo de calor, balanço de energia e evapotranspiração.

A principal vantagem do Sensoriamento Remoto é a geração de informações de grandes e pequenas áreas com diferentes resoluções espaciais e temporais. Com o advento dessa técnica tornou-se possível o monitoramento espaço-temporal dos recursos hídricos e do uso do solo, em diferentes biomas (SANTOS *et al.*, 2014).

A obtenção de informações climatológicas por meio de imagens orbitais propicia a análise de amplas áreas da superfície terrestre quando comparadas à coleta de dados pontuais disponibilizados por estações climatológicas, sobretudo, em regiões com escassez esse tipo de dados, como é o caso da porção semiárida do Nordeste do Brasil.

Atualmente, diversos sensores a bordo de satélites ambientais, a exemplo do *Thematic Mapper* (Landsat 5), *Enhanced Thematic Mapper* (Landsat 7), AVHRR (NOAA), MODIS (Terra/Aqua), dentre outros (CHU & GUO, 2014), detectam a radiação solar refletida e a emitida por alvos à superfície, o que propicia o cômputo de sua refletância em diferentes faixas do espectro eletromagnético e também da temperatura da superfície (GOMES *et*

al., 2009). A relação entre essas refletâncias compõe diversos índices biofísicos que são indicadores importantes da presença e vigor da vegetação. Assim, índices de vegetação e a temperatura da superfície são 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 o clima em escala regional, sobretudo, no comportamento da evapotranspiração (MENDONÇA *et al.*, 2012).

Dentre as técnicas de Sensoriamento Remoto existentes para a determinação do saldo de radiação e da evapotranspiração, o algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land – SEBAL*, proposto por Bastiaanssen *et al.* (1998) é um dos mais utilizados em todas as partes do mundo, conforme apresentado nos estudos de Bastiaanssen (2000), Tasumi (2003), e Bastiaanssen & Chandrapala (2003), Ahmad *et al.* (2006), Bezerra *et al.* (2008), Teixeira *et al.* (2009a), Santos *et al.* (2010), e Silva *et al.* (2011).

No Brasil, a determinação de valores de temperatura da superfície (T_s), saldo de radiação (R_n) e evapotranspiração (ETP) se restringem a poucas áreas, mais precisamente, em áreas de monoculturas irrigadas (vinhedos e cana-de-açúcar) (TEIXEIRA *et al.*, 2009b; SANTOS *et al.*, 2010; LIMA *et al.*, 2014). Entretanto, ainda são escassos os estudos sobre esses parâmetros nos usos do solo típicos do bioma Caatinga (MACHADO *et al.*, 2014). De acordo com Silans & Silva (2007), apesar da importância do bioma representado pela Caatinga, que abrange todos os estados da região Nordeste, poucos estudos experimentais têm sido desenvolvidos no sentido de se compreender os fenômenos associados às

transferências de calor e massa nessa região, e, conseqüentemente, de temperatura da superfície, saldo de radiação e evapotranspiração, sobretudo, comparados com dados observados.

Nesse sentido, este estudo objetivou determinar a temperatura da superfície, saldo de radiação e evapotranspiração em uma porção do semiárido da Paraíba, mais precisamente na Bacia Experimental de São João do Cariri (Figura 1).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse estudo utilizou imagens de satélites e dados observados da Bacia Experimental de São João do Cariri, localizada entre as coordenadas 36° 31' 01" O a 36° 33' 32" O e 7° 20' 27" S a 7° 23' 24" S. Para a realização deste estudo foram realizados alguns procedimentos metodológicos,

como: (a) estimativa da temperatura de superfície, (b) cálculo do saldo de radiação, (c) determinação do fluxo de calor no solo, calor latente e calor sensível, (d) estimativa da evapotranspiração diária.

2.1 Descrição da área de estudo

A Bacia Experimental de São João do Cariri possui uma área de aproximadamente 13,5 km² e está inserida no bioma Caatinga, na unidade geoambiental do Planalto da Borborema. Segundo a classificação climática de Köeppen, o clima da região é do tipo BSh, caracterizado por insuficiência e irregularidade da precipitação e ocorrência de temperaturas elevadas. A temperatura média ao longo do ano varia entre 24 °C e 29 °C, com umidade relativa média de aproximadamente 57% (SANTOS *et al.*, 2007).

Mapa de localização da Bacia Experimental de São João do Cariri - PB

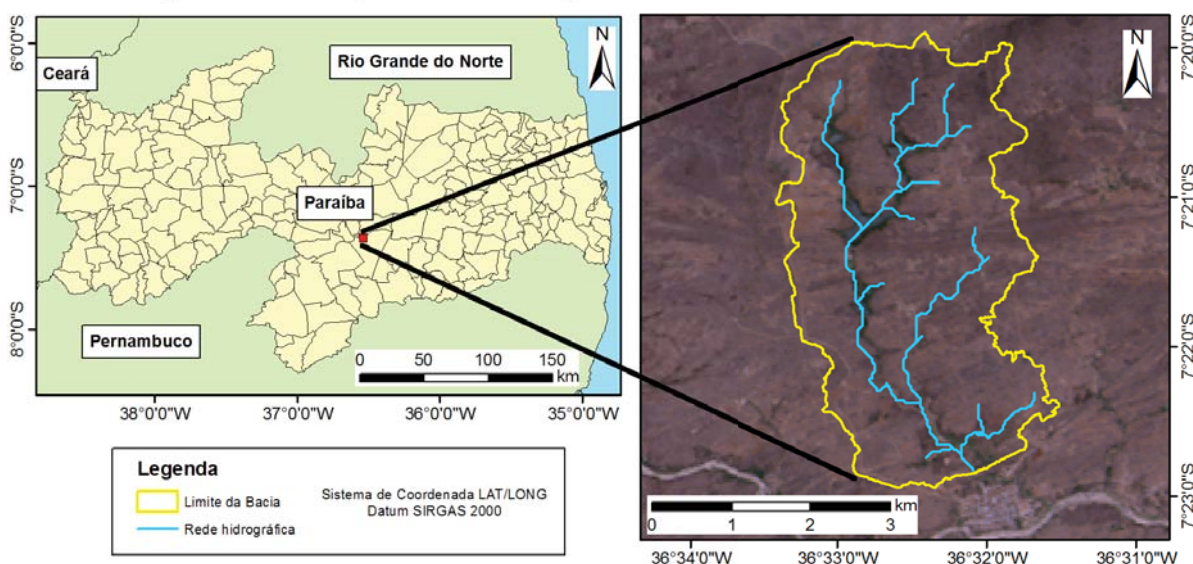


Fig. 1 - Localização geográfica da Bacia Experimental de São João do Cariri.

Silva e Santos (2012) apresentaram os valores médios mensais da precipitação na bacia (Figura 2), cujas amplitudes variaram entre 8 e 95 mm/mês. Os meses de janeiro a maio concentram a maior parte da precipitação e os menores valores ocorrem nos meses de julho a dezembro.

A Bacia Experimental de São João do Cariri apresenta solos rasos, pouco porosos e predominantemente plásticos, com vegetação do tipo caatinga e relevo bastante ondulado, com altitudes variando entre 450 a 700 m (PAIVA *et al.*, 2011).

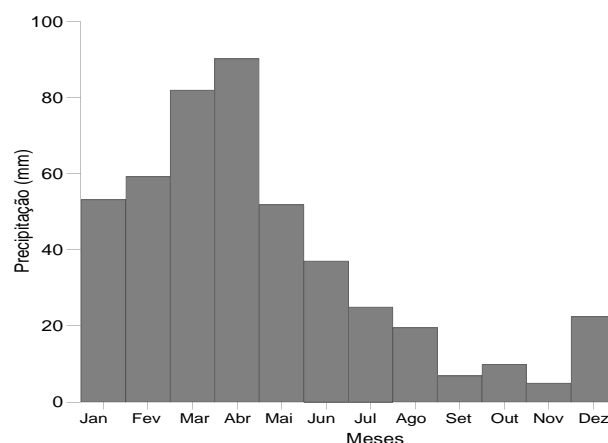


Fig. 2 – Precipitação mensal média para a Bacia Experimental de São João do Cariri.

O embasamento geológico é de natureza cristalina, compreendendo rochas metamórficas e ígneas antigas, do Pré-Cambriano. Os tipos de solos encontrados nessa bacia são: Cambissolo Háplico, Neossolo Litólico, Luvisso Crômico e Vertissolo Cromado (Fig. 3).

Segundo Chaves (2002), os solos Luvisso Crômico encontrados na bacia são solos rasos a moderadamente profundos, com sequência de horizontes do tipo A, B e C com textura argilosa ou média, bem drenados, desenvolvidos de rochas metamórficas. Quanto aos Vertissolo Cromado, estes são solos argilosos a muito argilosos e menos desenvolvidos que os Luvisso, possuindo uma toposequência de horizonte A-C-R. Podem apresentar fendilhamento, quando secos, e boa fertilidade. São rasos a moderadamente profundos, podem ser pedregosos e normalmente ocorrem em relevo plano a suave ondulado (PAES-SILVA, 2002).

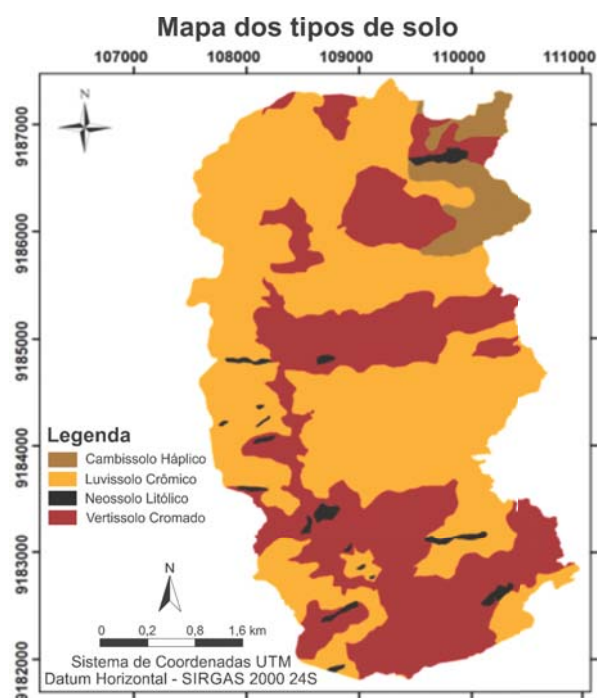


Fig. 3 - Distribuição espacial dos tipos de solo da Bacia Experimental de São João do Cariri. Fonte: Silva e Medeiros (2014).

Os solos Neossolo Litólico se caracterizam por serem muito rasos a rasos, com sequência de horizonte do tipo A-R com textura arenosa ou média, moderadamente drenados, com horizonte A fraco ou moderado (PAES-SILVA, 2002). Os solos do tipo Cambissolo Háplico são pouco desenvolvidos, com horizonte B incipiente;

pouco profundo e, muitas vezes, cascalhento. São solos considerados “jóvens” que possuem minerais primários e altos teores de silte até mesmo nos horizontes superficiais. Por possuírem alto teor de silte e a pouca profundidade, estes solos apresentam permeabilidade muito baixa (SILVA & MEDEIROS, 2014).

2.2 Mapeamento do uso e ocupação do solo

Para o levantamento cartográfico do uso e ocupação do solo da área de estudo utilizou-se uma imagem do satélite IKONOS, de maio de 2010, com resolução espacial de 1 m, adotando-se a seguinte composição colorida: Banda 1 (R), Banda 4 (G) e Banda 3 (B). O método de classificação utilizado foi o manual, por se tratar de uma imagem de alta resolução espacial a qual permitiu uma classificação mais precisa da cobertura do solo na bacia (Figura 4).

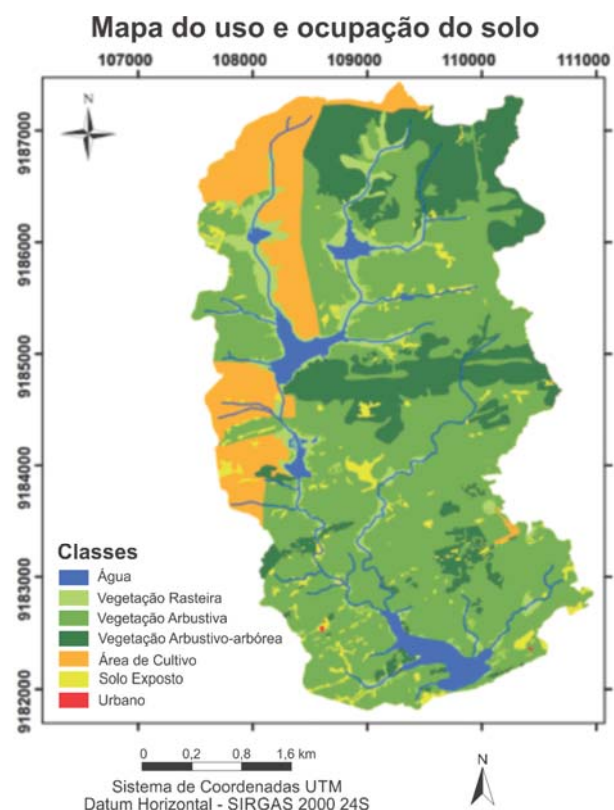


Fig. 4 - Mapa do uso e ocupação do solo da Bacia Experimental de São João do Cariri.

De acordo com a refletância espectral dos alvos foi possível classificar sete classes de uso e ocupação do solo: Vegetação Rasteira, Vegetação Arbustiva, Vegetação Arbustivo-arbórea, Área de Cultivo, Solo Exposto, Água e Área Construída.

As classes de uso do solo foram checadas em campo com visitas à bacia, durante o período

de novembro a dezembro de 2012, para uma melhor definição das amostras dos tipos de uso e ocupação do solo. Como a área de estudo é uma bacia experimental, não há mudanças significativas no uso do solo decorrente de alterações antrópicas. A área classificada como Vegetação Rasteira corresponde à vegetação que acompanha o curso dos rios, sejam eles intermitentes ou temporários, e também no entorno de açudes, em sua maior parte formada por vegetação herbácea.

As áreas classificadas como Vegetação Arbustiva e Vegetação Arbustiva-Arbórea são representativas do bioma da caatinga, e se diferem pelo porte, sendo a arbustiva aquela vegetação com porte arbóreo de até 1,5 m de altitude, a Arbustiva-Arbórea com porte entre 1,6 a 5,0 m de altitude (SILVA & MEDEIROS, 2014).

A classe Área de Cultivo corresponde às áreas de reflorestamento com espécies do tipo Algaroba (*Prosopis Juliflora*) e também constituída por pequenas áreas agrícolas. A classe Solo Exposto é caracterizada pela falta de cobertura vegetal. As classes Área Construída e Água representam áreas com edificações e rios e açudes, respectivamente.

2.3 Imagens utilizadas e correlação entre valores estimados e observados

Para estimar valores de temperatura do solo, saldo de radiação e evapotranspiração foram utilizados doze imagens do satélite Landsat-5, sensor TM, da órbita 215 e ponto 65, obtidas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A Tabela 1 mostra algumas das características das doze imagens utilizadas neste estudo.

Para comparar a relação entre dados de temperatura do solo observados e estimados foram utilizados dados diários de temperatura do solo em três profundidades (2, 5 e 10 cm), coletados diariamente às 9:00 em geotermômetros instalados na coordenada 36° 31' 37" O e 7° 22' 65" S, na Bacia Experimental de São João do Cariri. Esses dados diários de temperatura do solo em três profundidades foram utilizados para se determinar qual a melhor relação entre os dados estimados e os observados em qual profundidade.

Tabela 1: Características das Imagens Landsat-5/TM utilizadas nesse estudo

Data	Elevação do Sol (°)	Azimute do Sol (°)
10/07/2004	46,069	47,067
01/12/2004	58,988	121,075
17/12/2004 ¹	56,935	122,527
07/03/2005 ¹	56,608	88,705
29/07/2005 ¹	49,012	50,156
18/09/2006 ¹	60,943	72,476
19/07/2007	48,822	46,169
19/06/2008	46,985	43,660
23/09/2008	59,862	77,654
28/10/2009 ¹	63,873	105,051
09/06/2010	48,226	43,035
28/08/2010	55,385	60,885

¹ Imagens utilizadas para estimativas de temperatura, R_n e ETP.

Das doze imagens, cinco foram utilizadas para a estimativa de temperatura da superfície, R_n e ETP, referente aos dias julianos 351, 66, 210, 261 e 301. Essas cinco imagens foram selecionadas por não possuírem cobertura de nuvens sobre a área da bacia. Após a determinação de temperatura da superfície, R_n e ETP para cada uma das imagens foi gerada uma imagem síntese para cada variável, obtida pela média de cada pixel, produzida mediante a sobreposição das imagens pela técnica de álgebra de mapas.

Para verificar a confiabilidade dos valores de temperatura estimados e os observados foi utilizado o Coeficiente de Determinação (R²), calculado pela Eq. 1:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)^2}} \right)^2 \quad (1)$$

sendo x_i os valores observados, x_m a média dos valores observados, y_i os valores estimados e y_m a média dos valores estimados.

2.4 Estimativa da evapotranspiração diária, temperatura da superfície e saldo de radiação

Para calcular a evapotranspiração, o algoritmo SEBAL estima o calor sensível (H), obtido com base na velocidade do vento e na temperatura da superfície usando uma calibração interna da diferença da temperatura próxima à

superfície entre dois níveis da superfície, dado pela Eq. 2 (BASTIAANSSEN *et al.*, 1998):

$$H = \rho c_p \frac{(a + bT_s)}{r_{ah}} \quad (2)$$

sendo ρ a massa específica do ar, c_p é o calor específico do ar (1.004 J/kg/K), a e b coeficientes de correlação entre a temperatura entre dois níveis, estimados por um sistema de equações utilizando os pixel âncoras (pixel quente e frio) conforme Uda (2012), T_s é a temperatura da superfície (°C) calculada conforme a Eq. 3, e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor calculada a partir da Eq. 4.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (3)$$

sendo $K_1 = 607,76$ W/m/sr/ μ m e $K_2 = 1260,76$ K, que são constantes na calibração da banda termal do Landsat 5, $L_{\lambda,6}$ é a radiância espectral da banda termal, e ϵ_{NB} é a emissividade de cada pixel no domínio espectral na mesma banda termal (10,4–12,5 μ m) (ALLEN *et al.*, 2002):

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{u_* k} \quad (4)$$

no qual Z_1 e Z_2 são as alturas em metros acima da superfície (em alguns estudos mais recentes têm sido utilizados $Z_1 = 0,1$ m e $Z_2 = 2,0$ m), u_* é a velocidade de fricção (m/s) e k é a constante de von Karman (0,41).

Posteriormente foi calculado o fluxo de calor latente (L_E) que compreende o fluxo de massa na atmosfera proveniente da evaporação mais a transpiração das plantas de dada área é calculado a partir da Eq. 5.

$$L_E = R_n - G - H \quad (5)$$

sendo R_n o saldo de radiação a superfície, G o fluxo de calor no solo e o H o fluxo de calor sensível. Para o cálculo do R_n utilizou-se a Eq. 6.

$$R_n = R_{sol,inc}(1 - \alpha_{sup}) - R_{ol,emit} + R_{ol,atm} - (1 - \epsilon_0)R_{ol,atm} \quad (6)$$

em que $R_{sol,inc}$ é a radiação de onda curta incidente, α_{sup} é o albedo de superfície, $R_{ol,atm}$ é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel, $R_{ol,emit}$ é a radiação de onda longa emitida e ϵ_0 domínio da banda larga (5–100 μ m).

O fluxo de calor no solo é obtido a partir da equação proposta por Bastiaanssen (2000), que representa valores próximos ao meio-dia (Eq. 7):

$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98NDVI^4) \right] R_n \quad (7)$$

no qual α é o albedo da superfície e NDVI é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada, e R_n o saldo de radiação a superfície e T_s é a temperatura de superfície, todos computados para cada pixel.

Por fim calculou-se a evapotranspiração diária que é determinada com base da fração evaporativa instantânea, definida pela razão entre L_E e $R_n - G$ (Eq. 8).

$$F_{Ei} = \left(\frac{L_E}{R_n - G} \right) = F_{E24h} = \frac{L_{E24h}}{R_{n24h}} \quad (8)$$

em que F_{Ei} é a fração evaporativa instantânea, R_{n24h} o saldo de radiação diário, F_{E24h} é a fração evaporativa diária e L_{E24h} é o calor latente diário. Admite-se que $G_{24h} = 0$. Assim, a L_{E24h} será dada por:

$$L_{E24h} = F_{Ei} \times R_{n24h} \quad (9)$$

sendo $R_{n24h} = R_{s\downarrow 24h} (1 - \text{albedo}) - 110\tau_{sw\downarrow 24h}$ e a conversão da L_{E24h} em ET_{24h} é dada por:

$$ET_{24h} = 0,035 \left[(1 - \alpha) R_{s\downarrow 24h} - 110\tau_{sw\downarrow 24h} \right] \quad (10)$$

sendo ET_{24h} a evapotranspiração diária, α o albedo da superfície, $R_{s\downarrow 24h}$ a radiação solar incidente no período de 24 horas e $\tau_{sw\downarrow 24h}$ a transmissividade média.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta os valores médios diários da temperatura do solo observados em campo para cada dia do ano entre 2004 e 2010, nas

três profundidades analisadas. Como esperado, os maiores valores de temperatura do solo foram registrados na sua camada mais superficial, com temperatura diária média de 35,2°C, enquanto nas profundidades 5 e 10 cm, a temperatura diária do solo foi de 31,1°C e 31,3°C, respectivamente.

A Tabela 2 mostra os resultados de temperatura estimados, as temperaturas do solo observadas nas três profundidades e os valores médios entre as temperaturas observadas. Ao analisar os valores estimados observou-se que em sua grande maioria, o algoritmo SEBAL subestimou na maior parte dos casos os valores observados de temperatura de superfície em todas as profundidades. As maiores diferenças encontradas foram entre os valores estimados e as temperaturas observadas a 2 cm de profundidade, na qual a diferença chegou a mais de -10°C nas datas: 07/03/2005, 29/07/2005, 19/06/2008 e 28/08/2010.

As temperaturas que obtiveram menor diferença em relação às temperaturas estimadas

foram registradas a 5 e 10 cm da superfície, com diferença média de -2,23°C e -1,87°C, respectivamente. A temperatura observada média em 5 e 10 cm foi de 31,52 e 31,16°C, com desvio padrão de 4,55 para 5 cm e 3,74 para 10 cm. A temperatura observada do solo média entre as três profundidades foi de aproximadamente 33°C, com diferença média de -3,64 °C, como pode ser visto na Tabela 2. Os maiores valores de desvio médio e desvio padrão foram obtidos entre os valores estimados pelo SEBAL e as temperaturas observadas do solo a 2 e 5 cm, com desvio padrão de 4,92 e 4,55, respectivamente.

A Figura 6 apresenta os valores estatísticos da variabilidade dos dados de temperatura do solo observados e as temperaturas de superfície estimadas. Nota-se que os dados observados nas profundidades de 5 e 10 cm mostram comportamento semelhante e pequena variação, com valores máximos que não ultrapassam 40°C, enquanto na profundidade de 2 cm a temperatura estimada máxima foi de 45°C.

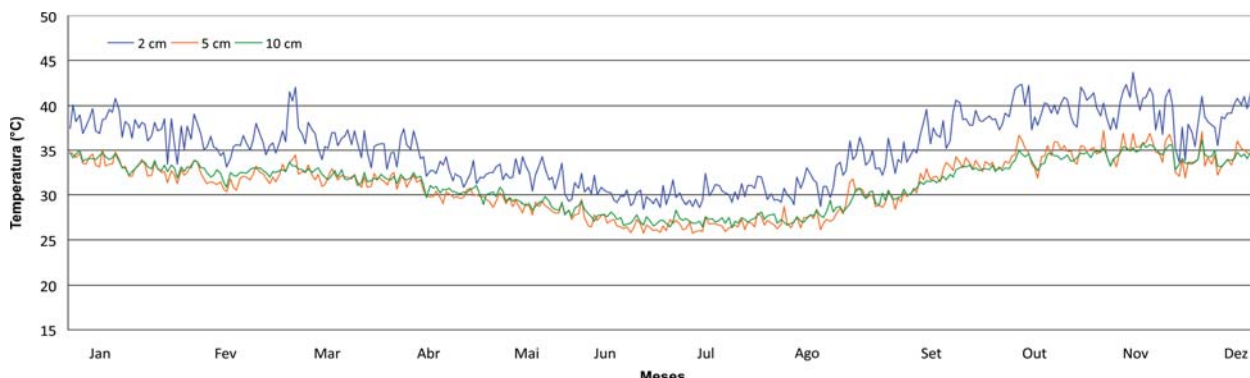


Fig. 5 - Variabilidade sazonal da temperatura do solo entre 2004 e 2010 em 2, 5 e 10 cm.

Tabela 2: Diferença entre as temperaturas estimadas e observadas nas três profundidades analisadas na área de estudo

Data	Temperatura estimada ¹	2 cm		5 cm		10 cm		Média 2, 5 e 10 cm	
		To ²	Diferença	To ²	Diferença	To ²	Diferença	To ²	Diferença
10/07/2004	24,54	26,60	-2,06	27,00	-2,46	26,00	-1,46	26,53	-1,99
01/12/2004	35,99	39,00	-3,01	36,00	-0,01	35,20	0,79	36,73	-0,74
17/12/2004	34,77	39,80	-5,03	39,40	-4,63	36,00	-1,23	38,40	-3,63
07/03/2005	26,79	38,60	-11,81	36,00	-9,21	35,60	-8,81	36,73	-9,94
29/07/2005	25,38	37,50	-12,12	28,60	-3,22	29,00	-3,62	31,70	-6,32
18/09/2006	34,80	39,40	-4,60	31,60	3,20	32,00	2,80	34,33	0,47
19/07/2007	30,59	32,80	-2,21	28,60	1,99	29,40	1,19	30,27	0,32
19/06/2008	19,98	30,60	-10,62	25,00	-5,02	26,00	-6,02	27,20	-7,22
23/09/2008	26,34	34,00	-7,66	31,00	-4,66	33,00	-6,66	32,67	-6,33
28/10/2009	38,79	44,00	-5,21	37,00	1,79	34,60	4,19	38,53	0,26
06/09/2010	25,83	32,00	-6,17	28,00	-2,17	30,00	-4,17	30,00	-4,17
28/08/2010	27,67	39,20	-11,53	30,00	-2,33	27,10	0,57	32,10	-4,43
Média	29,29	36,13	-6,84	31,52	-2,23	31,16	-1,87	32,93	-3,64
Desvio Padrão	5,65	4,92	3,81	4,55	3,54	3,74	4,02	4,09	3,39

¹ Temperatura estimada (°C); ² Temperatura observada (°C).

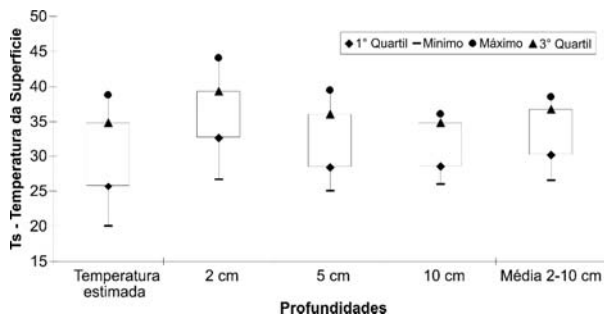


Fig. 6 - Parâmetros estatísticos da variabilidade dos dados de temperatura observados e estimados.

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos pelo coeficiente de determinação entre os dados observados e estimados de temperatura. Os melhores ajustes (R^2) foram obtidos entre os valores estimados e os dados observados na profundidade a 5 cm, com $R^2 = 0,61$. O R^2 entre temperatura estimada e a média das três profundidades (2, 5 e 10 cm) também apresentou valor similar ($R^2 = 0,58$).

Nota-se um padrão de similaridade entre os valores de temperatura observados e estimados representado nos gráficos de dispersão das profundidades 5 e 10 cm, em relação à profundidade de 2 cm, mesmo que em

profundidades não muito espessas. Percebe-se que todos os valores estimados para 2 cm subestimaram os valores observados.

As Figuras 8a–8e apresentam os mapas de temperatura estimadas para a Bacia Experimental de São João do Cariri, nos dias: (a) 17/12/2004, (b) 07/03/2005, (c) 29/07/2005, (d) 18/09/2006, (e) 28/10/2009, e (f) média. A Figura 8f mostra a temperatura estimada média para as cinco cenas utilizadas nesse estudo. Os menores valores de temperatura estimada das cinco cenas foram obtidos nas imagens de 03/07/2005 (Figura 8b) e 29/07/2005 (Figura 8c).

Essas cenas apresentaram valores mínimos de 17,9 e 17,4° C, máximas de 30,7 e 28,1° C e média de 27,8 e 24,1° C, respectivamente. A imagem da data 28/10/2009 (Figura 8e) apresentou os maiores valores de temperatura estimada, localizados na porção oeste da bacia, nas áreas de cultivo e de vegetação arbustiva. Na região central da bacia e a nordeste, as temperaturas são menores, por conta da presença de vegetação com um porte mais elevado, bem como alguns corpos hídricos, como visto na Figura 4.

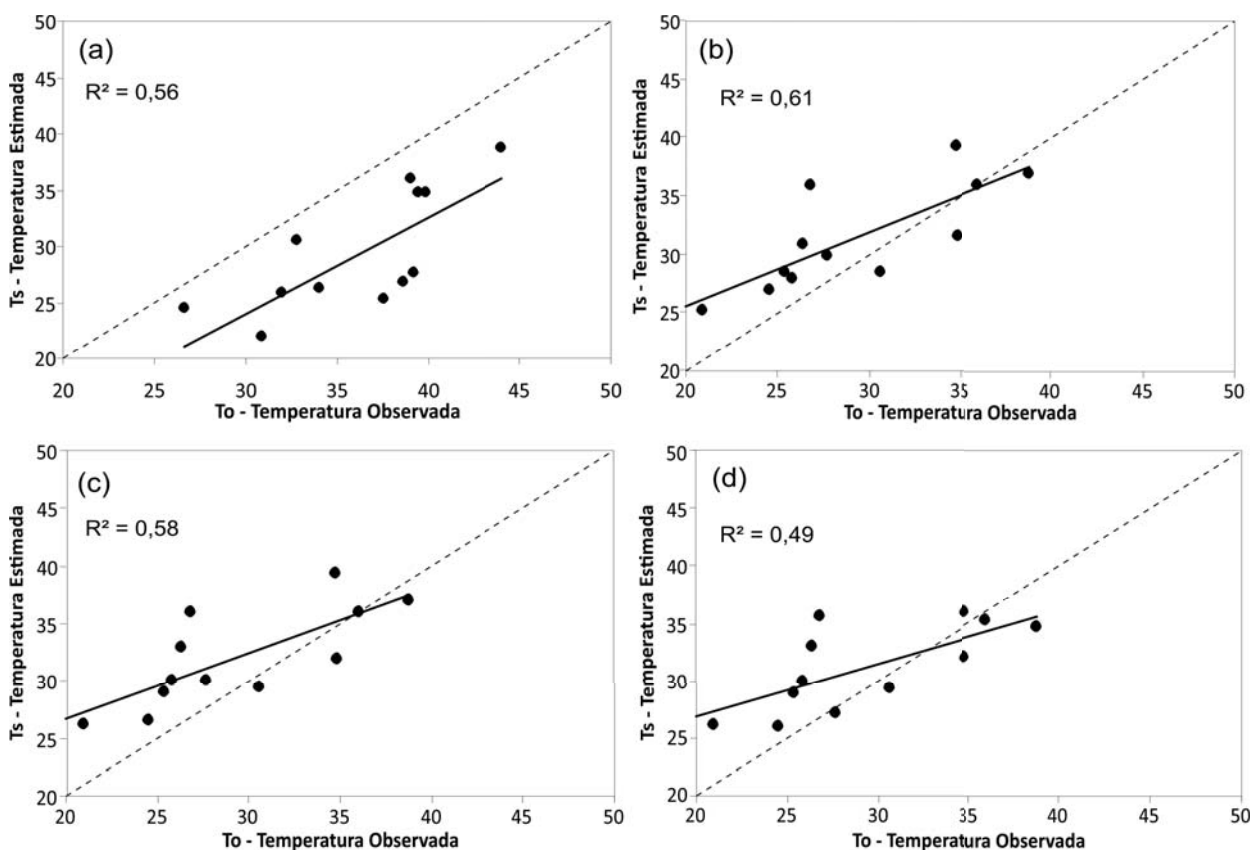


Fig. 7 - Comparação entre as temperaturas estimadas e as temperaturas observadas nas seguintes profundidades: (a) 2 cm, (b) 5 cm, (c) 10 cm e (d) média entre as três profundidades.

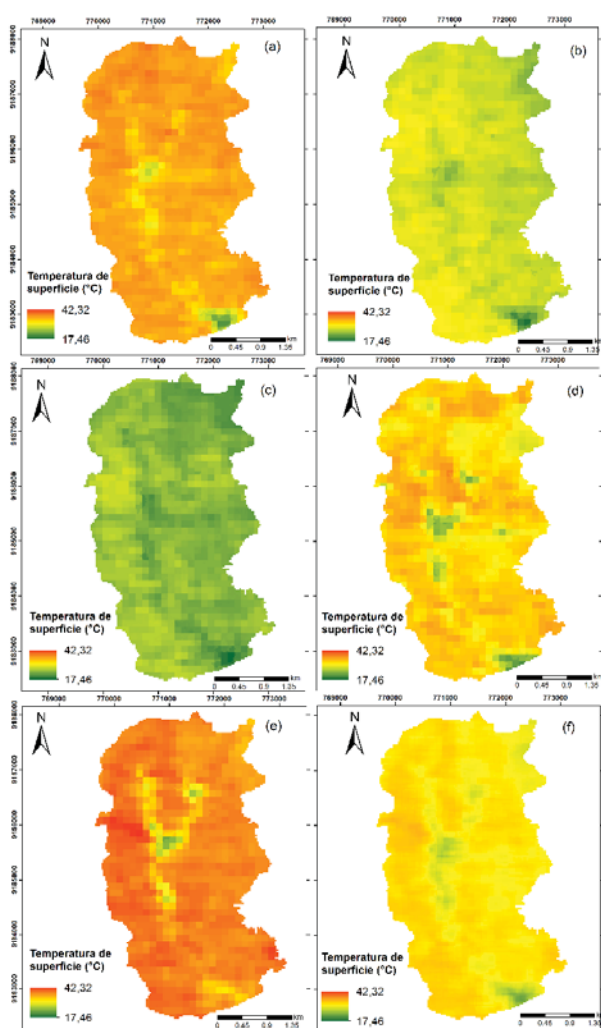


Fig. 8 - Distribuição espacial das temperaturas estimadas para os dias : (a) 17/12/2004, (b) 07/03/2005, (c) 29/07/2005, (d) 18/09/2006, (e) 28/10/2009, e (f) média.

Segundo as Figuras 8a–8e, onde ocorre uma cobertura vegetal mais densa, há uma diminuição da temperatura na superfície. Este fato pode ser decorrente de vários fatores seja a alteração da velocidade do vento, a rugosidade de vegetação, o direcionamento das folhas no sentido do fluxo de ar, mesmo para coberturas vegetais de baixo porte como o pasto, ou para uma vegetação esparsa como a caatinga no período seco. O solo exposto obtém sua mais elevada resposta de temperatura justamente nas áreas em fase de preparo do solo para o cultivo, como pode ser observado nas Figuras 8a–8e, representado pelas áreas que apresentam cores avermelhadas.

A imagem com os valores médios de temperatura (Figura 8f), obtida pela álgebra entre as cinco cenas utilizadas, apresenta

temperaturas que variaram entre 21,8 e 34,76°C com média de 31,5°C. Como esperado, de forma geral, as temperaturas mais altas foram obtidas em superfícies com pouca ou nenhuma vegetação. Percebe-se que as imagens do ano de 2005 apresentaram valores médios com aproximadamente 10°C a menos que as outras datas, essa diferença pode estar relacionada à radiação solar incidente em cada imagem, ou seja, aos efeitos da sazonalidade, já que nenhum evento de chuva foi observado nos 15 dias anteriores a obtenção das imagens.

3.2 Estimativa do saldo de radiação e da evapotranspiração diária

A variação espacial do R_n estimado para as cinco cenas analisadas são apresentadas nas Figuras 9a–9e, e a Figura 9f mostra o R_n médio para as cinco cenas utilizadas nesse estudo.

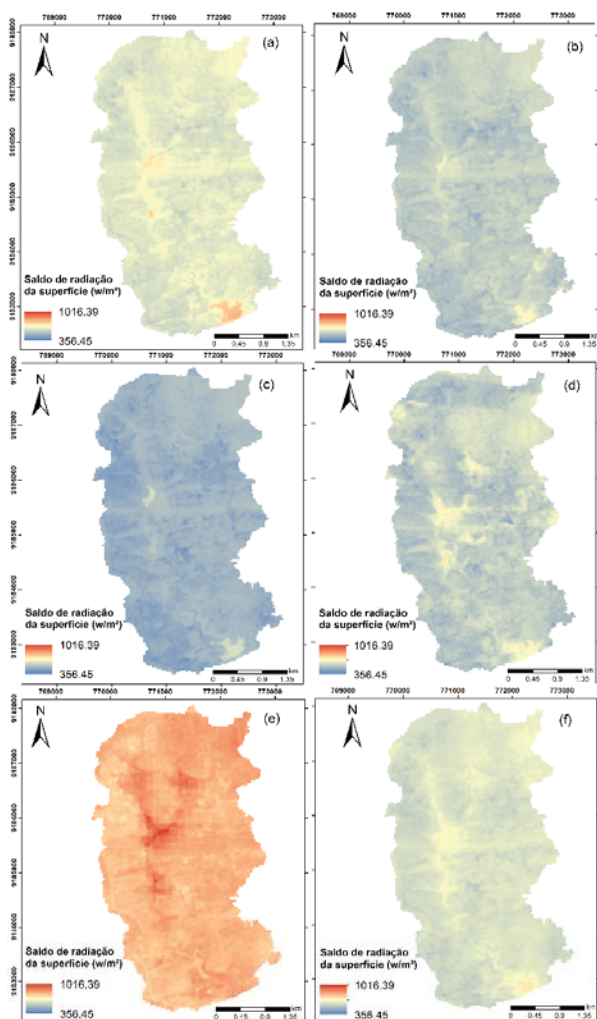


Fig. 9 - Saldo de radiação para os dias: (a) 17/12/2004, (b) 07/03/2005, (c) 29/07/2005, (d) 18/09/2006, (e) 28/10/2009, e (f) média.

As imagens de 17/12/2004 e 28/10/2009 apresentaram os valores mais elevados de R_n das cinco datas estudadas (Figuras 9a e 9e). Na cena de 17/12/2004 o R_n variou de 520,35 a 818,63 W/m^2 , tendo como média 635,27 W/m^2 . Já para 28/10/2009 foram estimados valores de R_n entre 698,05 a 1016,39 W/m^2 , com 817,84 W/m^2 de média. As demais imagens apresentaram valores inferiores, com médias que não ultrapassam 600 W/m^2 . Essa diferença entre as imagens pode ser causada pela quantidade de radiação incidente em cada data.

Na imagem com valores médios de saldo de radiação para a bacia, foi encontrado valor médio de 618,94 W/m^2 , com mínimo de 532,21 W/m^2 e valor máximo de 732,65 W/m^2 . De forma geral, as áreas que apresentaram os maiores valores de saldo de radiação em todas as cenas utilizadas se concentram na parte nordeste da bacia, devido à presença de vegetação com maior porte, e também na parte central e sul da bacia, onde há a presença de corpos hídricos e do açude namorados (Figura 4).

A distribuição espacial da ETP na área de estudo pode ser conferida nas Figuras 10a–10f. Os maiores valores de ETP obtidos foram nas imagens de 17/12/2004 e 18/09/2006 (Figuras 10a e 10e), com ETP mínima de 3,95 e 3,85 mm/dia, máxima de 7,38 e 11,12 mm/dia e média entre 4,39 e 4,43 mm/dia, respectivamente. As imagens que apresentaram os maiores valores médios ocorreram nas cenas de 07/03/2005 (Figura 10b) e 29/07/2005 (Figura 10c) com médias de 5,33 e 5,13 mm/dia, respectivamente. Os valores médios estimados de ETP nesse estudo são próximos aos obtidos nos estudos de Santos *et al.* (2010) e Teixeira *et al.* (2009a).

Os baixos valores de desvio padrão e da variação média mostram que há pouca variação dos valores de ETP em cada cena, possivelmente por tratar-se de uma região onde há certa homogeneidade nos fluxos de calor e massa (SILANS & SILVA, 2007).

No mapa da evapotranspiração média (Figura 10f), o valor mínimo foi de 3,98 mm/dia, e o máximo de 6,64 mm/dia e a média de 4,30 mm/dia. A espacialização da ETP diária para a bacia mostra que assim como no saldo de radiação, as áreas que apresentam os maiores valores de ETP em todas as cenas utilizadas nesse estudo, localizam-se nas porções nordeste,

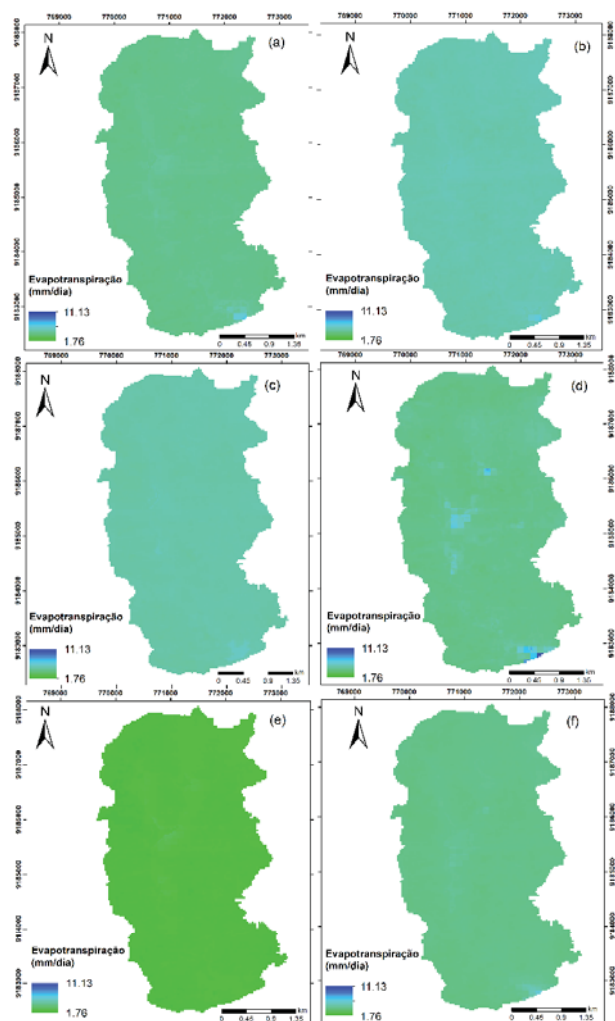


Fig. 10 - Espacialização da evapotranspiração para os dias: (a) 17/12/2004, (b) 07/03/2005, (c) 29/07/2005, (d) 18/09/2006, (e) 28/10/2009, e (f) média.

sul e central, áreas onde predominam vegetação arbustiva-arbórea e/ou corpos hídricos (Figura 4).

A Tabela 3 apresenta as análises estatísticas dos valores estimados de temperatura estimada, R_n e ETP com base em cinco imagens sem a presença de nuvens para toda a área da bacia estudada. Os dados de temperatura estimada mostram maior variação nas datas após 07/03/2005, com variação média de 4,50 e desvios padrão variando entre 1,51 e 2,34. Os valores médios de temperatura estimada na bacia variaram entre 24 e 37°C, mostrando grande amplitude entre os usos do solo nas imagens. Essa variação pode ser explicada fundamentalmente como resultante 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 entre os meses de julho a

dezembro, e também na resposta da vegetação à sua fenologia e distribuição intra-anual das precipitações mensais.

Tabela 3: Análises estatísticas dos valores de temperatura, R_n e ETP estimados

Data	Min	Max	Média	DP ¹	Var ²
Temperatura (°C)					
17/12/2004	21,07	38,82	35,36	1,90	5,37
07/03/2005	17,92	30,70	27,89	1,51	5,43
29/07/2005	17,46	28,12	24,17	1,54	6,38
18/09/2006	20,63	38,04	32,59	2,28	6,98
28/10/2009	22,40	42,32	37,48	2,34	6,25
Média	21,86	34,76	31,50	1,42	4,50
Saldo de Radiação (W/m ²)					
17/12/2004	520,35	818,63	635,27	27,93	4,40
07/03/2005	461,92	707,39	566,96	26,63	4,70
29/07/2005	359,45	617,74	500,60	25,61	5,12
18/09/2006	448,88	742,67	574,00	37,16	6,47
28/10/2009	698,06	1016,39	817,85	32,80	4,01
Média	532,22	732,66	618,94	23,69	3,83
Evapotranspiração (mm/dia)					
17/12/2004	3,95	7,38	4,39	0,15	3,50
07/03/2005	4,93	7,33	5,33	0,12	2,33
29/07/2005	4,75	5,98	5,13	0,10	1,96
18/09/2006	3,86	11,13	4,43	0,34	7,85
28/10/2009	1,76	3,30	2,21	0,16	7,22
Média	3,99	6,64	4,30	0,13	3,12

¹ Desvio Padrão; ² Variação média (%).

Na área de estudo o R_n médio encontrado foi inferior apenas a duas datas 618,94 W/m². Na bacia, o R_n variou entre 500,60 W/m² e 817,85 W/m² (Tabela 3). Bastiaanssen (1998) obteve valores de R_n menores para área árida com vegetação de oásis variando entre 400 e 500 W/m². Em outro estudo para essa mesma área, Dubayah (1992) obteve R_n médio com correção de modelo de elevação digital igual a 654 W/m², e R_n sem correção do MDE igual a 643 W/m².

Neste estudo, conforme resultados da Tabela 3, o R_n das cenas estudadas foi significativamente maior que nos estudos citados anteriormente. Nota-se que a imagem de 28/10/2009 apresentou os maiores valores de R_n , quando comparada com as demais imagens analisadas. Isso pode estar associado a mudanças significativas nos valores de R_n entre os meses estudados. Esses menores valores de R_n devem-se aos maiores valores de albedo e de temperatura estimada, verificados nas áreas de solo exposto que, em consequência, reduzem o saldo de radiação. Uma vez que mais energia

é devolvida de volta para o espaço, menos energia fica disponível para os processos biofísico-químicos da superfície. Comportamento contrário ocorre com a vegetação densa, que absorve maior porcentagem das ondas curtas incidentes.

Os valores de ETP variaram bastante entre as imagens estudadas na área de estudo, de 2,21 a 5,33 mm/dia. As áreas com ETP próximas a 2,21 mm/dia correspondem a áreas de solo exposto, bancos de areia e/ou vegetação muito rala. Resultados muito próximos foram encontrados na região do Cariri do Estado do Ceará por Bezerra et al. (2008) e em áreas de deserto e vegetação esparsa no estado americano do Novo México por Wang et al. (2005).

A Figura 11 mostra a correlação entre (a) temperatura estimada e o saldo de radiação estimado e (b) temperatura estimada e evapotranspiração estimada. Os resultados apontam um bom ajuste ($R^2 = 0,73$) entre os dados estimados de temperatura e R_n , entretanto, a correlação entre os dados de ETP e temperatura estimada não se mostrou satisfatório, mas, indicam uma tendência se retirada os valores médios.

As correlações entre temperatura estimada, R_n e ETP obtidas apresentaram uma boa concordância, o que mostra a potencialidade dessa metodologia, embora deve-se destacar o limitado conjunto de dados coletados *in situ* para a adequada validação dos resultados. Nesse estudo foram utilizadas apenas cinco cenas para se analisar a correlação das entre temperatura estimada, saldo de radiação e evapotranspiração, em virtude de serem as únicas imagens sem a presença de nuvens. Deve-se ressaltar que essas cenas foram as mesmas utilizadas para a espacialização da temperatura estimada, saldo de radiação e evapotranspiração na bacia. Assim, a comparação entre temperatura estimada e o saldo de radiação e a evapotranspiração se mostraram eficazes.

Com dados de altas resoluções temporais e espaciais, com uma adequada rede de estações *in situ* para melhor validar o emprego do algoritmo em escalas operacional e de rotina, pode-se antever que essa importante ferramenta presta-se ao monitoramento de necessidades hídricas de culturas agrícolas, entre outras aplicações.

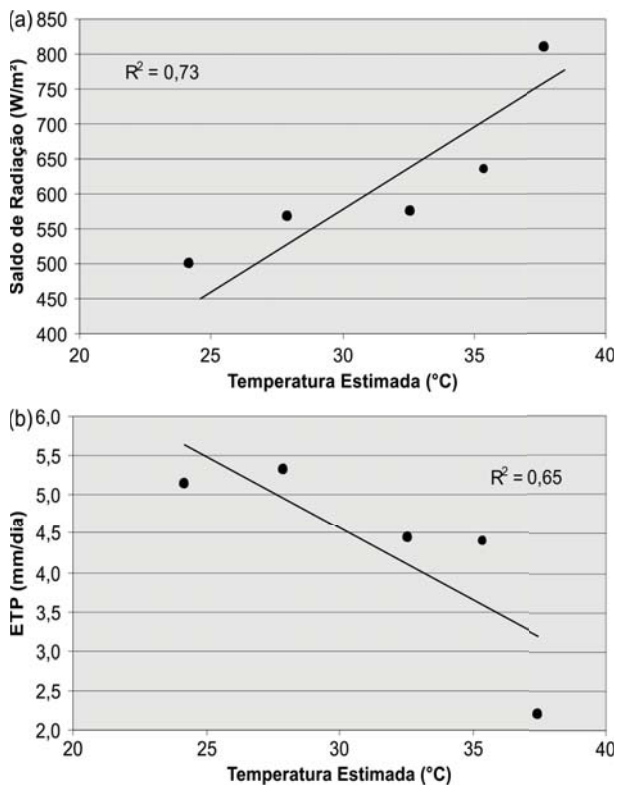


Fig. 11 - Correlação entre (a) temperatura estimada e o saldo de radiação estimado e (b) temperatura estimada e evapotranspiração estimada.

4. CONCLUSÕES

A variabilidade da temperatura da superfície, R_n e ETP no semiárido apresentaram oscilações diárias consideráveis no período analisado, devido a pouca cobertura do dossel da vegetação e da enorme incidência de radiação na área de estudo.

A bacia apresentou uma maior variação entre as temperaturas estimadas e observadas na profundidade de 2 cm quando comparada com as camadas mais profundas estudadas, com resultados obtidos pelo Coeficiente de Determinação igual a 0,61 para 5 cm e 0,58 para 10 cm, mostrando que os valores estimados por essa metodologia se adaptam melhor aos valores de temperatura nas profundidades de 5 e 10 cm.

A temperatura de superfície estimada variou entre 17,46°C e 42,32°C, mostrando que há uma grande variação térmica entre os diferentes usos do solo na bacia. O R_n também apresentou uma variação bastante significativa, com valores de 356,45 a 1016,39 W/m².

Os resultados de temperatura estimada e R_n mostraram que as áreas em torno da rede

hidrográfica, bem como na porção nordeste da bacia apresentaram os valores mais baixos de temperatura e mais elevados de saldo de radiação, por apresentarem áreas com vegetação mais vigorosa na bacia caracterizada pela vegetação do tipo caatinga, bem como a presença de corpos hídricos.

A ETP apresentou uma variabilidade espacial bem definida, pois apesar das influências sazonais, as áreas onde foram obtidos os maiores e menores valores, são praticamente as mesmas nas cenas estudadas. Os valores de ETP estimados variaram entre 1,76 e 11,13 mm/dia.

Por fim, conclui-se que a determinação de temperatura estimada, R_n e ETP sobre diferentes usos do solo do bioma Caatinga, compõem um importante conjunto de informações que podem auxiliar na compreensão das dinâmicas ocorridas na área, bem como na área são bons indicadores de alterações ocorridas na paisagem.

Além disso, os resultados do estudo alcançaram valores muito consistentes, mostrando-se uma metodologia satisfatória quando comparado com observações realizadas em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, M.-D.; BIGGS, T.; TURRAL, H.; SCOTT, C.A. Application of SEBAL approach and MODIS time-series to map vegetation water use patterns in the data scarce Krishna river basin of India. **Water Science & Technology**, v. 53, n. 10, p. 83-90, 2006.

ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL – **Surface Energy Balance Algorithms for Land, Advanced training and user's manual**. Idaho: Implementation, 2002, 98 p.

BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL - Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, n.1, p. 87-100, 2000.

BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL - Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, n.1, p. 87-100, 2000.

BASTIAANSEN, W.G.M.; CHANDRAPALA, L. Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. **Agricultural Water Management**, v. 58,

n. 2, p. 171-192, 2003.

BASTIAANSEN, W.G.M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MORENO, Y.M.J.; ROERINK, G.J.; VANDER WAL, T. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 3, n. 2, p. 213-229, 1998.

BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B.; FERREIRA, N.J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 3, n. 3, p. 305-317, 2008.

CHAVES, L.H.G.; CHAVES, I.B.; VASCONCELOS, A.C.F. **Salinidade das águas superficiais e suas relações com a natureza dos solos na Bacia Escola do açude Namorados**. Campina Grande: BNB/UFPB, (Boletim Técnico), 2002. 54p.

CHU, T.; GUO, X. Remote Sensing Techniques in Monitoring Post-Fire Effects and Patterns of Forest Recovery in Boreal Forest Regions: A Review. **Remote Sensing**, v. 6, n. 1, p. 470-520, 2014.

DUBAYAH, R. Estimating net solar radiation using Landsat TM and digital elevation data. **Water Resources Research**, v. 28, p. 2469-2484, 1992.

GOMES, H.B.; SILVA, B.B.; CAVALCANTI, E.P.; ROCHA, H.R. Balanço de radiação em diferentes biomas no Estado de São Paulo mediante imagens Landsat 5. **Geociências**, v. 28, n. 2, p. 153-164, 2009.

GOMES, L.C.F.; SANTOS, C.A.C.; ALMEIDA, H.A. Balanço de energia à superfície para a cidade de Patos-PB usando técnicas de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 1, p. 15-28, 2013.

LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; SOUZA, E.S.; LIRA, C.A.B.O.; BORGES JUNIOR, J.C.F.; SILVA, B.B. Saldo de Radiação em Caupi e Mamona nos Municípios de Areia-PB e Garanhuns-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, p. 93-102, 2014.

MACHADO, C.C.; SILVA, B.B.; DE ALBUQUERQUE, M.B.; GALVINCIO, J.D. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM - Landsat 5 e o algoritmo SEBAL

no litoral sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 55-67, 2014.

MENDONÇA, J.C.; SOUSA, E.F.; ANDRÉ, R.G.B.; SILVA, B.B.; FERREIRA, N.J. Estimativa do fluxo do calor sensível utilizando o algoritmo SEBAL e imagens MODIS para a região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 1, p. 85-94, 2012.

PAES-SILVA, A.P.; CHAVES, I.B.; SAMPAIO, E.V.S.B. Cobertura vegetal da bacia hidrográfica do açude Namorado no Cariri Oriental paraibano. **Agropecuária Técnica**, v. 24, n. 1, p. 47-59, 2003.

PAIVA, F.M.L.; SRINIVASAN, V.S.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, R.M. Estimativa de valores regionais dos parâmetros do solo do modelo Kinos2 para o semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 3, p. 141-150, 2011.

SANTOS, C.A.C.; BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B.; RAO, T.V.R. Assessment of daily actual evapotranspiration with SEBAL and S-SEBI algorithms in cotton crop. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 383-392, 2010.

SANTOS, C.A.G.; SILVA, R.M.; SRINIVASAN, V.S. Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semi-árido da Paraíba. **OKARA: Geografia em debate**, v. 1, n. 1, p. 16-32, 2007.

SANTOS, J.Y.G.; SILVA, R.M.; CARVALHO NETO, J.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, A.M. Assessment of land use change on the streamflow using GIS, remote sensing and physically-based model. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 364, p. 38-43, 2014.

SILANS, A.M.B.P.; SILVA, F.M. Fluxo de calor sensível e evapotranspiração na Caatinga: Estudo Experimental. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 1, p. 177-188, 2007.

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.

SILVA, B.B.; MENDONÇA, R.R. de O.; SILVA, S.T. A. da; FERREIRA, R. da C. Mapeamento

- do albedo de áreas heterogêneas do estado do ceará com imagens TM - Landsat 5. **Revista de Geografia**, v. 25, n. 2, p. 24-41, 2008.
- SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G. Análise das perdas de água e solo em um vertissolo cromado sob diferentes sistemas de manejo. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 32, n. 2, p. 93-107, 2012.
- SILVA, R.M.; MEDEIROS, I.C. Análise hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT, **GeoFocus**, v. 14, n. 1, p. 85-104, 2014.
- SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Identification of critical erosion prone areas and estimation of natural potential for erosion using GIS and Remote Sensing. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 5, p. 125-136, 2013.
- SILVA, R.M.; SILVA, L.P.; SANTOS, C.A.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Estimation of evapotranspiration in Brigida river basin (Brazil) by satellite remote sensing. **IAHS-AISH Publication**, v. 344, p. 208-214, 2011.
- TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. Ph.D. Thesis, Dept. Biological and Agricultural Engineering, University of Idaho. Idaho, 2003. 357 p.
- TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; AHMAD, M.D.; BOS, M.G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil, Part B: Application to the regional scale. **Agricultural and Forestry Meteorology**, v. 149, n. 4, p. 477-490, 2009a.
- TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; AHMAD, M.D.; BOS, M.G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil, Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forestry Meteorology**, v. 149, n. 4, p. 462-476, 2009b.
- UDA, P.K; **Avaliação da evapotranspiração real da bacia do alto Rio Negro, região sul brasileira, por meio do modelo SEBAL**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental UFSC (Mestrado). Santa Catarina, 2012, 163 p.
- WANG, J., KIMURA, R.; BASTIAANSSEN, W. Monitoring ET with remote sensing and the management of water resources on a basin scale, 11th CEReS **International Symposium on Remote Sensing**, Chiba, Japan, p. 545-556, 2005.