

Variabilidade espaço-temporal de parâmetros biofísicos e da evapotranspiração por sensoriamento remoto em região semiárida

Space-temporal variability of biophysical parameters and evapotranspiration by remote sensing in semi-arid region

Resumo:

Água é um elemento essencial para existência de vida, deste modo conhecer o comportamento é fundamental para gerenciar a sustentabilidade dos recursos naturais. Objetivou-se avaliar a variabilidade dos parâmetros biofísicos do balanço de energia à superfície, principalmente a evapotranspiração real diária, na região semiárida por sensoriamento remoto, utilizando uma imagem do satélite Landsat 8 OLI/TIRS (imageamento do dia: 24/08/2015). A área de estudo se localiza no Estado do Ceará, município de Iguatu. Utilizou-se o Software ERDAS IMAGINE® 9.1 para o processamento da imagem com o algoritmo SEBAL. Os mapas temáticos gerados foram: saldo de radiação (R_n), fluxos de calor no solo (G), sensível (H) e latente (LE), e também, evapotranspiração real diária (ET_r), processados com o Software ArcGIS® 10.2.2. Estatística descritiva foi aplicada para observar as diferenças dos parâmetros do balanço de energia. LE apresentou maior desvio-padrão (103,30) em torno da média. G teve a menor variabilidade conforme indicou o CV (0,04). Os parâmetros biofísicos do balanço de energia apresentaram diferentes respostas nos distintos usos do solo, possibilitando observar diferentes tipos de cobertura do solo, tanto quantitativamente como espacialmente. A determinação da ET_r demonstrou sensibilidade aos diferentes usos do solo, permitindo identificar padrões para áreas de corpos hídricos, irrigadas, solo exposto e áreas impermeabilizadas.

Abstract:

Water is an essential element for the existence of life, so it is important to know the behavior to manage the sustainability of natural resources. The objective of this study was to evaluate the variability of the biophysical parameters of the surface energy balance, mainly the daily real evapotranspiration, in the semi-arid region by remote sensing, using an image of Landsat 8 OLI / TIRS satellite (Image of the day: 08/24/2015). The area is located in the State of Ceara, town of Iguatu. The ERDAS IMAGINE® 9.1 Software used for image processing with the SEBAL algorithm. Thematic maps were generated: balance radiation (R_n), heat flows in the ground (G), sensitive (H) and latent (LE), and daily evapotranspiration (ET_r), processed with ArcGIS® Software 10.2.2. Descriptive statistics applied to observe the differences in energy balance parameters. The LE flow presented the highest standard deviation (103.30) around the mean and the G had the lowest variability as indicated by CV (0.04). The biophysical parameters of the energy balance presented variable responses in the different uses of the soil, making it possible to observe different types of soil cover both quantitatively and spatially. The determination of ET_r demonstrated sensitivity to different soil uses, allowing the identification of patterns for areas of water bodies, irrigated, exposed soil and waterproofed areas.



Jhon Lennon Bezerra da Silva¹, Alan César Bezerra², José Diorgenes Alves Oliveira³, Frederico Abraão Costa Lins⁴, Pedro Francisco Sanguino Ortiz⁵, Geber Barbosa de Albuquerque Moura⁶

¹ Mestre em Engenharia Agrícola e Doutorando – Departamento de Engenharia Agrícola PGEA/UFRPE. Av. D. Manoel de Medeiros, SN; Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil; CEP: 52171-900. E-mail: jhonlennoigt@hotmail.com (Autor para correspondência); ² Mestre em Engenharia Agrícola; Professor assistente da Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Serra Talhada – UAST/UFRPE, Serra Talhada, Pernambuco, Brasil. E-mail: cezaralan.a@gmail.com; ³ Mestre em Engenharia Agrícola e Doutorando – Departamento de Engenharia Agrícola PGEA/UFRPE, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: josediorgenes@gmail.com; ⁴ Mestrando em Engenharia Agrícola – Departamento de Engenharia Agrícola PGEA/UFRPE. Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: frederico_acl@hotmail.com; ⁵ Doutorando em Engenharia Agrícola – Departamento de Engenharia Agrícola PGEA/UFRPE, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: francisko369@gmail.com; ⁶ Doutor em Oceanografia; Professor associado da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: geber@depa.ufrpe.br.

Contato principal

Jhon Lennon Bezerra da Silva¹



Palavras chave: geoprocessamento, geotecnologias, balanço de energia, semiárido brasileiro, alterações ambientais

Keywords: geoprocessing, geotechnologies, energy balance, Brazil semiarid, environmental changes



INTRODUÇÃO

Água é condição essencial para existência de vida e à medida em que cresce a demanda de recursos hídricos no mundo, diminui a probabilidade do fornecimento de água doce (LOPES et al., 2014). Isso se deve ao fato do aumento da demanda desses recursos associado com as mudanças climáticas e a modificação do uso e ocupação do solo que têm proporcionado mudanças na disponibilidade hídrica ao redor do mundo. Portanto, conhecer o comportamento desse recurso é fundamental para gerenciamento sustentável.

A água é encontrada em diversas formas físicas e, como bem afirma Oliveira et al. (2014), para um gerenciamento eficiente é preciso monitorar a dinâmica desse recurso ao longo do globo terrestre, por meio do seu ciclo hidrológico, dentro os quais destaca-se a evapotranspiração, que representa a quantidade de água transformada em vapor d'água. Para o setor agropecuário, a estimativa correta da evapotranspiração permite atender as demandas agrícolas e dimensionar corretamente os sistemas de irrigação, levando ao manejo sustentável dos recursos hídricos (ANJOS et al., 2016)

A medição dessa variável pode ser feita por medições diretas e indiretas, seja através de lisímetros, correlação vórtices turbulentos e métodos empíricos, contudo, são informações locais (LIMA et al., 2014), não permitindo extrapolar para outras áreas próximas. Nesse sentido, o uso do sensoriamento remoto tem recebido amplo destaque, devido ao fato de permitir estimar valores de evapotranspiração em larga escala com poucas informações meteorológicas e com maior periodicidade, tendo como principal vantagem o baixo custo (BASTIAANSEN et al., 1998; BASTIAANSEN, 2000; ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2012; BEZERRA et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015; SILVA et al., 2016).

Para determinação da evapotranspiração por meio do sensoriamento remoto utiliza-se de algoritmos apropriados para essa finalidade e diversos métodos já foram desenvolvidos. Existem modelos baseados no balanço de energia à superfície, no balanço hídrico, método de Penman-Monteith, empíricos etc, sendo o primeiro tipo o mais utilizado para o sensoriamento remoto (ZHANG et al., 2016). Isso é possível visto que as características biofísicas das superfícies regulam a ocorrência das trocas de radiação, energéticas e térmicas do solo, por sua vez interfere na distribuição da umidade e calor na atmosfera e solo (SILVA et al., 2016). Portanto, a determinação do balanço de energia permite estimar, entre outros, o fluxo de calor no solo, sensível e latente, que é a energia necessária para transformar a água em estado líquido ou sólido em vapor, assim, estima-se a evapotranspiração real.

Destaca-se diante da estimativa do balanço de energia com base em dados de sensoriamento remoto e dados complementares de superfície, o algoritmo SEBAL, com estudos desenvolvidos por Silva et al. (2012), Arraes; Andrade; Silva (2012) e Pacheco et al. (2014).

Além disso, é possível utilizar de diferentes sensores, cada um com características específicas de resolução espacial, radiométrica, espectral, temporal, para realização de estudos de balanço de energia e evapotranspiração, nesse quesito, destaca-se o estudo de Oliveira et al. (2015) com sensor MODIS, enquanto outros estudos, tais como da Silva et al. (2012), Arraes; Andrade; Silva (2012) e Pacheco et al. (2014) utilizaram imagens provenientes do satélite Landsat.

Durante o procedimento de determinação do balanço de energia, é possível obter outros parâmetros biofísicos que também auxiliam no gerenciamento dos recursos naturais. Entre os principais parâmetros destaca-se o albedo, Índice de Vegetação de Diferença Normalizada e temperatura à superfície. Entre os estudos que avaliaram esses parâmetros, ressalta-se o estudo desenvolvido por Bezerra et al. (2014). Assim, este estudo objetivou-se avaliar a variabilidade dos parâmetros biofísicos do balanço de energia à superfície, principalmente a evapotranspiração real diária em região semiárida por sensoriamento remoto, no nordeste brasileiro utilizando uma imagem do satélite Landsat.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O Município de Iguatu, selecionado para este estudo, está inserido na mesorregião Centro-Sul do estado do Ceará, Região Nordeste do Brasil, localizado nas coordenadas geográficas e na respectiva altitude 6° 21' 34" S e 39° 17' 55" W, 217,8 m, estando à aproximadamente 384 km da capital do Estado do Ceará, Fortaleza (IPECE, 2015). Iguatu possui 101.386 habitantes (IBGE, 2015), está na lista dos 299 municípios mais populosos do Brasil e entre os nove mais populosos do Ceará. Possui o décimo PIB do Estado, com um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e Municipal (IDM) de 0,677 e 43,46, respectivamente, sendo que o seu IDH é o décimo do Ceará (IBGE, 2010).

Conforme classificação de Köppen, está inserido na zona climática do tipo BSw'h', clima quente e semiárido, caracterizado pela insuficiência de chuvas, com precipitação média anual de 806,5 mm e temperatura média mensal de 26 a 28 °C. O período chuvoso do Município é compreendido entre os meses de janeiro a abril, possuindo duas estações bem definidas durante todo o ano: chuvosa e seca, sendo que a estação seca pode configurar-se de 7 a 8 meses de duração, possuindo geralmente nesse período temperaturas elevadas ocorrendo forte evaporação (ARRAES et al., 2009).

Possui uma área absoluta de 1.029 km² com relevo formado por depressões sertanejas, a vegetação predominante é a Caatinga arbustiva densa e solos Aluviais, Litólicos, Podzólicos Vermelho-Amarelo e também Vertissolos (FUNCEME, 2015; IPECE, 2015).

Na Figura 1 observa-se o mapa espacial de localização da área de estudo, a partir de uma imagem em cor natural de

composição RGB-432 do satélite Landsat 8 OLI do dia 24 de agosto de 2015, destacando-se a estação meteorológica e algumas áreas irrigadas que fazem parte do município.

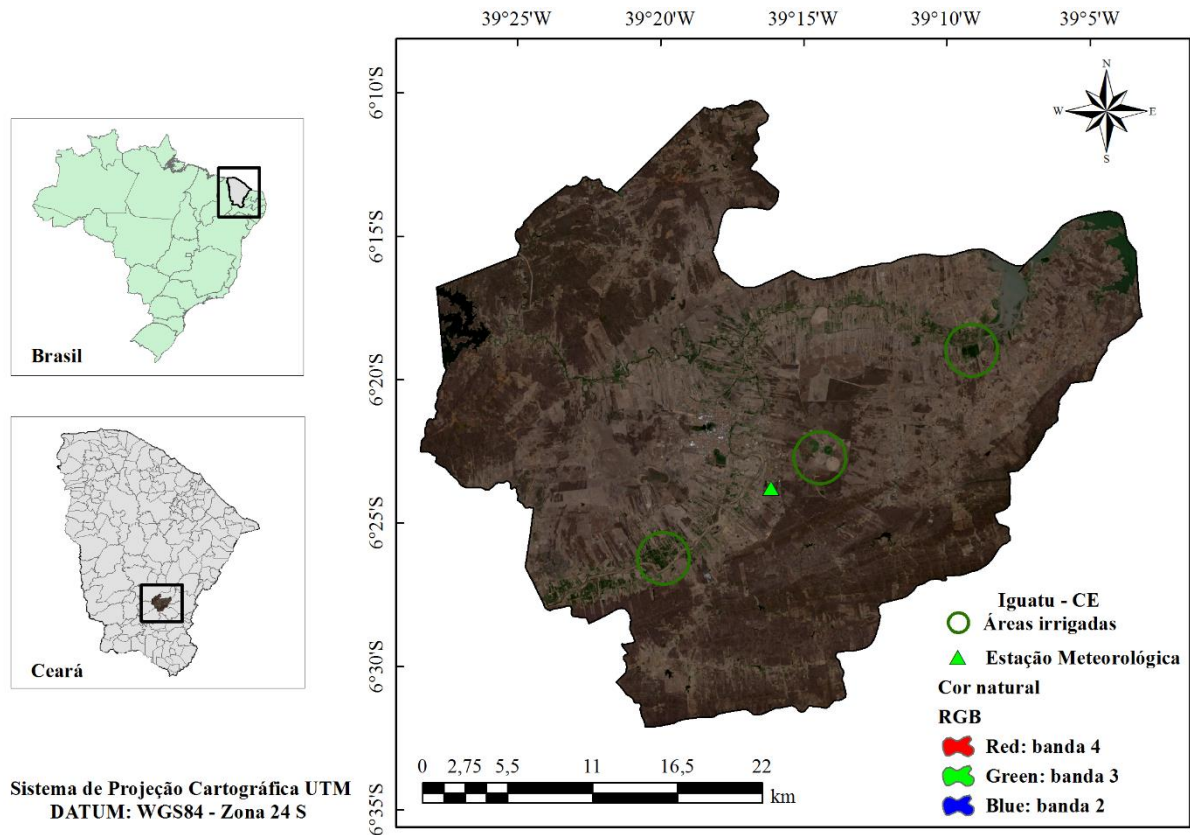


Figura 1: Mapa espacial de localização da área de estudo, município de Iguatu – CE, Brasil.

Dados meteorológicos

Através da complementação de dados meteorológicos de superfície de uma estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), realizou-se o processamento da imagem. Os dados coletados foram: temperatura média do ar instantânea (T_{ar} , °C), máxima (T_x , °C) e mínima (T_N , °C); umidade relativa do ar instantânea (UR , %), máxima (UR_x , %) e mínima (UR_N , %); pressão atmosférica do ar instantânea, máxima e mínima (P_o , kPa); velocidade do vento a 10 metros de altura (u_{10m} , $m\ s^{-1}$); radiação solar global diária média ($W\ m^{-2}$) e precipitação (mm). Esta estação situa-se no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – *Campus* Iguatu, localizando-se na região central do município, nas coordenadas geográficas $6^{\circ} 23' 47'' S$ e $39^{\circ} 16' 8'' W$ e altitude de 233 m. As coletas são realizadas a cada hora, com disponibilidade de dados meteorológicos automáticos para região em estudo entre o período de 30/05/2007 até os dias atuais.

De acordo com registros do INMET, para o ano de 2015, período seco da região (maio a dezembro), choveu no acumulado 121,6 mm, sendo que nos dois meses antecedentes (junho e julho) a data de passagem do

satélite (24/08/2015), houve precipitação pluviométrica de 5,8 mm, porém nos 20 dias antecedentes a imagem utilizada não houve registros de precipitação.

Dados orbitais

Diante dos dados meteorológicos, foi possível realizar correções e calibrações na imagem do satélite Landsat 8 de sensores OLI/TIRS. A imagem orbital foi adquirida junto ao site americano United States Geological Survey – USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Esta já se encontra ortorretificada, ou seja, as coordenadas dos seus milhares de pixels passaram por processo de correção, aproximando-se bastante das coordenadas reais da superfície.

O satélite Landsat 8 OLI/TIRS é composto por 11 bandas multiespectrais entre os comprimentos de onda 0,43-12,51 μm . As bandas utilizadas nesta pesquisa foram a 2, 3, 4, 5, 6, 7 e a 10 (banda termal) dos sensores OLI/TIRS. Possuem alta resolução espectral, que permite assegurar um maior grau de detalhamento das informações a serem geradas. O sistema de projeção cartográfica é UTM (Universal Transverse Mercator), DATUM: WGS 1984 na Zona 24 S, pela qual está inserida a área de estudo.

Assim, converteu-se a imagem de nível de cinza em

radiância espectral e refletância monocromática, assim em seguida, possibilitando determinar as componentes do balanço de energia à superfície, como o albedo (α_{sup}), índice de vegetação: NDVI, temperatura da superfície

(T_s), o saldo de radiação (R_n), os fluxos de calor no solo (G), sensível (H) e latente (LE), bem como principalmente, estimar a evapotranspiração real diária (ET_r) mediante o algoritmo SEBAL.

Tabela 2: Dados de entrada e variáveis no instante da passagem do satélite na estação meteorológica automática

Satélite Landsat	Data da Imagem	DAS	Horário (h:min.)	E (graus)	T _{ar} (° C)	UR (%)	P _o (kPa)
8 OLI/TIRS	24/08/2015	236	09:47	57,08	30,3	36	98,90

Processamento das etapas no SEBAL

Inicialmente determinou-se a radiância espectral (L_b) e a refletância monocromática, com base nos termos aditivo e multiplicativo. Convertem-se para radiância e refletância os valores quantizados e calibrados do nível de cinza de cada banda do Landsat 8 OLI, utilizando-se de coeficientes radiométricos para poder determiná-los. O processo foi conforme as respectivas equações (1 e 2) (CHANDER e MARKHAM, 2003).

$$L_b = Add_{rad\ b} + Mult_{rad\ b} \cdot ND_b \quad (1)$$

em que, L_b ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$) é a radiância espectral de cada pixel em cada banda; b (subscrito) representa cada banda do Landsat 8 OLI, $Add_{rad\ b}$ e $Mult_{rad\ b}$ são os termos aditivos e multiplicativos, relativos à radiância, respectivamente. ND_b é a intensidade de cada pixel.

$$r_b = \frac{(Add_{ref\ b} + Mult_{ref\ b} \cdot ND_b)}{\cos\theta \cdot d_r} \quad (2)$$

em que, r_b ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$) é a refletância monocromática de cada pixel em cada banda da imagem Landsat; $Add_{ref\ b}$ e $Mult_{ref\ b}$ são os termos aditivos e multiplicativos, relativos à refletância, respectivamente.; θ é o ângulo zenital solar (observado no metadados da imagem) e d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol, este foi obtido de acordo com a Equação 3 (IQBAL, 1983).

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

em que, DSA é o dia sequencial do ano e o argumento da função \cos está em radianos. O valor médio anual de d_r é geralmente igual a 1,00, variando entre 0,97 e 1,03, aproximadamente.

O albedo no topo da atmosfera (α_{toa}), a partir dos pesos de cada banda do OLI, banda 2: 0,300; banda 3: 0,277; banda 4: 0,233; banda 5: 0,143; banda 6: 0,035 e banda 7: 0,012, estes observados e propostos por Silva et al. (2016), de acordo com a Equação 4.

$$\alpha_{toa} = 0,300 \cdot r_2 + 0,277 \cdot r_3 + 0,233 \cdot r_4 + 0,143 \cdot r_5 + 0,035 \cdot r_6 + 0,012 \cdot r_7 \quad (4)$$

Assim, foi possível determinar através deste, o albedo corrigido da superfície (ALLEN et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2015; SILVA et al., 2016), de acordo com a Equação 5.

$$\alpha_{sup} = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{atm}}{\tau_{sw}^2} \quad (5)$$

em que, α_{sup} é o albedo corrigido da superfície; α_{atm} é a refletância da atmosfera (0,03), conforme vários estudos realizados no semiárido brasileiro (BASTIAANSEN, 2000; OLIVEIRA et al., 2015; SILVA et al., 2016); τ_{sw} é a transmissividade atmosférica, obtida conforme a Equação 6 (ALLEN et al., 2002; ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007; SILVA et al., 2016).

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \cdot \exp\left[\frac{-0,00146 \cdot P_o}{K_t \cdot \cos\theta} - 0,075 \left(\frac{W}{\cos\theta}\right)^{0,4}\right] \quad (6)$$

em que, P_o (kPa) é a pressão atmosférica instantânea (medida na estação meteorológica automática); K_t é o coeficiente de turbidez da atmosfera ($K_t = 1,0$) proposto por Allen et al. (2002), para dia de céu claro e limpo, conforme observado em vários estudos no semiárido brasileiro (ARRAES; ANDRADE; SILVA, 2012; SILVA et al., 2016); W (mm) é a água precipitável (determinada em função da umidade relativa do ar instantânea, esta que foi medida na estação meteorológica automática) (GARRISON e ADLER 1990).

Diante desses parâmetros anteriores, em seguida, possibilitou determinar os índices de vegetação. Estes necessários ao cômputo do saldo de radiação à superfície. Obteve-se o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) através da razão entre a diferença das refletâncias do infravermelho próximo ($r_{b\ IV}$) e do vermelho ($r_{b\ V}$) pela soma destas, de acordo com a Equação 7 (ALLEN et al., 2002; ARRAES; ANDRADE; SILVA, 2012; OLIVEIRA et al., 2015).

$$NDVI = \frac{r_{b\ IV} - r_{b\ V}}{r_{b\ IV} + r_{b\ V}} \quad (7)$$

em que, r_{bIV} e r_{bV} , correspondem às bandas refletivas 5 e 4 do satélite Landsat 8 OLI, respectivamente.

Em seguida, determinou-se os índices de vegetação SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) e IAF (Índice de área foliar, $m^2 m^{-2}$) de acordo com as Equações 8 e 9 (ALLEN et al., 2002; ALLEN et al., 2007),

$$SAVI = \frac{(1+L) \cdot (r_{bIV} - r_{bV})}{(L + r_{bIV} + r_{bV})} \quad (8)$$

em que, L é a constante de ajuste ao solo (valor de 0,1) conforme pesquisa realizada por Allen; Tasumi; Trezza, 2007.

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (9)$$

A determinação do IAF permitiu-se obter as emissividades no domínio espectral da banda termal (ϵ_{NB}) e no domínio da banda larga (ϵ_0), conforme as Equações 10 e 11.

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \cdot IAF \quad (10)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot IAF \quad (11)$$

Para pixels com valores de $IAF \geq 3$, $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$. Já para $NDVI < 0$, $\epsilon_{NB} = 0,99$ e $\epsilon_0 = 0,985$ (ALLEN et al., 2002).

Estimou-se a partir da emissividade na banda termal a temperatura da superfície (T_s), em Kelvin (ALLEN et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2015), de acordo com a Equação 12.

$$T_s = \frac{K_2}{\left(\frac{\epsilon_{NB} \cdot K_1}{L_b} + 1\right)} \quad (12)$$

em que, K_1 e K_2 ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) são as constantes de calibração das bandas termais do Landsat 8 de sensor TIRS (banda termal 10, L_{b10} , $K_1 = 774,89$ e $K_2 = 1321,08$ $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$).

Assim, em seguida, também determinou-se o cômputo da radiação de onda longa emitida pela superfície ($R_{ol emit}$, $W m^{-2}$), de acordo com a Equação 13 (ALLEN et al., 2002).

$$R_{ol emit} = \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (13)$$

em que, σ é a constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$) e T_s é a temperatura da superfície (Kelvin).

Posteriormente, estimou a radiação de onda curta incidente na superfície ($R_{sol inc}$, $W m^{-2}$), em condições de

céu claro (ALLEN et al., 2002; ARRAES; ANDRADE; SILVA, 2012), em que, S é a constante solar ($1367 W m^{-2}$) (Equação 14).

$$R_{sol inc} = S \cdot \cos \theta \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \quad (14)$$

Assim, também se fez necessário determinar a radiação de onda longa incidente pela atmosfera na direção da superfície ($R_{ol atm}$, $W m^{-2}$) (ALLEN et al., 2002; BASTIAANSSEN et al., 2005), de acordo com a Equação 15.

$$R_{ol atm} = \epsilon_a \cdot \sigma \cdot T_{ar}^4 \quad (15)$$

em que, σ é a constante de Stefan-Boltzman; T_{ar} é a temperatura do ar instantânea na estação meteorológica automática, em Kelvin ($K = 273,15 + T_{ar}$) e ϵ_a é a emissividade atmosférica do ar (Equação 16), baseada no modelo de transmissividade atmosférica instantânea.

$$\epsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln \cdot \tau_{sw})^{0,09} \quad (16)$$

A estimativa de todos esses parâmetros observados anteriormente, permitiu determinar o saldo de radiação instantâneo à superfície (R_n , $W m^{-2}$), estimado com base em várias pesquisas no semiárido brasileiro (ALLEN et al., 2002; ARRAES; ANDRADE; SILVA, 2012; OLIVEIRA et al., 2015), conforme a Equação 17.

$$R_n = R_{sol inc} \cdot (1 - \alpha_{sup}) - R_{ol emit} + R_{ol atm} - (1 - \epsilon_0) \cdot R_{ol atm} \quad (17)$$

Estimou-se ainda, o saldo de radiação diário à superfície ($R_{n 24h}$, $W m^{-2}$), para condições verificadas no semiárido brasileiro (SILVA et al., 2012), Equação 18.

$$R_{n 24h} = R_{s 24h} \cdot (1 - \alpha_{sup}) - 123 \cdot \tau_{sw 24h} \quad (18)$$

em que, $R_{s 24h}$ ($W m^{-2}$) é a radiação solar média diária (medida na estação meteorológica); $\tau_{sw 24h}$ é a transmissividade atmosférica média diária.

Através da temperatura da superfície do solo, albedo da superfície e do NDVI, estimou-se o fluxo de calor no solo instantâneo (G , $W m^{-2}$) (Equação 19) empírica, desenvolvida por Bastiaanssen (2000), que representa valores próximos ao meio-dia solar (ARRAES; ANDRADE; SILVA, 2012).

$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha_{sup}} \cdot (0,0038 \cdot \alpha_{sup} + 0,0074 \cdot \alpha_{sup}^2) \cdot (1 - 0,98 \cdot NDVI^4) \right] \cdot R_n \quad (19)$$

Para correção dos valores do fluxo de calor no solo para corpos hídricos, $NDVI < 0$ admitiu-se: $G = 0,5 \cdot R_n$ (ALLEN et al., 2002).

A etapa a seguir, o fluxo de calor sensível instantâneo (H , $W m^{-2}$) é um processo considerado a parte cerne do SEBAL, que se iniciou com dados meteorológicos da estação automática, como: a velocidade do vento ($m s^{-1}$) ao nível de z (m) e a altura média da vegetação (m). Para determinação de H no SEBAL, foi necessário ter o conhecimento de dois pixels, chamados de pixels âncoras (denominados de pixel frio e pixel quente) (BASTIAANSSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2002), esse processo pode ser explorado com mais detalhes no estudo de Silva (2016) (Equação 20).

$$H = \rho \cdot c_p \cdot \frac{(a + b \cdot T_s)}{r_{ah}} \quad (20)$$

em que, ρ é a massa específica do ar ($kg m^{-3}$); c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($1004 J kg^{-1} K^{-1}$); a e b são constantes de calibração da diferença da temperatura e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ($s m^{-1}$).

Uma vez conhecidos o R_n , G e H de forma instantânea, obteve-se o fluxo de calor latente instantâneo (LE , $W m^{-2}$) conforme a Equação 21.

$$LE = R_n - G - H \quad (21)$$

Finalizando o processo de determinação do balanço de energia à superfície, além da estimativa dos parâmetros anteriormente supracitados, foi estimada a evapotranspiração real diária (ET_{r24h} , $mm dia^{-1}$), com base na fração evaporativa instantânea ($FE_{inst.}$). Esta que é aproximadamente igual a FE_{24h} (BASTIAANSSEN et al., 1998; SILVA, 2016), conforme a Equação 22.

$$FE_{inst.} = \left(\frac{LE}{R_n - G} \right) \Rightarrow FE_{24h} = \frac{LE_{24h}}{R_{n24h}} \quad (22)$$

Desta forma, permitiu-se encontrar também o fluxo de calor latente diário (LE_{24h} , $W m^{-2}$), obtido através da Equação 23.

$$LE_{24h} = FE_{inst.} \cdot R_{n24h} \quad (23)$$

Com isso, realizou-se a conversão LE_{24h} em evapotranspiração real diária (ET_{r24h} , $mm dia^{-1}$), conforme a Equação 24.

$$ET_{r24h} = \frac{86400 \cdot FE_{inst.} \cdot R_{n24h}}{2450000} \quad (24)$$

em que, os valores 86400 e 2450000, correspondem a transformação do LE em $mm dia^{-1}$.

Contudo, os parâmetros biofísicos do balanço de energia à superfície foram submetidos a estatística descritiva, com o intuito de determinar as diferenças desses parâmetros diante do clima local da região e também das ações

antrópicas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta o mapa temático do saldo de radiação instantâneo à superfície (R_n), observa-se os menores valores diante das cores em tons verdes (consequência devido encontrar-se os maiores valores de albedo e temperatura da superfície), expressando o valor mínimo de $20 W m^{-2}$, que podem ser registros de maior atividade antrópica, como por exemplo sob áreas de solo exposto da região, todavia esses valores também podem ser observados nas áreas impermeabilizadas do município, ou seja, são regiões com perda de energia solar, tanto por emissão quanto por reflexão. Os valores mais expressivos de R_n , situou-se nas cores mais escuras, como no vermelho, observados nas áreas de vegetação nativa densa e úmidas e, principalmente, nos corpos hídricos que atingiu valor máximo de R_n igual a $725 W m^{-2}$, essas são áreas que possuem menor reflexão por parte das ondas curtas, ocorre assim uma menor emissão das longas. Diante disso, esses fatos corroboram aos resultados observados por Oliveira et al. (2015), em pesquisa sobre o balanço de radiação por sensoriamento remoto em bacia hidrográfica no semiárido, encontraram valores de R_n superiores a $500 W m^{-2}$ na estação seca.

Arraes et al. (2012) investigando a dinâmica das componentes do balanço de energia no açude Orós e suas adjacências, em parte, na mesma região do presente estudo, encontraram as maiores médias de R_n na área de vegetação nativa densa, justificados pelos baixos valores de albedo em torno do açude. Os autores também observaram que as menores médias de R_n , foram na área antrópica. Estes resultados também foram semelhantes aos observados nesta pesquisa.

A Figura 3 apresenta o mapa temático do fluxo de calor no solo instantâneo (G), pode observar os menores valores diante dos pixels em cores azuis, com valor mínimo de $9 W m^{-2}$, destacando-se dessa forma as áreas irrigadas de todo o município. Já os maiores valores de G , foram observados diante dos pixels em vermelho, representados pelas áreas de vegetação nativa densa da região e também, mais expressivamente nos corpos hídricos, que atingiu valor máximo de G igual a $111 W m^{-2}$. Silva et al. (2012) em estudo no semiárido brasileiro, determinando a evapotranspiração por sensoriamento remoto, observaram de modo geral valores de G inferiores a $150 W m^{-2}$, exceto nos corpos de água, pelos quais os autores encontraram os maiores valores, corroborando com esta pesquisa, conforme observa-se o padrão de comportamento da figura a seguir. Arraes et al. (2012) investigaram que entre os usos da terra analisados, a área irrigada foi a que apresentou menores mudanças nas médias de G , sendo praticamente o mesmo dentre as imagens estudadas, com valores em torno de $55,0 W m^{-2}$, corroborando aos valores observados no presente estudo também em áreas irrigadas.

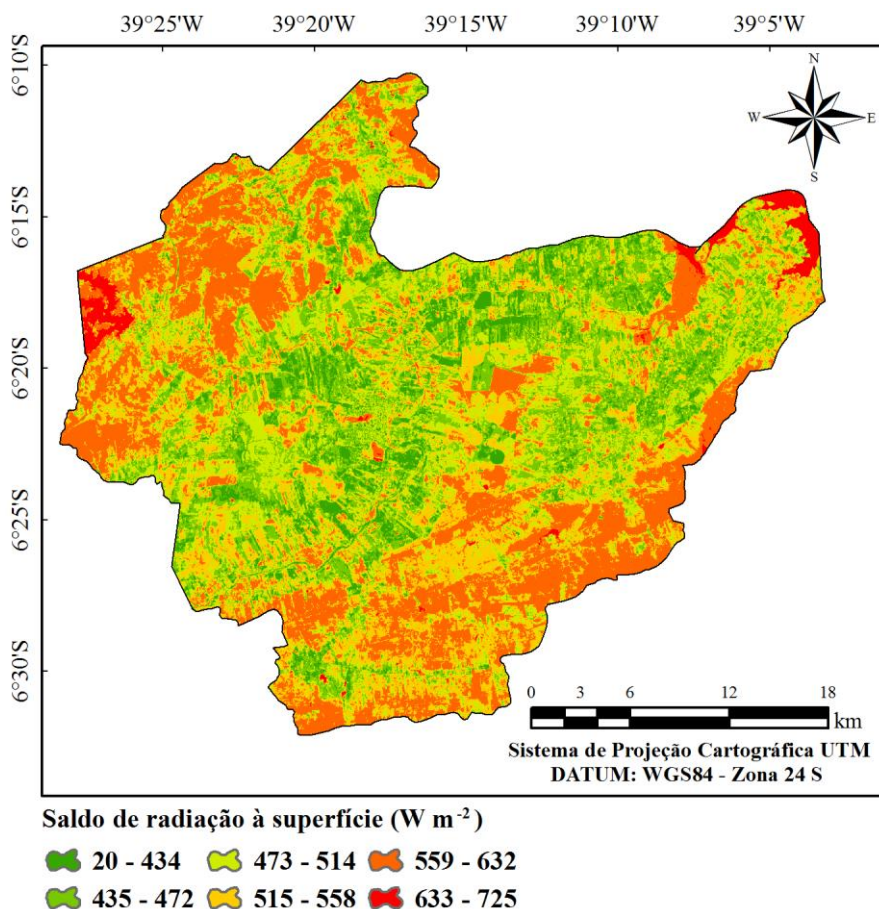


Figura 2. Mapa temático da variabilidade espaço-temporal do saldo de radiação instantâneo à superfície (R_n) no município de Iguatu – CE.

Observa-se na representação da Figura 4, o mapa temático do fluxo de calor sensível (H), as áreas da imagem estudada apresentaram menores valores de H diante das áreas irrigadas, sobretudo nos corpos hídricos e nas áreas mais densas e úmidas da região, estes observados nos pixels em tons azulados, com valor mínimo de H de $0,06 W m^{-2}$. Os maiores valores de H foram observados diante das áreas em tons em vermelho, chegando ao valor máximo de $385 W m^{-2}$. São áreas representadas por solo exposto, com pouco vegetação e também em áreas impermeabilizadas e são motivadas por ações antrópicas. Estes resultados são semelhantes ao estudo de Arraes et al. (2012), que também observaram os maiores valores de H em área antrópica, e justificaram que estes valores são consequência da ausência da cobertura vegetal na determinada área, fazendo com que assim grande parte do R_n seja empregado no aquecimento do ar e do solo, motivado principalmente pela redução do processo de evapotranspiração.

A Figura 5, destaca o mapa temático do fluxo de calor latente (LE), com expressividades nos valores diante das áreas bem vegetadas (densas) e, principalmente nos corpos hídricos, atingindo valor máximo de $632 W m^{-2}$. Arraes et al. (2012) observaram uma elevação do fluxo de calor latente mediante o aumento do teor de umidade no

solo, devido ao maior período chuvoso.

A Figura 6 apresenta o mapa temático da evapotranspiração real diária (ET_r), as áreas de corpos hídricos e áreas de vegetação densa e úmida, observados através dos pixels de cores azuis possuem os valores mais expressivos, chegando a atingir valor máximo de $4,5 mm dia^{-1}$. Todavia cabe ressaltar que para superfície líquida acontece o processo da evaporação. Nas áreas de solo exposto, ou com pouco vegetação e também nas áreas impermeabilizadas observaram os menores valores de ET_r , representados no mapa pelas tonalidades em vermelho e amarelo. Pacheco et al. (2014) analisando o comportamento espaço-temporal do balanço de energia e da evapotranspiração real diária na área de preservação ambiental da Ilha de Santa Rita, em Alagoas, constataram diferenças evidentes entre as classes em zona rural e área urbana e concluíram que essa abordagem utilizada foi muito adequada para uma exploração real de dados de satélite, devido ter sido útil para estimar o número de parâmetros na contínua relação solo-planta-atmosfera. Os autores observaram valores sobre os corpos de água, lagoas e oceano Atlântico próximos de $6 mm dia^{-1}$.

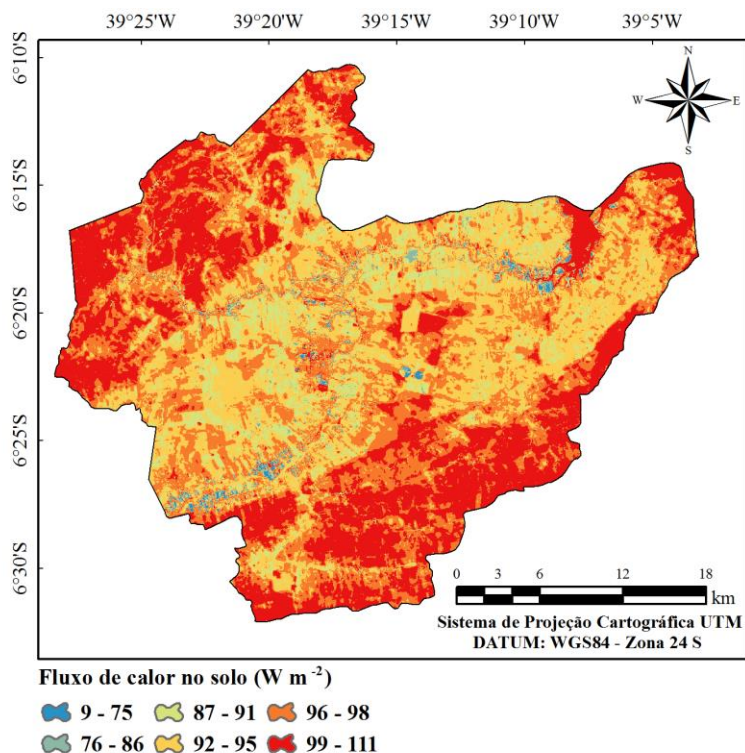


Figura 3. Mapa temático da variabilidade espaço-temporal do fluxo de calor no solo instantâneo (G) no município de Iguatu – CE.

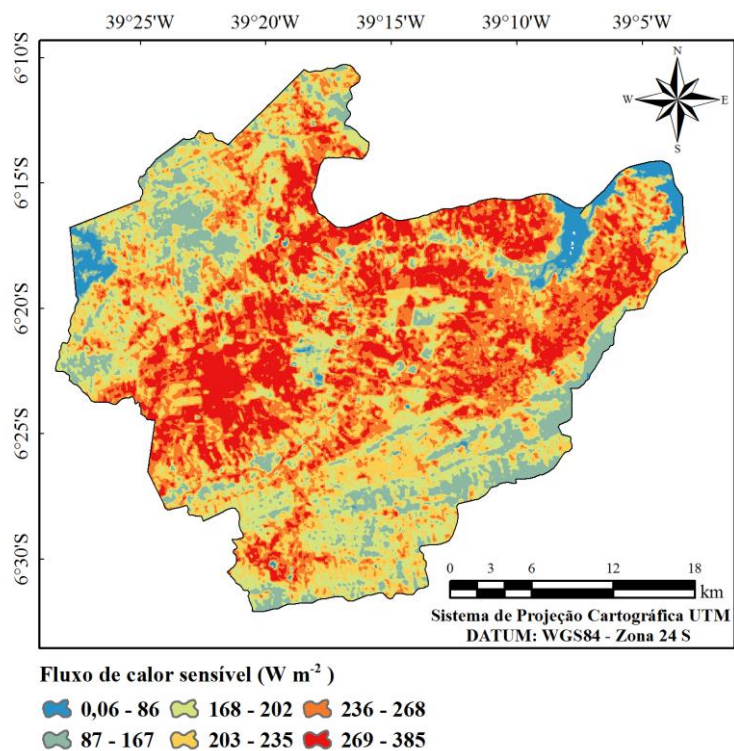


Figura 4. Mapa temático da variabilidade espaço-temporal do fluxo de calor sensível instantâneo (H) no município de Iguatu – CE.

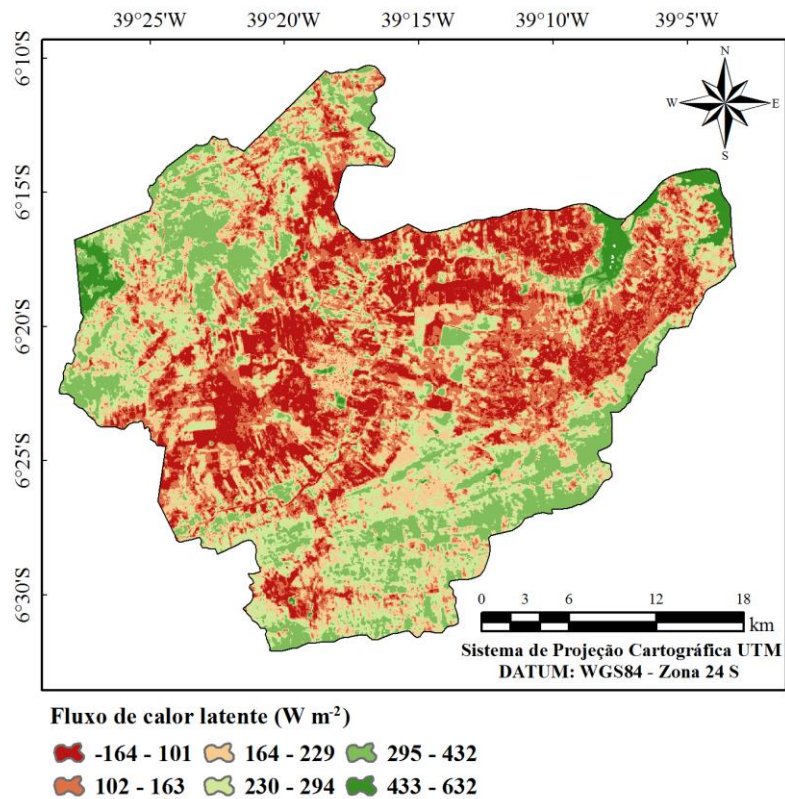


Figura 5. Mapa temático da variabilidade espaço-temporal do fluxo de calor latente instantâneo (LE) no município de Iguatu – CE.

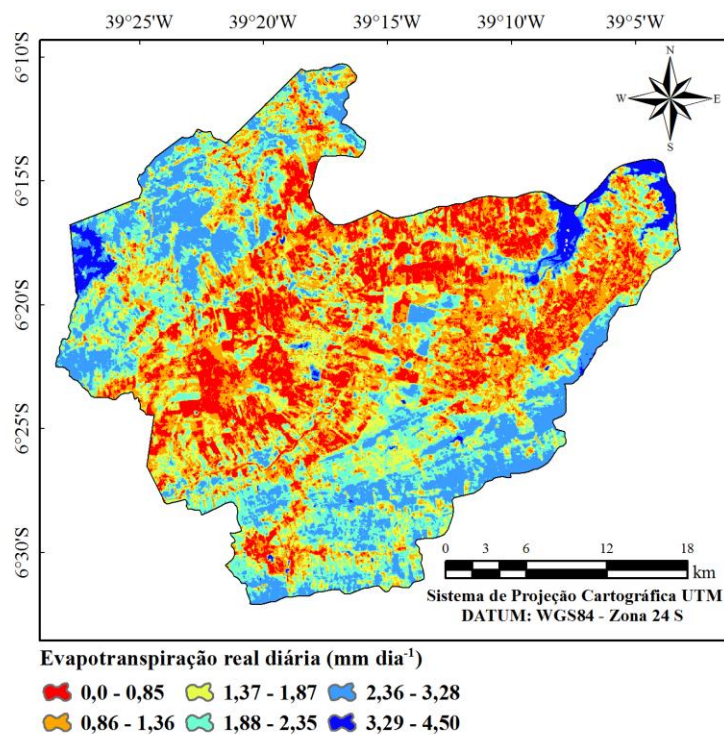


Figura 6. Mapa temático da variabilidade espaço-temporal da evapotranspiração real diária (ET_r) no município de Iguatu – CE.

Tabela 2. Análise estatística da variabilidade espaço-temporal dos parâmetros biofísicos do balanço de energia à superfície e da evapotranspiração real diária estimada pelo SEBAL.

Satélite Landsat	Data da imagem	Saldo de radiação à superfície (R_n , $W m^{-2}$)						
		Mín.	Máx.	Médio	Mediano	Moda	DP	CV
8 OLI/TIRS	14/11/2015	20	725	515,08	515,66	574,72	57,86	0,11
		Fluxo de calor no solo (G , $W m^{-2}$)						
		9	111	95,81	96,75	99,94	4,39	0,04
		Fluxo de calor sensível (H , $W m^{-2}$)						
		0,06	385	219,35	219,55	221,17	54,15	0,25
		Fluxo de calor latente (LE , $W m^{-2}$)						
		-164	632	198,86	199,03	109,98	103,30	0,52
Evapotranspiração real diária (ET_r , $mm dia^{-1}$)								
0,0	4,5	1,62	1,73	2,39	0,77	0,47		

A Tabela 2 apresenta os valores estatísticos dos parâmetros biofísicos do balanço de energia e da evapotranspiração real diária pelo SEBAL. O LE quando comparado com os demais parâmetros apresentou maior desvio-padrão em torno da média, fato relacionado com sua variação natural, devido as características espectrais dos diferentes alvos da região. O G foi quem apresentou menor variabilidade conforme indica o valor de CV, retratando-se de forma mais homogênea em relação aos demais parâmetros. Todavia, observa-se que diante dos maiores valores de CV, tanto LE como a ET_r foram mais heterogêneas.

De modo geral, os resultados encontrados são similares com a literatura que se utilizaram da mesma metodologia. Os padrões de comportamento espectral são típicos de alvos que integram os diferentes usos e ocupações do solo na área de estudo. Desta forma, a análise possibilitou o monitoramento espaço-temporal do município, podendo atuar diante de tais parâmetros, especialmente da evapotranspiração, na gestão e na tomada de decisões nos diversos setores que envolvem o meio ambiente na região.

CONCLUSÕES

Os parâmetros biofísicos do balanço de energia apresentam diferentes respostas para os distintas usos e ocupações do solo, possibilitando observar tanto quantitativamente como espacialmente os diferentes tipos de cobertura do solo.

A determinação da ET_r identificou resultados consistentes aos observados em estudos no Brasil, especialmente em região semiárida, demonstrando sensibilidade aos diferentes usos do solo, possibilitando identificar padrões que diferenciam áreas de corpos hídricos, irrigadas, solo exposto e áreas impermeabilizadas, contudo sendo eficaz diante da falta de dados de medições diretas.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e

ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEA); à CAPES pela concessão das bolsas de Mestrado e Doutorado; ao INMET pelo fornecimento dos dados meteorológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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*, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). *Advance Training and Users Manual – Idaho Implementation*, v.1, p. 97, 2002.

ANJOS, A. W.; DELGADO, R. C.; LYRA, G. B.; SOUZA, L. P.; SUHETT, E. R. Evapotranspiração a partir de produtos orbitais para o estado do Rio de Janeiro. *IRRIGA*, v. 1, n. 01, p. 126-140, 2016.

ARRAES, F. D. D.; ANDRADE, E. M.; SILVA, B. B. Dinâmica do balanço de energia sobre o açude Orós e suas adjacências. *Revista Caatinga*, v. 25, n. 1, p. 119-127, 2012.

ARRAES, F. D. D.; LOPES, F. B.; SOUZA, F. D.; OLIVEIRA, J. D. Estimativa do balanço hídrico para as condições climáticas Iguatu, Ceará, usando modelo estocástico. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 3, p. 78-87, 2009.

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.; NOORDMAN, E. J. M.;

- PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 131, n. 1, p. 85-93, 2005.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J.F.; ROERINK, G.J.; VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. *Journal of hydrology*, v. 212-213, p. 213-229, 1998.
- BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B. A.; SILVA, B. B.; LOPES, P. M. O.; SILVA, E. F. F. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 1, p. 73-84, 2014.
- CHANDER, G.; MARKHAN, B. Revised Landsat 5 - TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, v. 41, n. 11, p. 2674-2677, 2003.
- FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2015. Mapeamento dos espelhos d'água do Brasil. Fortaleza – CE.
- GARRISON, J. D.; ADLER, G. P. Estimation of precipitable water over the United States for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. *Solar Energy*, v. 44, n. 4, p. 225-241, 1990.
- GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A. Albedo da superfície por meio de imagens TM-Landsat 5 e modelo numérico do terreno. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 8, p. 833-838, 2014.
- IBGE (2010). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível on-line em: <<http://cod.ibge.gov.br/23BAX>>. Acesso em 20 de julho de 2017.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, 2015. Perfil básico municipal de 2015. Iguatu - CE.
- IQBAL, M. An introduction to solar radiation. London: Academic Press., 1983, 390 p.
- LIMA, E. P.; SEDIYAMA, G. C.; ANDRADE, R. G.; LOPES, V. D.; SILVA, B. B. Evapotranspiração real diária em sub-bacias do Paracatu, utilizando produtos do sensor Modis. *Revista Ceres*, v. 61, n. 1, 2014.
- LOPES, F. B.; BARBOSA, C. C.; NOVO, E. M. D. M.; DE ANDRADE, E. M.; CHAVES, L. C. Modelagem da qualidade das águas a partir do sensoriamento remoto hiperespectral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, Suplemento, p. S13–S19, 2014.
- OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; MOURA, A. E. S. S. Balanço de radiação por sensoriamento remoto em bacia hidrográfica da zona da mata nordestina. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, n. 1, p. 16-28, 2015.
- OLIVEIRA, L. M.; MONTENEGRO, S. M.; DA SILVA, B. B.; ANTONINO, A. C.; DE MOURA, A. E. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 10, p.1039-1046, 2014.
- PACHECO, A. P.; CERQUEIRA, M. A.; SILVA, B. B.; NICÁCIO, R. M. Análise espaço-temporal da evapotranspiração na Área de Preservação Ambiental da Ilha de Santa Rita, Alagoas, Brasil. *Revista Árvore*, v. 38, n. 3, p. 453-460, 2014.
- SILVA, B. B. D.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M.; MONTENEGRO, S. M.; BARBOSA JUNIOR, B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, n. 1, p. 3-8, 2016.
- SILVA, J. L. B. Monitoramento espaço-temporal da cobertura vegetal do bioma Caatinga no Ceará mediante imagens orbitais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife – PE, 2016. 117 f.
- SILVA, J. M. O. Uso do sensoriamento remoto para a estimativa da temperatura de superfície na microbacia do rio granjeiro, Crato, Ceará. *GEOSABERES-Revista de Estudos Geoeducacionais*, v. 6, n. 2, p. 130-144, 2015.
- ZHANG, K.; KIMBALL, J. S.; RUNNING, S. W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v. 3, n. 6, p. 834-853, 2016.