

## Avaliação do método SEBAL para estimativa da evapotranspiração real diária no semiárido brasileiro

### RESUMO

A estimativa da evapotranspiração real diária (ET<sub>r</sub>) é essencial ao gerenciamento e monitoramento de bacias hidrográficas, principalmente em regiões semiáridas, onde a escassez hídrica é crítica e ocorre maior necessidade de racionalização do uso das águas. Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar o algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) na estimativa da evapotranspiração real diária de uma região semiárida em comparação ao método padrão de Penman-Monteith adotado pela Food and Agriculture Organization (FAO). A ET<sub>r</sub> foi estimada a partir da densidade do fluxo de calor latente, obtida como resíduo do balanço de energia pelo SEBAL, que inclui em sua implementação calibração radiométrica, cômputo da reflectância e de variáveis biofísicas, balanço de radiação e processos iterativos para obtenção do calor sensível. O algoritmo foi aplicado a cinco imagens TM/Landsat-5, ponto 215, órbita 64, com área de estudo que compreende o entorno do Reservatório Dourado, município de Currais Novos, Rio Grande do Norte. Os maiores valores de ET<sub>r</sub> foram obtidos para a imagem de 2008, com média de 3,95 mm/dia, devido a maior disponibilidade hídrica e, conseqüentemente, ao desenvolvimento de biomassa verde da vegetação de Caatinga. A validação não foi aceitável para as cinco imagens analisadas, mas os valores estimados pelo SEBAL foram coerentes com a literatura, e a variação temporal foi dentro do esperado diante dos dados medidos em estação meteorológica convencional.

**PALAVRAS-CHAVE:** Balanço de energia. Evapotranspiração. Sensoriamento remoto.

Hélio Nogueira Bezerra  
[helionogueirab@gmail.com](mailto:helionogueirab@gmail.com)  
Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia do Rio  
Grande do Norte, campus  
Mossoró

Joel Medeiros Bezerra  
[joel.medeiros@ufersa.edu.br](mailto:joel.medeiros@ufersa.edu.br)  
Universidade Federal Rural do  
Semi-Árido - Ufersa/ Centro  
Multidisciplinar de Pau dos  
Ferros

Alana Ticiane Alves do Rêgo  
[alana\\_ticiane10@hotmail.com](mailto:alana_ticiane10@hotmail.com)  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciências Naturais (PPGCN -  
UERN).

## INTRODUÇÃO

Nas regiões semiáridas do Nordeste brasileiro, além de baixas médias de precipitação pluviométricas, que se distribuem de forma irregular em escala temporal e espacial durante o ano, a evapotranspiração (ET) também é motivo de preocupação, visto que representa grande parte da demanda do volume de água armazenada nessas regiões, devido à alta taxa de radiação solar incidente (Mattos et al., 2013; Jesus et al., 2014).

Segundo Dingman (2002), a evapotranspiração é um dos mais importantes fatores mediadores do clima e do tempo, tanto em escala global quanto local, consistindo da ligação entre energia, clima e hidrologia, influenciando diretamente a disponibilidade hídrica na superfície da Terra. Nessas condições, a evapotranspiração configura-se como uma variável imprescindível no monitoramento dos recursos hídricos e no desenvolvimento de pesquisas que visem a formulação de modelos que gerem sua estimativa de forma eficiente e precisa.

A utilização de dados de sensoriamento remoto na estimativa da evapotranspiração real tem sido estudada e tem demonstrado resultados relevantes para aplicação em modelagens meteorológicas e hidrológicas, tendo em vista que podem ser usados em áreas com grandes dimensões e heterogeneidade (Lima, 2013) e implementados de forma econômica e eficaz, ao contrário dos métodos micrometeorológicos, que se limitam a estimativas locais e pontuais.

Dentre os métodos que utilizam o sensoriamento remoto como meio para estimar a evapotranspiração, o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) ou Algoritmo para o Balanço de Energia de Superfície da Terra, vem se destacando por utilizar imagens de satélite, pela baixa exigência de dados de superfície, por proporcionar o balanço de energia à superfície de maneira efetiva e econômica, por possibilitar uma grande cobertura espacial e apresentar alta resolução espacial, que depende do sensor orbital utilizado como fonte de dados.

A evapotranspiração regionalmente espacializada é determinada pelo SEBAL a partir da quantificação da densidade de fluxo de calor latente, que é considerado como resíduo da equação do balanço de energia. Esse procedimento pode ser aplicado aos dados radiométricos de qualquer sensor orbital que efetue medidas da radiação no visível, infravermelho próximo e infravermelho termal (Machado et al., 2014). A estimativa da evapotranspiração regionalmente espacializada é essencial ao gerenciamento e monitoramento de bacias hidrográficas (Paula, 2018), principalmente em regiões semiáridas, onde a escassez hídrica é crítica e ocorre maior necessidade de racionalização do uso das águas, com base na realidade hidroclimática local.

O SEBAL ainda apresenta uma vasta aplicabilidade como ferramenta para suporte em sistemas agrometeorológicos, climatológicos e hidrológicos, obtendo-se valores de ET considerados consistentes quando comparados a dados obtidos em campo (Bastiaanssen et al., 1998). Dessa forma, a implementação desse algoritmo na gestão de recursos hídricos quantifica as perdas reais de água de uma bacia com alta variabilidade espacial e temporal, fornecendo condições iniciais e de contorno para a modelagem hidrológica e possibilitado uma gestão mais eficiente de uma bacia hidrográfica.

Dentro dessa perspectiva, diversos autores têm aplicado e validado esse método em diferentes áreas do semiárido brasileiro como em Silva et al. (2011), Arraes et al. (2012), Dantas et al. (2015) e Felix & Paz (2016). Entretanto, estudos dessa natureza ainda são carentes na microrregião do Seridó do estado do Rio Grande do Norte e tornam-se necessários, visto que, segundo Pereira Neto (2016) são áreas que apresentam uma alta susceptibilidade aos processos de desertificação relacionados com a ação da mudança climática e com as atividades antrópicas.

Frente ao que foi apresentado, este trabalho tem como objetivo avaliar o algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração real diária de uma região semiárida em comparação ao método padrão de Penman-Monteith adotado pela FAO (*Food and Agriculture Organization*).

## **METODOLOGIA**

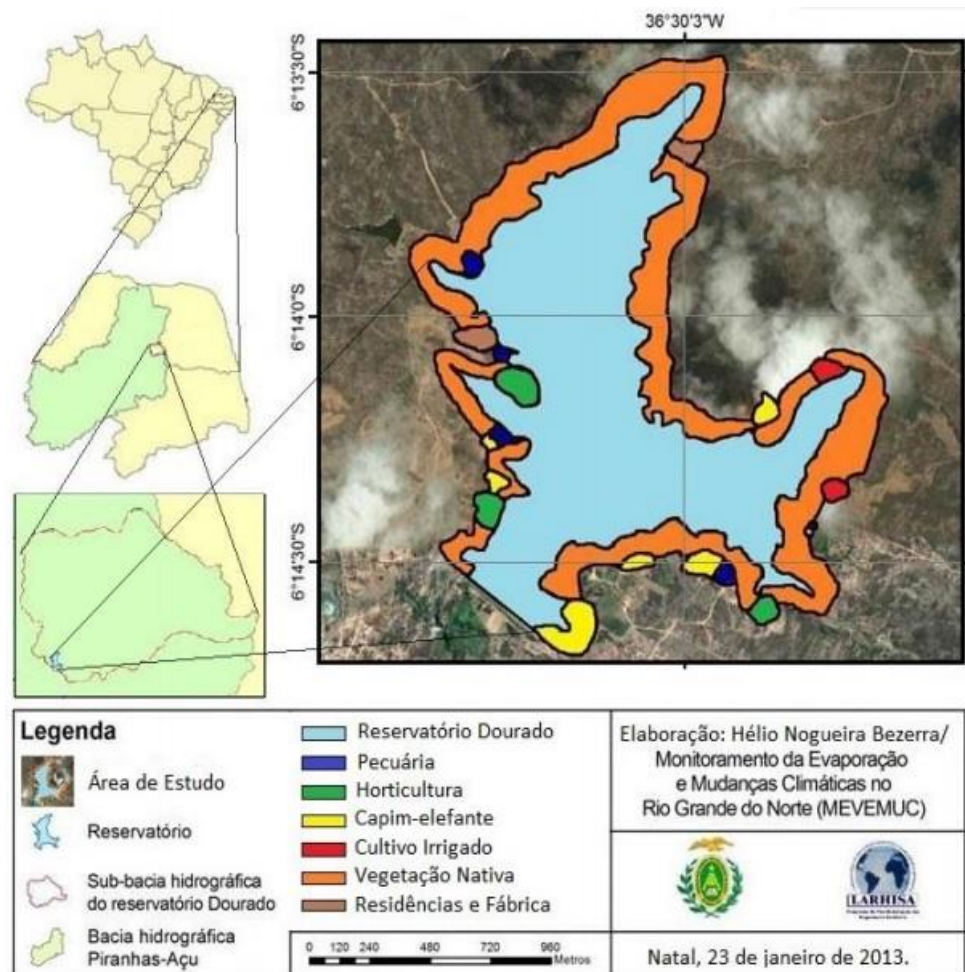
### **ÁREA DE ESTUDO**

Localizado no município de Currais Novos, na mesorregião central do estado do Rio Grande do Norte, o reservatório Dourado é considerado uma fonte de abastecimento hídrico para a população local. Seu volume no nível máximo normal é em torno de 10.321.600,00 m<sup>3</sup> de água, com uma área superficial de 3,16 km<sup>2</sup> e profundidade máxima de 10 m.

A região do entorno do reservatório compreende a área de interesse do estudo, o que possibilitará a melhor compreensão da demanda hídrica por evapotranspiração dessa localidade, já que é onde estão inseridos os principais cultivos irrigados, que apesar de figurarem em grande heterogeneidade e pequenos portes, apresentam uma demanda de água significativa no balanço hídrico desse reservatório.

A Figura 1 apresenta a área de interesse do estudo e a hidrografia local, mostrando tanto os rios perenes como os intermitentes e efêmeros, que se caracterizam por existir, com água, apenas no período chuvoso, secando em tempo de estiagem devido à infiltração e à alta demanda evaporativa do ar.

Figura 1: Mapa de localização da área de estudos com a hidrografia local.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2013.

O clima da microrregião Seridó encontra-se inserida em uma localidade semiárida, com regime pluviométrico bastante irregular e elevada taxa de evapotranspiração nos meses de verão, o que contribui para a formação de rios temporários e pouca retenção de água no solo, dificultando a produção agrícola e a vida da população local (Jesus et al., 2014).

### DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados de superfície (Tabela 1), necessários para a estimativa da evapotranspiração pelo SEBAL, foram obtidos junto a Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), que possui uma estação meteorológica no município de Cruzeta/RN, local mais próximo da área de estudo (menos de 40 km de distância), que possui dados para as datas das imagens utilizadas.

Tabela 1: Valores médios diário das variáveis meteorológicas medidas na estação meteorológica da EMPARN, Cruzeta/RN.

Imagens/Dados Meteorológicos	13 julho 2005	19 julho 2007	19 junho 2008	8 julho 2009	9 junho 2010
Umidade Relativa (%)	51,25	48,50	62,00	66,25	67,00
Temp. Mínima (°C)	19,90	20,80	19,30	19,90	21,40
Temp. Média (°C)	25,84	26,70	22,84	24,20	25,80
Temp. Máxima (°C)	32,10	33,60	21,80	30,70	32,10
Vel. do Vento (m/s)	4,63	3,33	2,33	3,33	3,40
Radiação Global (W/m <sup>2</sup> )	283,95	279,18	278,10	266,48	281,25
Precipitação (mm)	0,00	0,00	0,00	1,20	0,00

Fonte: Elaborado pelos autores, 2013.

As imagens foram obtidas no catálogo de imagens do TM/Landsat-5 disponível no site do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) e do *United States Geological Survey* (USGS), ambas com resolução espacial de pixels de 30x30 m.

A seleção das imagens foi realizada considerando a cobertura espacial da bacia do açude Dourado, a distribuição temporal que permita estudar diferentes períodos, e ainda a possibilidade de haver o mínimo ou, de preferência, nenhuma cobertura de nuvens sobre a área de estudo, pois uma fina camada de nuvens pode alterar as leituras da banda térmica e ocasionar erros nos cálculos do fluxo do calor sensível.

Devido a questão da cobertura de nuvem sobre a área de estudo no momento do imageamento, foram selecionadas apenas as imagens listadas na Tabela 2, já que a região propicia uma grande formação de nuvens orográficas devido ao seu relevo de elevados planaltos.

Tabela 2: Data das imagens TM/Landsat-5 selecionadas e seus respectivos dados de: hora de imageamento; ângulo de elevação do sol; e dia sequencial do ano.

Data da imagem	13 julho 2005	19 julho 2007	19 junho 2008	08 julho 2009	09 junho 2010
Hora (GMT*)	12:22:35	12:28:27	12:22:24	12:23:34	12:25:30
Elevação do Sol (graus)	48,3959	49,9648	48,167	48,2933	49,4188
Dia Sequencial	194	200	171	189	160

Fonte: Elaborado pelos autores, 2013.

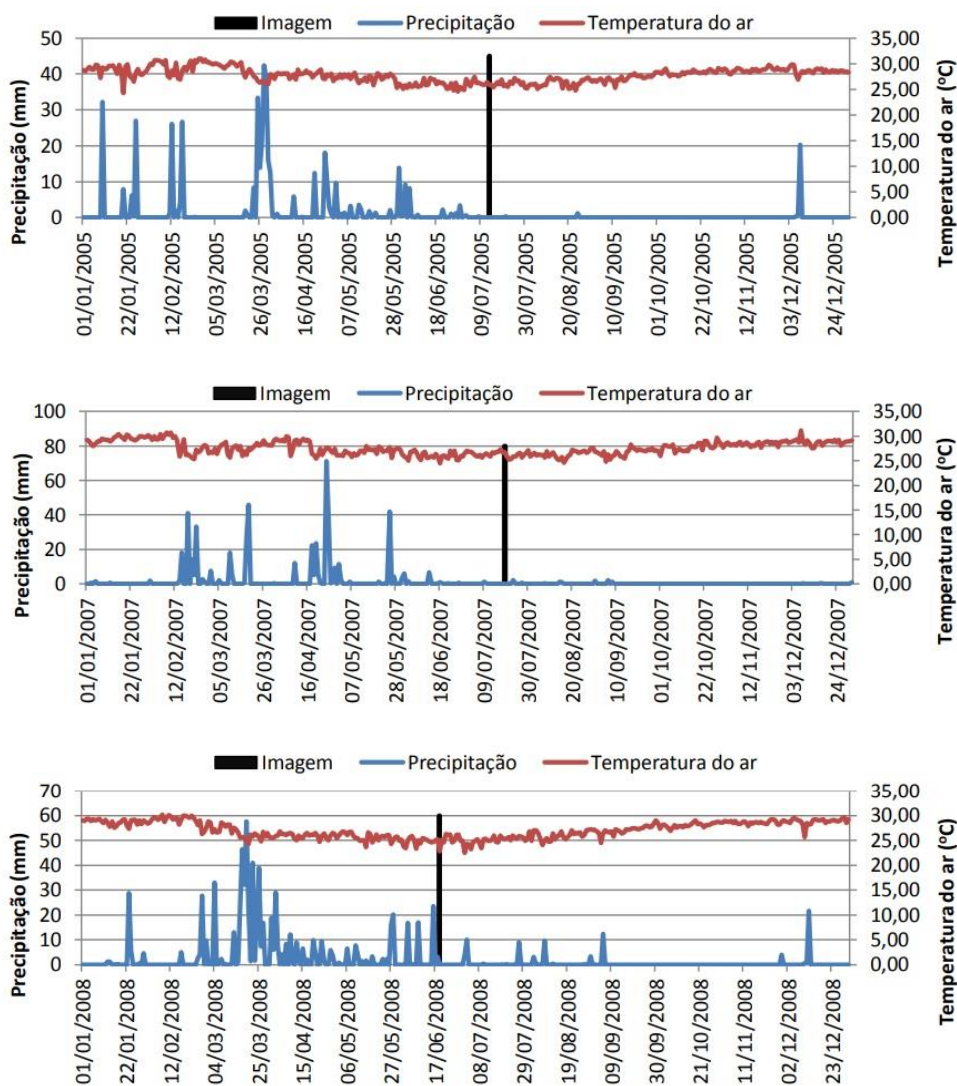
\*GMT: Greenwich Mean Time.

Para o processamento das imagens foi utilizado a ferramenta *Model Maker* do software *ERDAS Imagine*. Após a implementação do SEBAL e de posse dos mapas de evapotranspiração real diária, foi utilizado o software *ARCGIS* para elaboração dos *layouts* contendo os mapas temáticos, classificados a partir dos valores de cada pixel para a variável estudada. Estes mapas temáticos são elementos importantes para observação e compreensão da área estudada, uma vez que, retrata distintos aspectos e informações da superfície terrestre.

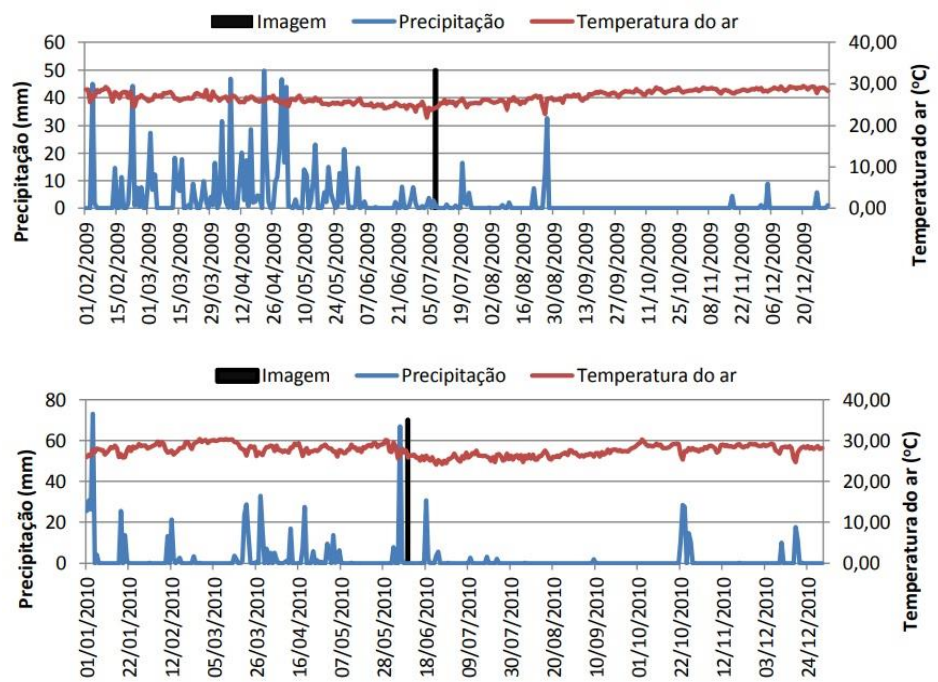
## MEDIDAS DE PRECIPITAÇÃO

Para o desenvolvimento da metodologia adotada, utilizou-se variáveis de precipitação pluvial diária e temperatura média diária do ar, a fim de avaliar a temporalidade das estimativas das variáveis biofísicas (albedo superficial e planetário, índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI, índice de vegetação ajustado ao solo – SAVI, índice de área foliar – IAF, emissividade e temperatura de superfície) analisadas pelos processamentos algorítmicos. Os dados foram coletados de 01 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2010, abrangendo o período das imagens selecionadas para a aplicação do modelo (Figura 2).

Figura 2: Distribuição temporal da precipitação diária e da temperatura média diária do ar medida em estação meteorológica convencional no município de Cruzeta/RN.







Fonte: Elaborado pelos autores, 2013.

## DETERMINAÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO

A estimativa dos componentes do balanço de radiação (radiação de onda curta incidente, albedo corrigido de cada pixel, radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel, radiação de onda longa emitida por cada pixel e emissividade de cada pixel) foi calculada conforme recomendações de Allen et al. (2002), assim como os valores dos componentes de saldo de radiação (instantâneo e diário).

Como medida de auxiliar na compreensão das variáveis presentes nos cálculos de determinação de parâmetros associados ao algoritmo SEBAL, elaborou-se a Tabela 3.

Tabela 3: Variáveis, siglas e unidades utilizadas nos cálculos de determinação de parâmetros associados ao algoritmo SEBAL.

Variável	Sigla	Unidade
Densidade de fluxo de calor sensível	H	W.m <sup>-2</sup>
Densidade de fluxo de calor latente	LE	W.m <sup>-2</sup>
Densidade de fluxo de calor no solo	G	W.m <sup>-2</sup>
Resistência aerodinâmica ao transporte de calor	rah	sm <sup>-1</sup>
Temperatura da superfície	Ts	°C
Saldo de radiação	Rn	W.m <sup>-2</sup>
Massa específica do ar	ρ	kg m <sup>-3</sup>
Calor específico do ar	cp	Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Albedo da superfície	A	Adimensional
Evapotranspiração real horária	ETH	mm.h <sup>-1</sup>
Evapotranspiração real diária	ET24H	mm.dia <sup>-1</sup>
Evapotranspiração de referência	ETO	mm.dia <sup>-1</sup>

## CÁLCULO DO FLUXO DE CALOR NO SOLO

A estimativa do fluxo de calor no solo ( $G$ ) pelo algoritmo SEBAL foi feita através de uma relação empírica proposta por Bastiaanssen (2000), que representa valores próximos ao meio dia, definido pela Equação 1.

$$G = \left[ \frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,007\alpha^2) (1 - 0,98NDVI^4) \right] R_n \quad (1)$$

Onde  $T_s$  é a temperatura da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\alpha$  é o albedo da superfície (adimensional), NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada, todos computados pixel a pixel e  $R_n$  é o saldo de radiação.

O NDVI tem uma relação direta com o vigor da vegetação, sendo assim, é possível o mapeamento de áreas com diferentes índices de cobertura vegetal e de biomassa (SILVA, 2009). Para seu cálculo foram utilizadas imagens geradas pelo sensor TM do satélite Landsat-5, com cobertura da órbita/ponto 216/64, na qual na Tabela 2 verifica-se a lista de imagens TM/Landsat-5 selecionadas também para o presente cálculo, conforme Equação 2.

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (2)$$

Onde,  $\rho_{IV}$ ,  $\rho_V$  correspondem, respectivamente, as bandas 4 e 3 do sensor TM/Landsat 5.

Para efeito de correção dos valores do fluxo de calor no solo para corpos de água ( $NDVI < 0$ ), foi utilizada a seguinte expressão:  $G = 0,5 \times R_n$ , proposto por Allen *et al.* (2002).

## CÔMPUTO DO FLUXO DE CALOR SENSÍVEL

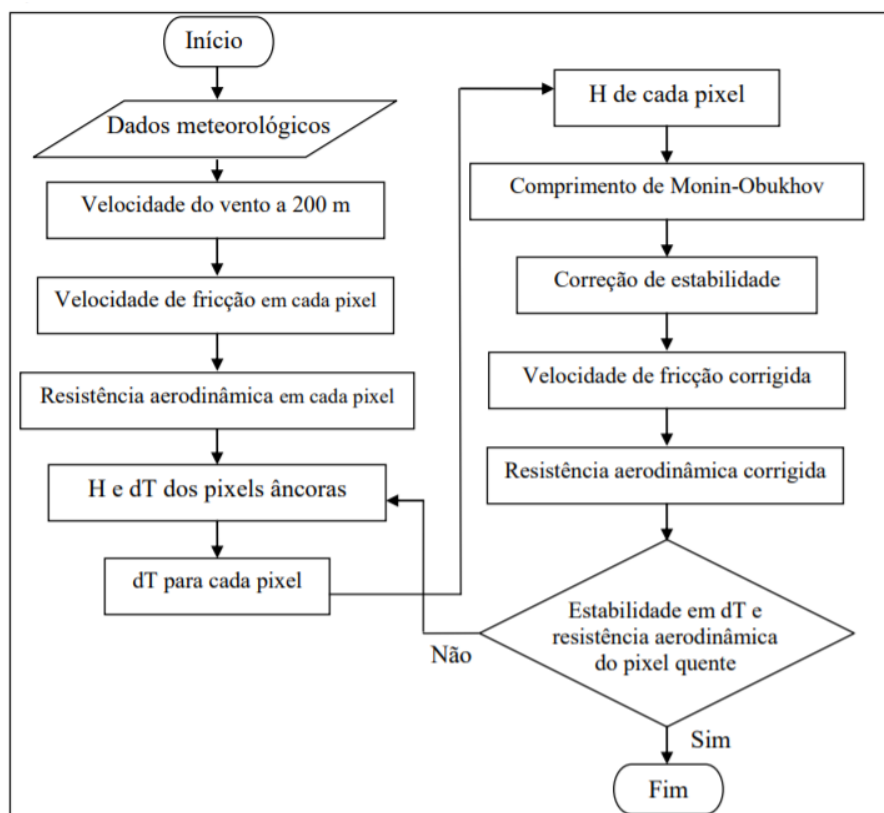
O cálculo da densidade de fluxo de calor sensível ( $H$ ) é considerado o cerne do SEBAL, e foi obtido com base na teoria da similaridade de Monin-Obukhov através de um processo iterativo levando em consideração as condições de estabilidade atmosférica. O mesmo foi calculado em função da diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura do ar a 2m ( $dT$ ) e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $r_{ah}$ ), que é computada inicialmente levando em consideração a estabilidade neutra e a constante de von Karman ( $k=0,41$ ).

Antes de iniciar o processo iterativo, foi atribuído um valor médio de dois metros para a altura do dossel da vegetação da área de estudo. Esse valor foi adotado devido a presença predominante do cultivo de capim-elefante no entorno do reservatório, e de cultivos irrigados como milho e acerola, associado ao fato de a região também ser arbórea, apresentando vegetação de porte mais elevado. Este valor da altura da vegetação foi aplicado para a estimativa do coeficiente de rugosidade ( $z_{0m}$ ), necessário na prévia do processo iterativo, para o cômputo da velocidade do vento a 200 m e velocidade de fricção do vento em cada pixel.



Para efetuar o processo iterativo de obtenção de H, esquematizado na Figura 3, o SEBAL parte da escolha de dois “pixels âncoras” na cena estudada, os quais são denominados como pixel “frio” e “quente”, respectivamente, que servem para definir uma relação linear entre a temperatura da superfície ( $T_s$ ) e a diferença de temperatura ( $dT$ ), a qual poderá ser extrapolada aos demais pixels da cena. O pixel frio, para as imagens processadas, situou-se dentro do reservatório Dourado, enquanto que o pixel quente variou entre as imagens, situando-se desde locais de provável solo exposto, sem cobertura vegetal e parte da área urbana de Currais Novos/RN.

Figura 3: Esquema do processo iterativo para obtenção do fluxo de calor sensível (H) a partir do algoritmo SEBAL.



Fonte: Elaborado por Silva (2013).

O processo iterativo foi realizado com o auxílio do *Microsoft Excel*, a partir de uma planilha que efetuou as correções dos valores de  $a$  e  $b$  (constantes de calibração da diferença de temperatura –  $dT$ ) a cada iterativo. Esse método foi necessário para alimentação dos modelos do *Model Maker* para calcular a resistência aerodinâmica corrigida ( $r_{ah}$ ) e a velocidade de fricção do vento corrigida ( $u_*$ ) para cada iteração, que teve seu fim quando o erro relativo entre os valores obtidos de  $dT$  alcançou 0,1%.

Para a correção dos valores de  $r_{ah}$  e  $u_*$  são considerados os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum ( $\Psi_m$ ) e de calor ( $\Psi_h$ ), que são definidos quanto ao comprimento de Monin-Obukhov ( $L$ ), utilizado para identificar as condições de estabilidade da atmosfera através de expressão exposta na Figura 3, onde depende do módulo de campo gravitacional terrestre ( $g=9,81 \text{ ms}^{-2}$ ).

Após a calibração interna da diferença da temperatura da superfície e do ar e determinação dos valores corrigidos de velocidade de fricção e resistência aerodinâmica, o fluxo de calor sensível  $H$  ( $Wm^{-2}$ ) foi estimado com base na Equação 3, proposta por Bastiaanssen *et al.* (1998).

$$H = \rho c_p \frac{(a+bT_s)}{r_{ah}} \quad (3)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica do ar,  $c_p$  é o calor específico do ar ( $1004 Jkg^{-1}K^{-1}$ ),  $a$  e  $b$  são constantes de calibração da diferença da temperatura entre dois níveis diferentes das camadas inferiores da atmosfera  $Z_1$  e  $Z_2$ ,  $T_s$  é a temperatura da superfície ( $^{\circ}C$ ) e  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $sm^{-1}$ ).

### DEFINIÇÃO DO FLUXO DE CALOR LATENTE

O fluxo de calor latente – LE ( $Wm^{-2}$ ) – compreende o fluxo de massa para a atmosfera proveniente da evaporação mais transpiração das plantas de dada área, ao mesmo tempo em que representa a taxa de calor cedido à água da superfície (solo e/ou planta) para que a mesma evapotranspire. Uma vez conhecidos o fluxo de calor sensível para o ar ( $H$ ) e fluxo de calor sensível para o solo ( $G$ ) e o saldo de radiação ( $R_n$ ), o LE foi obtido como resíduo da equação clássica do balanço de energia à superfície (Equação 4), conforme metodologia de Allen *et al.* (2002), onde os fluxos correspondem ao instante da passagem do satélite.

$$R_n = LE + H + G \quad (4)$$

Onde  $R_n$  é o salto de radiação, LE a densidade de fluxo de calor latente,  $H$  a densidade de fluxo de calor sensível e  $G$  a densidade de fluxo de calor no solo, todos em  $W.m^{-2}$ .

### ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DIÁRIA PELO SEBAL

Para a obtenção da evapotranspiração diária, a primeira etapa foi calcular a evapotranspiração real horária  $ET_H$ , dada pela razão entre o fluxo de calor latente, LE estimado pelo Sebal, e o calor latente de vaporização da água ( $\lambda = 2,45 \times 10^6 J kg^{-1}$ ), multiplicada por 3600, que é um fator de conversão de valor instantâneo para valor horário (é o valor de conversão de segundos para horas), conforme Equação 5 (Allen *et al.*, 2002; Trezza, 2002):

$$ET_H = 3600 \frac{LE}{\lambda} \quad (5)$$

Em seguida foi calculada a fração da evapotranspiração de referência horária,  $FET_{0,H}$ , que, de acordo com Trezza (2002), é relativamente constante em todo o

período diurno (Equação 6), tal fração foi contabilizada visando minimizar a influência dos horários extremos.

$$FET_{0_H} = \frac{ET_H}{ET_{0_H}} \quad (6)$$

em que  $ET_{0_H}$  é a evapotranspiração de referência horária.

Considerando  $FET_{0_H}$  igual à fração da evapotranspiração de referência diária ( $FET_{0_{24}}$ ), tem-se a Equação 7.

$$FET_{0_H} = FET_{0_{24}} = \frac{ET_H}{ET_{0_H}} = \frac{ET_{24}}{ET_{0_{24}}} \quad (7)$$

Dessa forma, a evapotranspiração real diária foi calculada pela Equação 8, conforme Trezza (2002):

$$ET_{24H} = FET_{0_{24}} \cdot ET_{0_{24}} \quad (8)$$

A evapotranspiração de referência diária ( $ET_{0_{24}}$ ) e a evapotranspiração de referência horária ( $ET_{0_H}$ ) foram calculadas usando o método de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998), com dados da estação meteorológica convencional do INMET, situada em Cruzeta/RN (Tabela 1). A  $ET_{0_{24}}$  foi calculada pela equação de Penman-Monteith na escala de tempo diária (mm/dia), enquanto a  $ET_{0_H}$  foi calculada pela equação de Penman-Monteith na escala de tempo horária (mm/h).

Os valores de  $ET_{0_H}$  foram obtidos no intervalo de tempo que compreende o instante da passagem do satélite na área de estudo.

### CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( $ET_0$ ) PELO MÉTODO PADRÃO FAO 56

A evapotranspiração de referência foi calculada pelo método de Penman-Monteith, de acordo com Allen *et al.* (1998), baseando-se na Equação 9.

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (9)$$

Onde  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ),  $R_n$  o saldo de radiação na superfície ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ),  $G$  o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ),  $T$  a temperatura do ar média diária ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $u_2$  a velocidade do vento média diária a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s$  a pressão de vapor de saturação média diária (kPa),  $e_a$  a pressão real de vapor média diária (kPa),  $\Delta$  a inclinação da curva de pressão de vapor (kPa

$^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) e  $\gamma$  a constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), sendo adotado o valor de  $8,0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  para psicrômetro sem ventilação forçada.

Para a estimativa da evapotranspiração real diária foi escolhida uma pequena área de cultivo de acerola, que foi utilizada para a validação. Assim, foi aplicado um coeficiente de cultivo ( $kc$ ) médio de 0,98, conforme observado por Martins Neto *et al.* (1998). Esse valor médio foi utilizado devido à falta de informações sobre o início do cultivo da acerola, e conseqüentemente, da fase fenológica que se encontrava a cultura no momento das imagens. O cálculo da evapotranspiração real da acerola foi obtido pela Equação 10.

$$ET_r = ET_0 \cdot kc \quad (10)$$

### VALIDAÇÃO

A validação dos valores da  $ET_r$  estimados pela aplicação do algoritmo SEBAL foi executada mediante análise comparativa simples entre esses valores e os estimados pelo método de Penman-Monteith, padrão da FAO 56, de acordo com Allen *et al.* (1998). A análise comparativa foi realizada pelos erros absoluto e relativo, conforme Equações 11 e 12, respectivamente.

$$EA = |ET_r(\text{Penman Monteith}) - ET_r(\text{SEBAL})| \quad (11)$$

$$ER = \left| \frac{ET_r(\text{Penman Monteith}) - ET_r(\text{SEBAL})}{ET_r(\text{Penman Monteith})} \right| \cdot 100 \quad (12)$$

Para Bezerra *et al.* (2008), os valores estimados para serem considerados ótimos devem apresentar erros relativos abaixo de 10%. Considerando que os valores obtidos pelos dois métodos, se forem analisados comparativamente, constata-se que os valores apresentados se mostraram próximos e, portanto, deve-se considerar a diferença entre eles como aceitável.

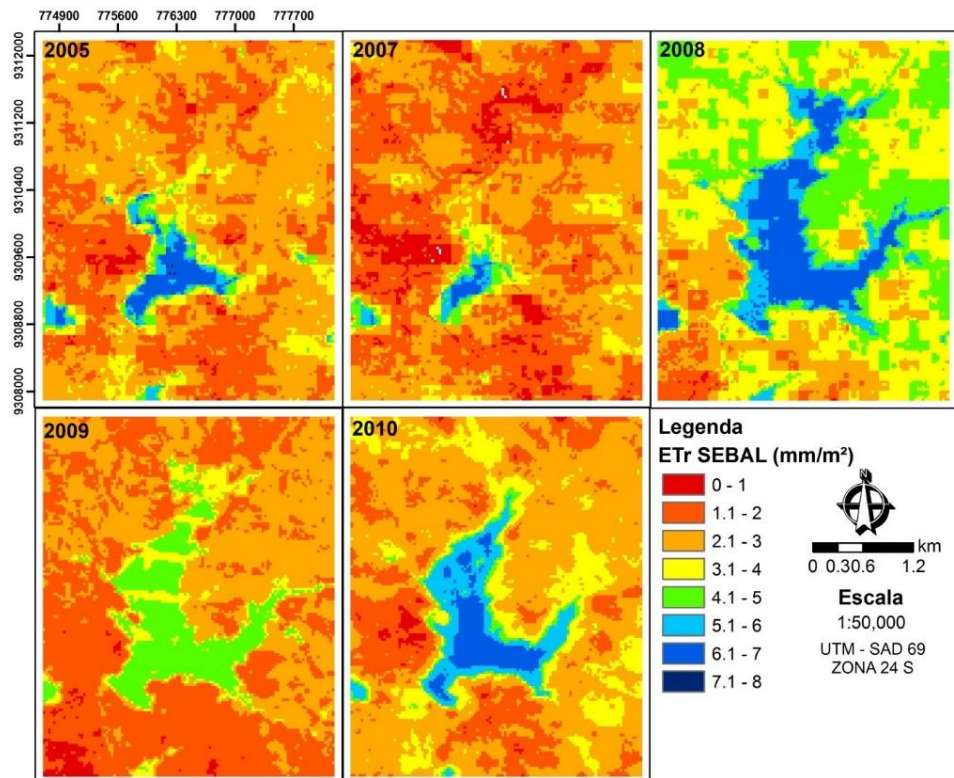
Além da validação, uma estatística descritiva foi aplicada com o *software* STATISTICA para os valores dos pixels dos mapas de evapotranspiração real diária, a fim de visualizar tendências de medida central e de dispersão das variáveis, a fim de se obter resultados da variabilidade espacial e temporal na área de estudo.

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial das estimativas de evapotranspiração diária obtidas com o método SEBAL para as imagens descritas na Tabela 2. As áreas de superfície que apresentam valores de  $ET$  menores que  $1,0 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$  correspondem a solo exposto, enquanto a vegetação nativa de Caatinga muito rala e sem folhas obtiveram valores variando de  $1,0$  e  $3,0 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ . Já a vegetação de Caatinga mais densa apresentou valores da ordem de  $3,0$  a  $5,0 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ , sendo os valores mais elevados para o período de maior precipitação. Os valores acima de  $5 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$  correspondem à área do reservatório Dourado e

representam o processo de evaporação da lâmina d'água exposta à radiação solar incidente.

Figura 4: Mapa temático da variação espacial e temporal da evapotranspiração real diária nos anos de 2005 a 2010, entre os meses de janeiro a dezembro, para o entorno do reservatório Dourado (Currais Novos/RN).



Fonte: Elaborado pelos autores, 2013.

Já os valores para o restante das coberturas vegetais (horta, capim elefante e acerola) foram comprometidos pelo tamanho das áreas que essas atividades ocupam, sendo valores iguais ou menores à resolução espacial das imagens do Landsat-5/TM.

Considerando ainda a variação temporal entre as imagens de ETr, observa-se que os maiores valores foram encontrados na cena de 2008, período que obteve maior índice pluviométrico para os meses de junho e julho (Figura 2), fato que aumenta a disponibilidade de água no solo, e conseqüentemente, a evapotranspiração, com o aumento de absorção de água pelas plantas, fato ocorrido devido ao desenvolvimento da biomassa verde da vegetação de caatinga no período chuvoso.

As imagens de 2005 e 2007 apresentaram baixos valores de evapotranspiração devido ao período de estiagem passado durante esses anos, fato que pode ser comprovado pela reduzida área do reservatório Dourado, representada nas imagens pelos valores mais elevados. Associado ao déficit e estresse hídrico, a vegetação de caatinga, como mecanismo fisiológico de defesa,

perde suas folhas para diminuir a perda de água por transpiração, configurando mais um motivo para os reduzidos valores para essas cenas.

Durante os anos de 2009 e 2010, apesar dos índices pluviométricos terem ocorrido acima da média, as estimativas para estes anos apresentaram resultados médios dentro dos padrões da vegetação de caatinga para período de estiagem, conforme visto na Tabela 4, comparando-as com as imagens de 2005 e 2007. Esse comportamento é fruto da concentração de chuvas nos primeiros meses do ano, e no caso da estimativa de 2009, em específico, devido aos registros meteorológicos diários descritos na Tabela 1, mais precisamente pelo fato da radiação ter sido menor comparada às outras datas.

Ainda, a média da  $ET_r$  para a estimativa de 2010 apresentou valor um pouco mais elevado em relação às imagens de 2005, 2007 e 2009 (Tabela 3), o que pode ser justificado pelo alto índice pluviométrico no mês de junho de 2010, aumentando os valores de  $ET_r$  no entorno do reservatório Dourado, como visto na Figura 4, o que pode ser associado ao escoamento superficial das águas para essa região, que se situa em locais de cotas menores.

Tabela 4: Valores estatísticos descritivos aplicados sobre os dados das imagens da  $ET_r$  resultante da aplicação do SEBAL.

Imagem	N	Média	Med.	Mín.	Máx.	Var	DP	CV
2005	16588	2,50	2,34	0,21	7,02	1,11	1,05	42,03
2007	16588	2,06	2,01	0,03	6,52	0,76	0,87	42,14
2008	16588	3,95	3,85	0,59	6,68	1,41	1,19	30,00
2009	16588	2,29	2,05	0,24	4,49	0,79	0,89	38,67
2010	16588	2,86	2,58	0,06	6,28	1,47	1,21	42,48

Fonte: Elaborado pelos autores, 2013.

N – Número de pixels; Med. – Mediana (mm/dia); Mín. – Mínimo (mm/dia); Máx. – Máximo (mm/dia); Var. – Variância; DP – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação (%).

Os valores de evapotranspiração real diária apresentaram-se com uma tendência a se aproximar da média para todas as imagens, devido aos baixos valores de desvio padrão. Isso pode ser relacionado a uma predisposição na ocorrência de um padrão no comportamento espectral das áreas no entorno do reservatório.

A maior dispersão dos valores de evapotranspiração real diário ocorreu na estimativa de 2010, na qual apresentou maior disponibilidade hídrica apresentado pelo alto índice pluviométrico no mês de junho de 2010. Nesse caso houve um comportamento espacial mais variado entre as diversas coberturas do solo na área estudado, a citar como exemplo a variação entre solo exposto, vegetação de caatinga densa e caatinga rala.

Assim como observado por Arraes *et al.* (2012), Dantas *et al.* (2015) e Felix & Paz (2016), ao avaliarem regiões áridas do Nordeste brasileiro com vegetação do bioma Caatinga, sendo constatado que as maiores variações interanuais dos componentes do balanço de energia foram observadas na área com vegetação nativa densa, provavelmente como resultado da rápida resposta da vegetação às



precipitações que ocorrem no semiárido nordestino, resultando em redução no fluxo de calor no solo, nas áreas com maior densidade de cobertura vegetal. Silva *et al.* (2011) comenta que na vegetação de caatinga, os reguladores fisiológicos das plantas funcionam ora como isolantes, ora como condutores, amortecendo a sua amplitude térmica, influenciando diretamente as variáveis do balanço de energia.

O contrário ocorreu nas estimativas de 2007 e 2009, onde o período de imageamento (mês de julho) apresentou baixos índices pluviométricos, havendo, portanto, uma distribuição espacial padronizada, com vegetação de caatinga pouco desenvolvida em 2007 e com baixa incidência de radiação em 2009, ocasionando os reduzidos valores de desvio padrão e média de ETr para as respectivas imagens.

A Tabela 5 apresenta os valores dos erros absoluto e relativo, usados na validação das estimativas de evapotranspiração real diária pelo algoritmo SEBAL, comparadas aos resultados obtidos pelo método padrão da FAO, Penman-Monteith, de acordo com Allen *et al.* (1998).

Tabela 5: Resultados das estimativas da ETr diária pelo SEBAL a partir dos valores obtidos pelo método padrão da FAO (Penman-Monteith).

Imagem (Data)	Dia do ano	ETr (Penman-Monteith)	ETr SEBAL	Erro Absoluto	Erro Relativo
		mm/dia	mm/dia	mm/dia	(%)
13 julho 2005	194	6,53	3,14	3,39	51,92
19 julho 2007	200	6,23	2,46	3,77	60,51
19 junho 2008	171	4,65	3,37	1,28	27,57
08 julho 2009	189	5,35	1,97	3,38	63,16
09 junho 2010	160	5,70	3,75	1,95	34,25

Fonte: Elaborado pelos autores, 2013.

Os valores de ETr da acerola obtidos pelo SEBAL foram inferiores aos valores encontrados por Martins Neto *et al.* (1998), que obtiveram evapotranspiração real diária variando de 4,4 a 8,0 mm, constatando que a reduzida área torna a imprecisão dos valores pontuais uma fragilidade para regiões muito heterogêneas e com pequenas dimensões para cada uso e ocupação do solo, uma vez que se disponha apenas de produtos orbitais de grande resolução espacial. Nesse caso, não foi possível determinar com precisão os valores da evapotranspiração real diária da acerola pelas imagens processadas, em virtude da dimensão da área ser pequena, em comparação a dimensão espacial do pixel do produto orbital empregado, o que pode ter mascarado o valor real da área de referência.

Diante disso, fica evidente a interferência do comportamento da ETr da cobertura vegetal de caatinga, que entorna a área de acerola, nos valores obtidos para esse ponto de validação. Nesse caso, como os valores da ETr obtidos por Penman-Monteith são calculados para condições ideais e padrões de cobertura vegetal, sendo corrigido para cada tipo de cultivo pelo coeficiente de cultura (kc), que nesse caso foi utilizado o da acerola, os valores calculados pelo método padrão

foram superiores aos encontrados nas imagens processadas pelo SEBAL. Para essas condições, seria necessário ter o Kc da caatinga (que ainda não foi determinado pelas pesquisas) para validar as estimativas do SEBAL e comprovar a interferência do comportamento das variáveis dessa vegetação nas áreas menores.

Com isso, as estimativas do SEBAL para área de estudo foram subestimadas, visto que os valores da validação não levaram em consideração o ajuste da fase fenológica real da cultura da acerola, tal como a inexistência de uma estação meteorológica local. Contudo, isso não significa que o algoritmo não tenha apresentado boas estimativas para a região, já que os valores foram coerentes com os esperados, e as estimativas por Penman-Monteith utilizaram dados aquém do necessário.

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A resposta espectral da cobertura vegetal indicou que pela estimação realizada pelo SEBAL os maiores valores de ETr foram referentes ao do período com maior intensidade de chuvas no decorrer do ano (2008), considerando que as imagens usadas foram todas nos meses de junho e julho, período onde as precipitações começam a diminuir. Tal fato decorre da maior produção de biomassa vegetal da vegetação nativa.

Apesar da validação ter apresentado erro relativo da ordem de 60%, a estimativa da ETr diária pelo SEBAL foi coerente com os valores apresentados pela literatura, considerando que as fragilidades da análise comparativa podem ter sido apresentadas pela estimativa da ETr pelo método de Penman-Monteith e devido a pequena área utilizada para validação, uma vez que para comparação exige-se o conhecimento da fase fenológica da cultura. Portanto, diante desses aspectos considera-se que o SEBAL, por ser um modelo semi-empírico desenvolvido e validado em condições de clima árido e semiárido constitui-se como sendo uma potencialidade de alternativa para estimação da evapotranspiração em escala local diante dos resultados consistentes, tendendo-se ser uma metodologia mais promissora em escala regional.

Ressalta-se ainda que a aplicação do algoritmo é permitida em sistemas de monocultivo, entretanto a sua implementação através do sensoriamento remoto para obtenção das variáveis biofísicas também permite a avaliação espacial de áreas de grande heterogeneidade, na qual é possível a avaliação simultânea de culturas em sistemas rotativos ou consorciados. Isto posto, para que esse método seja replicado é interessante que haja um acompanhamento do ciclo fenológico da cultura pretendida, suas necessidades hídricas e todos os parâmetros da superfície terrestre que possam corroborar na validação dos dados.

No entanto, verifica-se a necessidade de aprimoramento quanto à aplicação do método investigado na pesquisa, como a exigência de sensores orbitais com maior resolução espacial para fidelizar melhor com detalhamentos a variação espacial das pequenas áreas heterogêneas, ou ainda o uso de sensores a bordo de veículos aéreos não tripulados (VANT's) que possam detectar os comprimentos de onda eletromagnéticas necessários ao modelo. Sendo oportuno para finalidade de monitoramento obter produtos orbitais com menores resoluções temporais para possibilitar o monitoramento ambiental e a variabilidade temporal das variáveis biofísicas.

# Evaluation of the SEBAL method to estimate the actual daily evapotranspiration in the Brazilian semiarid region

## ABSTRACT

The estimation of daily actual evapotranspiration (ET<sub>r</sub>) is essential to management and monitoring of watersheds, mainly in semiarid regions, where the water shortage is critical and need more rationalization of water use. Given this, this study aims evaluate the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) algorithm to estimate the real daily evapotranspiration of a semiarid region in comparison to the standard Penman-Monteith method adopted by the Food and Agriculture Organization (FAO). The ET<sub>r</sub> was estimated from the latent heat flux density, obtained as residue of energy balance by SEBAL, which includes in its implementation radiometric calibration, reflectance calculation and biophysical variables, radiation balance and iterative processes for obtaining heat sensitive. The algorithm was applied to five images TM/Lansat-5, point 215, orbit 64, with study area understand the surroundings of Dourado reservoir, Currais Novos city, Rio Grande do Norte. The highest values of ET<sub>r</sub> were obtained for the image of 2008, with average of 3.95 mm/day, due to greater availability of water and, consequently, the development of green biomass of Caatinga vegetation. The validation was not acceptable to the five images analyzed, but the values estimated by SEBAL were consistent with the literature, and the temporal variation was within the expected in the face of data measured in conventional meteorological station.

**KEYWORDS:** Energy balance. Evapotranspiration. Remote sensing.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 279 p., 1998.
- ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land): advanced training and user's manual – Idaho Implementation**, version 1.0, 97 p., 2002.
- 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.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M.; A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212, p. 198-212, 1998.
- BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey, **Journal of Hydrology**, n. 229, p. 87-100, 2000.
- BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B. da; FERREIRA, N.J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM – Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p. 305-317, 2008.
- DANTAS, M. J. F.; ARRAES, F. D. D.; SANTOS, J. B.; ZIMBACK, C. R. L. Sensoriamento remoto na determinação da evapotranspiração na bacia do riacho Jardim/CE. **Energia na Agricultura**, v. 30, n. 1, p. 383-394, 2015.
- DINGMAN, S. L. **Physical hydrology**. Long Grove: Prentice Hall, 600p., 2002.
- FELIX, V. S.; PAZ, A. R. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **RBRH**, v. 21, n. 3, p. 556-569, 2016.
- JESUS, E. S.; MATTOS, A.; JESUS, N. V. G. Análise da evapotranspiração sobre o seridó nordestino em cenários de aquecimento. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 1, p. 470-480, 2014.
- LIMA, P. Estimativa da evapotranspiração real diária em sub-bacias do paracatu utilizando produtos do sensor Modis. In: SILVA, B.B. (Org.). **Aplicações Ambientais Brasileiras com Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto**. Campina Grande: EDUFCG, p. 29-52, 2013.
- MACHADO, C. C.; SILVA, B. B.; 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.
- MARTINS NETO, D.; BEZERRA F. M. L.; COSTA R. N. T. Evapotranspiração real da acerola (*Malpighia glabra* L.) durante o primeiro ano de implantação nas condições climáticas de Fortaleza (CE). In: Congresso Brasileiro De Engenharia

Agrícola, 27, 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: SBEA, p. 55-57, 1998.

MATTOS, A.; BEZERRA, H. N.; BEZERRA, J. M.; OLIVEIRA, H. A.; OLIVEIRA, J. N. P. Evaluación de balance hídrico climatológico en la región semi-árida de Rio Grande del Norte para diferentes escenarios de la temperatura del aire. In: Congreso Centroamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ambiental, 28, 2013, Tegucigalpa, Honduras. **Anais...** Tegucigalpa, Honduras: AIDIS, p. 1-7, 2013.

PAULA, A. C. P. **Estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja e do feijoeiro pelo método da razão de Bowen e pelo modelo SSEBop.** 74f. Dissertação de Mestrado em Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

PEREIRA NETO, M. C. P. **Predisposição à desertificação no núcleo Seridó (RN - Brasil):** geocologia de paisagens semiáridas. 195f. Tese de Doutorado em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SILVA, B. B. **Balço de Radiação com Imagens TM – Landsat.** 2013. Disponível em: <https://www.lapig.iesa.ufg.br/lapig/index.php/component/jdownloads/send/10-disciplinas/796-balanço-de-radiação-com-imagens-tm-landsat?Itemid=0>. Acesso em: dezembro de 2020.

SILVA, H. D. B. **Estudo do Índice de Vegetação no Município de Floresta - PE, utilizando técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto.** Universidade Federal de Rural de Pernambuco – UFRPE. Recife-PE, 2009.

SILVA, F. M.; ANDRADE, A. P.; FERNANDES, P.D.; Costa A. M. B. 2011. Modelagem da condutividade térmica em área de caatinga com predominância de cactáceas. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 2, p. 113-120, 2011.

TREZZA, R. **Evapotranspiration using a satellite-based Surface energy balance with Standardized ground control.** Thesis in Doctor of Philosophy in Biological and Agricultural Engineering, Utah State University, Logan, Utah, 247p, 2002.

**Recebido:** 23/06/2020

**Aprovado:** 27/03/2021

**DOI:** 10.3895/rts.v17n47.12633

**Como citar:** BEZERRA, H. N.; BEZERRA, J. M.; RÊGO, A. T. A. Avaliação do método SEBAL para estimativa da evapotranspiração real diária no semiárido brasileiro. **Rev. Tecnol. Soc.**, Curitiba, v. 17, n. 47, p. 183-201, abr./jun. 2021. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/12633>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

**Direito autoral:** Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

